Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Innovazione del Prodotto

Analisi sperimentale e numerica del trattamento termico post saldatura applicato ad un giunto a T realizzato in acciaio S355

Tesi di laurea magistrale

Relatore

Prof. Paolo Ferro

Laureando

Mattia Mantoan

Anno Accademico 2019-2020

Mattia Mantoan: *Analisi sperimentale e numerica del trattamento termico post saldatura applicato ad un giunto a T realizzato in acciaio S355,* Tesi di laurea magistrale, © 10 Dicembre 2020.

Memento Audere Semper

— Gabriele D'Annunzio

Dedicato a Te
che oggi, per la seconda volta, saresti fiero del tuo "ometto"

Abstract

Il seguente elaborato verte nell'analisi sperimentale e numerica di un T-joint in acciaio $S355$.
L'analisi si divide in due momenti: inizialmente verranno eseguite le analisi sperimentali e successivamente, dopo aver raccolto i dati necessari, sarà possibile procedere con le analisi numeriche.
Nell'analisi sperimentale verranno tagliate delle piastre di acciaio al fine di ottenere dei provini che verranno poi saldati e misurati per rilevare le deformazioni indotte dalla saldatura. Successivamente verranno trattati termicamente e misurati nuovamente al fine di analizzare la riduzione delle deformazioni dovuta al trattamento.
In queste fasi iniziali sarà importante la raccolta dei dati da fornire come input alla simulazione. Durante questa analisi inoltre verranno analizzate le strutture metallurgiche generate nella zona termicamente alterata.
Terminate le analisi sperimentali sarà necessario procedere con la creazione di un modello 3D per la simulazione numerica e con la taratura di quest'ultima.
In un primo momento verrà effettuata un'analisi termica che fornirà le fasi metallurgiche generate durante la saldatura ed il successivo trattamento, dopodiché sarà possibile procedere con l'analisi meccanica durante la quale verranno analizzate le deformazioni del giunto e le tensioni residue.
Al termine dell'analisi numerica verranno confrontati i risultati previsti dalla simulazione con i risultati rilevati durante le analisi sperimentali al fine di vedere se vi è corrispondenza tra i due.

Ringraziamenti

Innanzitutto, vorrei esprimere la mia gratitudine al Prof. Paolo Ferro, relatore della mia tesi, ed a Luca Romanin per l'aiuto ed il sostegno fornitomi durante la stesura del lavoro.
Desidero ringraziare con affetto mia mamma ed i miei nonni per il sostegno, il grande aiuto e per essermi stati vicini in ogni momento durante gli anni di studio.
Ho desiderio di ringraziare poi i miei compagni di università Mirco, Nicolò, Marco ed Irene per tutti i bellissimi anni passati insieme.
Inoltre vorrei ringraziare il gruppo Fonderie di Montorso, in particolar modo Federico Vettore e Raimondo Antonio Borriello, per le opportunità di crescita personale e lavorativa che mi hanno concesso.
Vorrei ringraziare anche tutti i miei amici con cui ho condiviso questo percorso, un ringraziamento speciale va a Mattia Z. che è riuscito a strapparmi un sorriso anche nei momenti più difficili ed a Fabio con il quale ho un rapporto fraterno che dura ormai da molti anni.
Ringrazio anche la Carpenteria Sartori la quale ha messo a disposizione le proprie competenze ed attrezzatura per la realizzazione della parte sperimentale dell'elaborato.
Infine desidero ringraziare Giulia che in tutti questi anni mi ha supportato (e sopportato) subendosi i miei drammi, le mie paranoie ed ha condiviso le mie difficoltà senza lasciarmi mai solo ma dandomi la forza per andare avanti e superare ogni ostacolo si presentasse davanti.
E' soprattutto grazie a te sono riuscito a raggiungere questo traguardo.

Vicenza, 10 Dicembre 2020 Mattia Mantoan

Indice

1 Introduzione **1**
- 1.1 Classificazione secondo la normativa EN10027 . . . 2
  - 1.1.1 Gruppo 1 . . . 2
  - 1.1.2 Gruppo 2 . . . 4
  - 1.1.3 Classificazione numerica . . . 6
- 1.2 Classificazione pratica . . . 8
  - 1.2.1 Acciai da costruzione di uso generale . . . 9
  - 1.2.2 Acciai speciali da costruzione . . . 10
  - 1.2.3 Acciai per usi speciali . . . 12
  - 1.2.4 Acciai per utensili . . . 13
  - 1.2.5 Acciai inossidabili . . . 15

2 La saldatura **17**
- 2.1 Saldabilità . . . 18
- 2.2 Tipologie di giunti saldati . . . 19
- 2.3 Metallurgia della saldatura . . . 21
  - 2.3.1 Zona fusa . . . 22
  - 2.3.2 Zona termicamente alterata . . . 23
  - 2.3.3 I difetti di saldatura . . . 27
- 2.4 Distorsioni e tensioni residue . . . 31
  - 2.4.1 Tensioni residue . . . 32
  - 2.4.2 Ritiri e distorsioni . . . 34
  - 2.4.3 Riduzione delle tensioni residue . . . 36
- 2.5 Saldatura ad arco elettrico . . . 37
  - 2.5.1 Saldatura ad arco con elettrodo metallico rivestito . . . 38
  - 2.5.2 Saldatura ad arco sommerso . . . 39
  - 2.5.3 Saldatura con elettrodo fusibile in gas protettivo . . . 40
  - 2.5.4 Saldatura a idrogeno atomico . . . 41
  - 2.5.5 Saldatura con elettrodo a flusso incorporato . . . 42
  - 2.5.6 Saldatura elettrogas . . . 43
  - 2.5.7 Saldatura ad elettroscoria . . . 44
  - 2.5.8 Saldatura con elettrodo in tungsteno in gas protettivo . . . 45
  - 2.5.9 Saldatura al plasma . . . 46

3 Software di simulazione numerica **47**
- 3.1 Analisi termo-metallurgica . . . 49
  - 3.1.1 Trasformazioni metallurgiche . . . 50

3.1.2 Calcolo della dimensione della grana cristallina 53
3.1.3 Calcolo della temperatura 54
3.2 Analisi meccanica 55
3.2.1 Plasticità 55
3.2.2 Viscoplasticità 58
3.3 Proprietà del materiale 59
3.3.1 Dati termici 59
3.3.2 Dati meccanici 63
3.3.3 Dati metallurgici 68

4 Analisi sperimentale **69**
4.1 Saldatura dei campioni 71
4.1.1 Attrezzatura utilizzata 71
4.1.2 Descrizione del processo 72
4.1.3 Parametri di processo 73
4.2 Misurazione dei campioni 74
4.2.1 Risultati della misurazione 75
4.3 Analisi metallografica 76
4.3.1 Descrizione del processo 76
4.3.2 Risultati dell'analisi 77
4.4 Trattamento termico e misurazione 79
4.5 Simulazione numerica 79
4.5.1 Analisi termica 81
4.5.2 Analisi meccanica 83
4.6 Conclusioni 88

A Certificato **91**

Bibliografia **97**

Elenco delle figure

1.1 Acciai strutturali . . . 2
1.2 Acciai Gruppo 1 . . . 3
1.3 Acciai Gruppo 2 . . . 4
1.4 Fattori moltiplicativi dei tenori degli elementi in lega . . . 5
1.5 Designazione numerica . . . 7
1.6 Elementi chimici presenti nelle diverse classi degli acciai speciali e proprietà . . . 10
1.7 Acciai per utensili . . . 13
1.8 Diagramma Schaeffler . . . 15

2.1 Schematizzazione di un giunto saldato . . . 17
2.2 Saldabilità di acciai e ghise . . . 18
2.3 Tipologie di giunti saldati . . . 19
2.4 Tipologie di lembi per giunti di testa . . . 19
2.5 Tipologie di forma del cordone di saldatura . . . 20
2.6 Posizioni di saldatura per diverse tipologie di giunti . . . 20
2.7 Struttura del giunto saldato . . . 21
2.8 Orientamento delle dendriti . . . 22
2.9 Strutture metallurgiche della ZTA . . . 23
2.10 Zone ad elevata durezza . . . 24
2.11 Ciclo termico di saldatura . . . 25
2.12 Fusione incompleta e penetrazione incompleta . . . 28
2.13 Difetti esterni o di profilo . . . 28
2.14 Vari tipi di cricche nei giunti saldati . . . 29
2.15 Tensioni residue . . . 31
2.16 Andamento delle tensioni trasversali . . . 32
2.17 Andamento delle tensioni longitudinali . . . 33
2.18 Sequenza di distorsione di una struttura saldata . . . 34
2.19 Campo di temperatura attorno alla sorgente di saldatura . . . 35
2.20 Schema del ritiro per diversi giunti . . . 35
2.21 Saldatura ad arco con elettrodo metallico rivestito . . . 38
2.22 Saldatura ad arco sommerso . . . 39
2.23 Saldatura con elettrodo fusibile in gas protettivo . . . 40
2.24 Saldatura con elettrodo a flusso incorporato . . . 42
2.25 Saldatura elettrogas . . . 43
2.26 Saldatura ad elettroscoria . . . 44
2.27 Saldatura con elettrodo in tungsteno in gas protettivo . . . 45

2.28 Saldatura al plasma 46

3.1 Architettura generale di Sysweld 48
3.2 Funzione $f(\lambda)$ 55
3.3 Espansione-contrazione metallurgica 56
3.4 Prova di creep 58
3.5 Conducibilità termica 59
3.6 Densità in funzione della temperatura 60
3.7 Calore specifico in funzione della temperatura 61
3.8 Coefficiente di scambio termico in funzione della temperatura 62
3.9 Deformazione termica in funzione della temperatura 63
3.10 Modulo di Young in funzione della temperatura 64
3.11 Carico di snervamento in funzione della temperatura 65
3.12 Slope delle fase α in funzione della temperatura 66
3.13 Slope delle fase γ in funzione della temperatura 66
3.14 Diagramma CCT 68

4.1 Certificazione acciaio 69
4.2 Piastre da saldare 70
4.3 Piastre 100x200 70
4.4 Piastre 200x200 70
4.5 Saldatrice 71
4.6 Puntatura 72
4.7 Messa in squadra 72
4.8 Saldatura dei giunti 72
4.9 Deformazione giunto 73
4.10 Misurazione cordone 73
4.11 Efficienza della trasmissione termica 73
4.12 Misurazione provini 74
4.13 Analisi delle rilevazioni 74
4.14 Deformazione dei campioni post saldatura 75
4.15 Campione 76
4.16 Panoramica della saldatura 77
4.17 Metallo base 77
4.18 ZTA 78
4.19 ZF 78
4.20 Deformazione dei campioni post trattamento 79
4.21 Mesh 79
4.22 Zona fusa 80
4.23 Bagno di fusione teorico e reale 80
4.24 Sezione del giunto post saldatura 81
4.25 Giunto post saldatura 81
4.26 Andamento della temperatura in funzione del tempo 82
4.27 Sezione del giunto post trattamento 82
4.28 Giunto post trattamento 82
4.29 Giunto vincolato 83
4.30 Deformazione del giunto post saldatura 84

4.31 Deformata post saldatura x5 84
4.32 Deformazione del giunto post trattamento 85
4.33 Deformata post trattamento x5 85
4.34 Tensioni residue post saldatura 86
4.35 Tensioni residue post trattamento 86
4.36 Andamento delle tensioni longitudinali e trasversali 87
4.37 Confronto Zona Fusa teorica e reale 88
4.38 Confronto fasi teoriche e reali 88
4.39 Confronto tra gli angoli reali e l'angolo teorico 89

A.1 Certificato dell'acciaio 94

Elenco delle tabelle

3.1 Conducibilità termica per la fase α 59
3.2 Conducibilità termica per la fase γ 59
3.3 Densità in funzione della temperatura 60
3.4 Calore specifico in funzione della temperatura 61
3.5 Deformazione termica in funzione della temperatura 63
3.6 Modulo di Young in funzione della temperatura 64
3.7 Proprietà viscoelastiche in funzione della temperatura 67

4.1 Composizione chimica 69

Capitolo 1

Introduzione

L'acciaio ha sempre avuto un ruolo di primaria importanza per la vastità dei suoi impieghi, esso infatti viene utilizzato nell'industria automobilistica, nel settore delle costruzioni, Oil and Gas, nel settore navale, dei trasporti e in molti altri ancora.
La parola acciaio indica una lega composta principalmente da ferro e carbonio (fino al $2,11\%$) ma tali leghe possono contenere anche altri elementi, in questo modo si crea una vastissima gamma di proprietà ed applicazioni.
Inoltre le leghe a base di altri metalli che garantiscono prestazioni simili a quelle dell'acciaio sono molto più costose e questo giustifica la sua enorme diffusione.
E' possibile produrre un gran numero di acciai, perciò è indispensabile operare una classificazione degli stessi.
Gli acciai possono essere classificati in diversi modi, a seconda: del metodo di produzione, dei loro impieghi o della composizione chimica.
Esistono diverse normative nazionali e sovranazionali per che permettono di designare gli acciai ma si possono notare sostanziali differenze.
Una prima divisione degli acciai può essere effettuata sulla base del tenore di carbonio:

* acciai extradolci (C$< 0,15\%$);
* acciai dolci ($0,15\%$ <C$< 0,25\%$);
* acciai semiduri ($0,25\%$ <C$< 0,50\%$);
* acciai duri (C$> 0,50\%$).

Tuttavia acciai dolci ed extradolci ricoprono circa l'80% del mercato degli acciai.

1.1 Classificazione secondo la normativa EN10027

La classificazione, secondo la normativa europea, prevede la suddivisione degli acciai in due gruppi principali: Gruppo 1 e Gruppo 2.
Gli acciai appartenenti al Gruppo 1 vengono designati in base alle loro caratteristiche meccaniche o fisiche mentre gli acciai appartenenti al Gruppo 2 vengono classificati in base alla loro composizione chimica.

1.1.1 Gruppo 1

Gli acciai appartenenti a questo gruppo vengono designati tramite indicazioni di base ed eventuali indicazioni accessorie.
Nel caso di un acciaio strutturale:

$$S275JR + (C) + AR$$

* Prima lettera: impiego;
* Primo numero: carico di snervamento minimo prescritto;
* Seconda lettera: resilienza minima;
* Terza lettera/numero: temperatura della prova di resilienza;
* Quarta lettera: impiego particolare o tipo di magnetizzazione;
* Ultime due lettere: stato di fornitura.

Simboli principali	Simboli addizionali per l'acciaio	Simboli addizionali per i prodotti di acciaio
G S n n n	an	+an +an ..... [a]

Simboli principali		Simboli addizionali					
Lettera	Caratteristiche meccaniche	Per l'acciaio					Per i prodotti di acciaio
		Gruppo 1 [b]				Gruppo 2 [c] [d]	
G = Acciaio per getti (se necessario) S = Acciaio per impieghi strutturali	nnn = Valore del carico di snervamento minimo specificato [e] in MPa [f] per la gamma di spessore più ridotto	Resilienza in Joule (J)			Temperatura di prova	C = Formatura a freddo speciale D = Rivestimento mediante immersione a caldo E = Smaltatura F = Fucinatura H = Profilati cavi L = Basse temperature M = Laminazione termomeccanica N = Normalizzazione o laminazione di normalizzazione P = Palancole Q = Bonifica S = Impiego navale T = Tubi W = Resistente alla corrosione atmosferica an = Simbolo chimico degli elementi addizionali specificati, per esempio Cu, se necessario insieme a una sola cifra indicante 10 volte il valore medio (arrotondato allo 0,1%) dell'intervallo specificato del tenore di tale elemento	Prospetti 16, 17 e 18
		27J	40J	60J	°C		
		JR	KR	LR	20		
		J0	K0	L0	0		
		J2	K2	L2	-20		
		J3	K3	L3	-30		
		J4	K4	L4	-40		
		J5	K5	L5	-50		
		J6	K6	L6	-60		
		A = Indurimento per precipitazione M = Laminazione termomeccanica N = Normalizzazione o laminazione di normalizzazione Q = Bonifica G = Altre caratteristiche seguite, se necessario, da 1 o 2 cifre					

a) n = caratteri numerici, a = caratteri letterali, an = caratteri alfanumerici.
b) I simboli A, M, N e Q del Gruppo 1 si applicano agli acciai a grano fine.
c) I simboli del gruppo 2 che non sono simboli chimici possono avere un suffisso di una o due cifre quando è necessario effettuare una distinzione tra qualità diverse in conformità alla norma di prodotto corrispondente.
d) Se sono necessari due simboli di questo gruppo, il simbolo chimico deve essere l'ultimo indicato.
e) Il termine "valore del carico di snervamento" si riferisce al valore del carico di snervamento superiore o inferiore (R_{eH}) o (R_{eL}) o al carico di deformazione plastica (R_p) o all'allungamento totale al carico di deformazione plastica (R_t), in base al requisito specificato nella norma di prodotto corrispondente.
f) 1 MPa = 1 N/mm^2.

Figura 1.1: Acciai strutturali

In seguito viene riportata in figura 1.2 la sigla degli acciai appartenenti al Gruppo 1 con altri impieghi.

Acciai per impieghi strutturali
Designazione: Snnn
nnn: Carico unitario di snervamento minimo prescritto [MPa]

Acciai per impieghi sotto pressione
Designazione: Pnnn
nnn: Carico unitario di snervamento minimo prescritto [MPa]

Acciai per tubi di conduzione
Designazione: Lnnn
nnn: Carico unitario di snervamento minimo prescritto [MPa]

Acciai per costruzioni meccaniche
Designazione: Ennn
nnn: Carico unitario di snervamento minimo prescritto [MPa]

Acciai per cemento armato
Designazione: Bnnn
nnn: Carico unitario di snervamento minimo prescritto [MPa]

Acciai per cemento armato precompresso
Designazione: Ynnn
nnn: Carico unitario di rottura [MPa]

Acciai per rotaie
Designazione: Rnnnn
nnnn: Durezza Brinell minima richiesta [HB]

Prodotti piani per formatura a freddo
Designazione: Dann
a: C: laminato a freddo
D: laminato a caldo destinati direttamente alla formatura a freddo
X: stato di laminazione non specificato
nn: numero assegnato dall'organismo responsabile

Prodotti piani in acciaio alto resistenziale per formatura a freddo
Designazione: Hannn
a: C: laminato a freddo
D: laminato a caldo destinati direttamente alla formatura a freddo
X: stato di laminazione non specificato
nnn: Carico unitario di snervamento minimo prescritto [MPa]

Banda nera (acciaio prodotto per imballaggi)
Designazione: Tannn
a: H: acciai trattati termicamente in continuo
S: acciai trattati termicamente a parte
nnn: Carico unitario di snervamento minimo prescritto [MPa]

Acciai magnetici
Designazione: Mnnnn - mma
nnn(n): massima perdita specifica prescritta in W/kg
moltiplicata per 100
mm: spessore nominale in millimetri moltiplicato per 100
Per polarizzazioni di 1,5 Tesla a 50Hz
A = lamiere a grani non orientati
D = lamiere semifinite (non sottoposte a ricottura finale)
di acciaio non legato
E = lamiere semifinite (non sottoposte a ricottura finale)
di acciaio legato
Per polarizzazioni di 1,7 Tesla a 50Hz
P = lamiere a grani orientati ad elevata permeabilità
S = lamiere a grani orientati convenzionalmente

Figura 1.2: Acciai Gruppo 1

1.1.2 Gruppo 2

Gli acciai del Gruppo 2, designati secondo la loro composizione chimica, si suddividono in 4 sottogruppi:

* Acciai non legati con un tenore medio di Mn $< 1\%$;
* Acciai non legati con tenore medio di Mn $> 1\%$, acciai non legati per lavorazioni meccaniche ad alta velocità e acciai debolmente legati il cui tenore in massa di ciascun elemento è $< 5\%$;
* Acciai legati, con almeno un elemento in cui i tenore in massa è $> 5\%$;
* Acciai Rapidi.

	Tipo di acciaio	Composizione (le concentrazioni si intendono medie)			
Gruppo 2 - acciai designati in base alla composizione chimica	Acciai non legati con tenore di manganese <1%	C	100x%C		
	Acciai non legati con tenore di manganese >=1% + Acciai non legati per lavorazioni meccaniche ad alta velocità ("automatici") + Acciai legati con elementi in tenore <5%	100x%C	Simboli degli elementi presenti in ordine decrescente di concentrazione		Concentrazione degli elementi separate da un trattino moltiplicate per il rispettivo fattore 4x ==> Cr, Co, Mn, Ni, Si, W 10x ==> Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr 100x ==> Ce, N, P, S 1000x ==> B
	Acciai legati (tenore di almeno un elemento >=5%	X	100x%C	Simboli degli elementi presenti in ordine decrescente di concentrazione	Concentrazione degli elementi separate da un trattino
	Acciai rapidi	HS	%W - %Mo - %V - %Co		

Figura 1.3: Acciai Gruppo 2

Sottogruppo 1

Gli acciai appartenenti al primo sottogruppo vengono designati con la lettera C, rappresentante il carbonio, seguita da un numero che rappresenta il suo tenore all'interno della lega moltiplicato per 100.

$$Cnn$$

Un acciaio appartenente a tale sottogruppo è il $C40$.

Sottogruppo 2

Gli acciai appartenenti al secondo sottogruppo si indicano con un numero, i simboli dei principali elementi in lega (in ordine di tenore di massa) ed uno o più numeri.

$$nnAaBb...nn - nn$$

* Primo numero: tenore di carbonio moltiplicato per 100;
* Lettere: principali elementi chimici in lega;
* Ultimi numeri: concentrazione degli elementi chimici in lega moltiplicati per opportuni fattori moltiplicativi (figura 1.4)

Elemento	Fattore
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Cu, Mo, Nb, Ti, V, ...	10
N, P, S	100
B	1000

Figura 1.4: Fattori moltiplicativi dei tenori degli elementi in lega

Un esempio è il $36NiCrMo16$ che è un acciaio avente $0,36\%$ di carbonio, il 4% di nichel, un tenore di cromo non definito ma minore del 4% ed un tenore ancora inferiore di molibdeno.

Sottogruppo 3

Gli acciai appartenenti al terzo sottogruppo si indicano con la lettera X seguita da un numero, gli elementi in lega contenuti e con altri numeri.

$$XnnAaBb...nn - nn$$

* Lettera X: indica che almeno uno degli elementi in lega supera il 5%;
* Primo numero: tenore di carbonio moltiplicato per 100;
* Lettere: principali elementi chimici in lega;
* Ultimi numeri: concentrazione degli elementi chimici in lega.

Un esempio è il $X10CrNi18-8$ che è un acciaio contenente lo $0,10\%$ di carbonio, il 18% di cromo l'8% di nichel.

Sottogruppo 4

Gli acciai appartenenti al quarto sottogruppo si indicano con le lettere HS seguite da tre o quattro numeri.

$$HSnn - mm - kk - zz$$

* Lettere HS: indica che si tratta di acciai per utensili che si usano per lavorare altri metalli;

* Numeri: indicano, in ordine, la concentrazione di tungsteno, molibdeno, vanadio e cobalto.

Un esempio è il $HS18-0-1$ che è un acciaio rapido contenente il 18% di tungsteno, lo 0% di molibdeno, l'1% di vanadio ed lo 0% di cobalto.

1.1.3 Classificazione numerica

Esiste anche una designazione numerica degli acciai, quest'ultima è prevista per tutti gli acciai prodotti in Europa e prevede solo l'utilizzo di numeri.

$$1.nnmm$$

* Numero 1: indica che si tratta di acciaio;

* Numeri nn: indicano il tipo di acciaio (legato, non legato, di base, di qualità o speciale);

* Numeri mm: indicano il numero progressivo dell'acciaio.

Tale nomenclatura risulta però poco intuitiva ma molto utile in campo pratico e commerciale.

Acciai non legati	Acciai di base		1.00XX 1.90XX								
	Acciai di qualità		1.01XX 1.91XX	Per impieghi strutturali in generale Rm<500MPa							
			1.02XX 1.92XX	Per impieghi strutturali non destinati a trattamento termico Rm<500MPa							
			1.03XX 1.93XX	C<0.12% / Rm< 400MPa							
			1.04XX 1.94XX	0.12<=C<0.25% / 400<=Rm< 500MPa							
			1.05XX 1.95XX	0.25<=C<0.55% / 500<=Rm< 700MPa							
			1.06XX 1.96XX	C>=0.55% / Rm>= 700MPa							
			1.07XX 1.97XX	Al fosforo o allo zolfo							
	Acciai speciali		1.10XX	Con caratteristiche fisiche particolari							
			1.11XX	Per impieghi strutturali, per costruzioni meccaniche e per apparecchi a pressione, C < 0.50%							
			1.12XX	Per impieghi strutturali, per costruzioni meccaniche e per apparecchi a pressione, C >=0.50%							
			1.13XX	Per impieghi strutturali, per costruzioni meccaniche e per apparecchi a pressione, con requisiti particolari							
			1.14XX								
			1.15XX	Per utensili							
			1.16XX	Per utensili							
			1.17XX	Per utensili							
			1.18XX	Per utensili							
			1.19XX								
Acciai legati	Acciai di qualità		1.08XX 1.98XX	Con caratteristiche fisiche particolari							
			1.09XX 1.99XX	Per altri diversi campi di impiego							
	Acciai speciali	Per utensili	1.20XX	Cr							
			1.21XX	Cr-Si; Cr-Mn; Cr-Mn-Si							
			1.22XX	Cr-V; Cr-V-Si; Cr-V-Mn; Cr-V-Mn-Si							
			1.23XX	Cr-Mo; Cr-Mo-V; Mo-V							
			1.24XX	W; Cr-W							
			1.25XX	W-V; Cr-W-V							
			1.26XX	W ad eccezione dei gruppi 24, 25 e 27							
			1.27XX	Con Ni							
			1.28XX	Altri							
			1.29XX								
		Diversi	1.30XX								
			1.31XX								
			1.32XX	Acciai rapidi con Co							
			1.33XX	Acciai rapidi senza Co							
			1.34XX								
			1.35XX	Per cuscinetti							
			1.36XX	Con caratteristiche magnetiche particolari, senza Co							
			1.37XX	Con caratteristiche magnetiche particolari, con Co							
			1.38XX	Con caratteristiche fisiche particolari, senza Ni							
			1.39XX	Con caratteristiche fisiche particolari, con Ni							
		Inossidabili e refrattari	1.40XX	Acciai inossidabili Ni<2.5%, senza Mo, Nb, Ti							
			1.41XX	Acciai inossidabili Ni<2.5%, con Mo, senza Nb, Ti							
			1.42XX								
			1.43XX	Acciai inossidabili Ni>=2.5%, senza Mo, Nb, Ti							
			1.44XX	Acciai inossidabili Ni>=2.5%, con Mo, senza Nb, Ti							
			1.45XX	Acciai inossidabili con aggiunte particolari							
			1.46XX	Leghe di Ni resistenti all'azione chimica ed alle temperature elevate							
			1.47XX	Acciai refrattari con Ni<2.5%							
			1.48XX	Acciai refrattari con Ni>=2.5%							
			1.49XX	Materiali resistenti a temperature elevate							
		Per impieghi strutturali, per costruzioni meccaniche e per apparecchi a pressione	1.50XX Mn-Si-Cu	1.51XX Cr-Si Cr-Mn Cr-Mn-Si	1.52XX Mn-Cu Mn-V Si-V Mn-Si-V	1.53XX Mn-Ti Si-Ti	1.54XX Mo Nb,Ti,V W	1.55XX B Mn-B Mn<1.65%	1.56XX Ni	1.57XX Cr-Ni Cr<1%	1.58XX Cr-Ni 1<Cr<1.5%	1.59XX Cr-Ni 1.5<Cr<2%
			1.60XX Cr-Ni 2<=Cr<3%	1.61XX	1.62XX Ni-Si Ni-Mn Ni-Cu	1.63XX Ni-Mo Ni-Mo-Mn Ni-Mo-Cu Ni-Mo-V Ni-Mn-V	1.64XX	1.65XX Cr-Ni-Mo Mo<0.4% Ni<0.2%	1.66XX Cr-Ni-Mo Mo<0.4% 2<Ni<3.5%	1.67XX Cr-Ni-Mo Mo<0.4% 3.5<Ni>5% ovvero Mo>=0.4%	1.68XX Cr-Ni-V Cr-Ni-W Cr-Ni-V-W	1.69XX Cr-Ni ad eccezione gruppi da 57 a 68
			1.70XX Cr Cr-B	1.71XX Cr-Si Cr-Mn Cr-Mn-B Cr-Si-Mn	1.72XX Cr-Mo con Mo<0.35% Cr-Mo-B	1.73XX Cr-Mo Mo>0.35%	1.74XX	1.75XX Cr-V Cr<2%	1.76XX Cr-V Cr>=2%	1.77XX Cr-Mo-V	1.78XX	1.79XX Cr-Mn-Mo Cr-Mn-Mo-V
			1.80XX Cr-Si-Mo Cr-Si-Mn-Mo Cr-Si-Mo-V Cr-Si-Mn-Mo-V	1.81XX Cr-Si-V Cr-Mn-V Cr-Si-Mn-V	1.82XX Cr-Mo-W Cr-Mo-W-V	1.83XX	1.84XX Cr-Si-Ti Cr-Mn-Ti Cr-Si-Mn-Ti	1.85XX Acciai da nitrurazione	1.86XX	1.87XX acciai non destinati a trattamento termico c/o l'utilizzatore	1.88XX Acciai saldabili ad alta resistenza	1.89XX

Figura 1.5: Designazione numerica

1.2 Classificazione pratica

In campo pratico capita molto spesso di riferirsi agli acciai in basse alla loro applicazione. Per questo motivo esiste una classificazione pratica che viene spesso utilizzata in campo siderurgico e meccanico.
Tale classificazione divide gli acciai in:

* Acciai da costruzione di uso generale;
* Acciai speciali da costruzione:
  - da bonifica;
  - autotempranti;
  - per molle;
  - da cementazione;
  - da nitrurazione.
* Acciai inossidabili:
  - austenitici;
  - ferritici;
  - martensitici;
  - induriti per precipitazione;
  - Duplex.
* Acciai per utensili:
  - rapidi;
  - per lavorazioni a caldo;
  - per lavorazioni a freddo.
* Acciai per usi speciali:
  - per funi;
  - per cuscinetti;
  - per le basse temperature;
  - per le alte temperature.

1.2.1 Acciai da costruzione di uso generale

Gli acciai da costruzione di uso generale vengono classificati sulla base delle proprietà meccaniche o fisiche e non della loro composizione chimica.
Tali acciai vengono individuati dal Gruppo 1 della normativa $EN10027$ e vengono distinti in base alla loro applicazione ed alle caratteristica meccaniche (solitamente la resistenza meccanica, in particolare, il loro carico di snervamento).
Tipicamente il contenuto di carbonio di questi acciai è inferiore allo $0,2\%$, il contenuto di S e P è inferiore allo $0,03\%$ e sono presenti Si e Mn i quali però non sono da considerare come elementi in lega ma sono dovuti al processo produttivo.
Non contenendo altri alliganti tali acciai sono poco costosi e rappresentano la maggior parte della produzione mondiale.
Per tali acciai non è richiesta una particolare composizione chimica ma solamente caratteristiche meccaniche superiori ad un determinato valore.
A causa del loro basso contenuto di carbonio tali acciai non vengono trattati termicamente, in alcuni casi si esegue un trattamento di normalizzazione, ma bensì vengono impiegati grezzi di laminazione.
Un altro punto di forza di tali acciai è la saldabilità dovuta al basso contenuto di carbonio e di elementi che aumentano la temprabilità.

$$C_{equivalente} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr+\%Mo+\%V}{5} + \frac{\%Ni+\%Cu}{15}$$

Se il carbonio equivalente è inferiore a $0,4$ l'acciaio viene ritenuto saldabile. Questi acciai raggiungono carichi di rottura intorno ai 500 MPa dato il basso contenuto di carbonio e l'assenza di elementi in lega.
Per modificare la resistenza meccanica di tali acciai si può quindi agire su pochi fattori quali l'incrudimento e l'affinamento della grana cristallina.
L'aggiunta limitata di V forma dei precipitati a bordo grano che ne limitano l'accrescimento, inoltre l'aggiunta di piccolissime quantità di Ti, Ta, Nb, V crea, legandosi con il carbonio, dei nano-precipitati all'interno dei grani che, interagendo con le dislocazioni, aumentano la resistenza meccanica.
In questo modo è possibile raggiungere carichi di rottura di circa 650 MPa, inoltre l'affinamento della grana cristallina ha effetti positivi anche sulla tenacità.
Infine negli ultimi anni si stanno sviluppando, soprattutto nel settore automotive, acciai da costruzione di uso generale con speciali caratteristiche ed elevata resistenza meccanica.
Tali acciai possono arrivare a carichi di rottura pari a 1400 MPa tramite particolari trattamenti termici che portano alla formazione di più fasi all'interno della matrice metallica.

1.2.2 Acciai speciali da costruzione

Gli acciai speciali da costruzione sono prodotti in tonnellaggi inferiori rispetto gli acciai da costruzione di uso generale ma vantano di una qualità superiore.
Anche questi acciai, come gli acciai da costruzione di uso generale, quando vengono messi in esercizio devono resistere a sollecitazioni meccaniche, sia statiche sia dinamiche, senza deformarsi, questi ultimi però presentano maggiori resistenze meccaniche.
Questo è dovuto al maggior tenore di carbonio e di elementi in lega quali Cr, V, Mo, Ni che permettono loro di essere trattati termicamente in modo efficace.
In figura 1.6 vengono riportati i principali elementi in lega dei diversi acciai speciali da costruzione (Si e Mn sono sempre presenti a causa del processo produttivo).

Acciaio / Elemento	Bonifica	Nitrurazione	Molle	Autotemprante	Cementazione
C	>0,20	>0,20	≈0,50	>0,25	<0,20
Si	*	*	1,5÷2,0	*	*
Mn	~C	-	-	-	-
Ni	-	assente	-	5<Ni+Cr+C<7	-
Cr	-	1,5÷1,7	-		-
Mo	se c'è Cr	-	-	-	-
V	-	-	-	-	-
Al	assente	0,5÷1,5	assente	assente	assente
σ_{max} [MPa]	500÷1500	500÷1500	1300÷1800	1700÷2500	500÷1500
T_r [°C]	600	600	450	200	150

(*) <1%;
(-) può essere presente o non presente.

Figura 1.6: Elementi chimici presenti nelle diverse classi degli acciai speciali e proprietà

Gli acciai speciali da costruzione appartengono al Gruppo 2 della classificazione secondo la norma $EN10027$ in quanto vengono designati in base alla loro composizione chimica.

Acciai da bonifica

Gli acciai da bonifica sono gli acciai più utilizzati tra gli acciai speciali da costruzione.
Il nome di tali acciai deriva dal trattamento termico che subiscono prima di essere messi in esercizio e che consente ad essi di assumere la massima resistenza meccanica.
Questi acciai mostrano un'ottima resistenza ad urti, sforzi e vibrazioni, tuttavia l'elevato contenuto di elementi in lega li rende poco saldabili se non dopo avere operato opportuni pre- e post-riscaldi.
Tali acciai vengono tipicamente impiegati per: alberi di trasmissione, alberi a gomiti, assi, assali ferroviari, dischi, pistoni e bielle.
Alcuni esempi di acciai da bonifica sono il $C40$, $25CrMo4$ ed il $36NiCrMo16$.

Acciai autotempranti

Gli acciai auto tempranti sono acciai speciali da costruzione che hanno la caratteristica di assumere una struttura martensitica dopo il semplice raffreddamento in aria ed per questo che vengono spesso utilizzati per pezzi di elevate dimensioni, che risulterebbero difficili da temprare in modo tradizionale, o per componenti che necessitano di una elevata temprabilità.
Il raffreddamento in aria inoltre comporta un altro vantaggio, le tensioni residue che si generano basse e questo previene la formazione di fratture da trattamento termico.
Tali acciai hanno in lega C, Cr, Ni in un tenore compreso tra il 5% ed il 7% ed il più utilizzato è il $36NiCrMo16$.

Acciai per molle

Gli acciai sono caratterizzati da un elevato carico di snervamento ed, in particolare, da un elevato rapporto $\frac{\sigma_{sn}}{\sigma_{max}}$ compreso tra $0,85$ e $0,90$.
Questa caratteristica è indispensabile per la funzione di questi componenti, essi infatti devono lavorare sempre in campo elastico recuperando tutte le deformazioni alla fine della sollecitazione.
Per ottenere tali caratteristiche si utilizzano leghe con un contenuto di carbonio tra lo $0,5\%$ e l'1% (acciai armonici) o acciai debolmente legati con un tenore di silicio vicino all'$1,5\%$.
Questi acciai hanno la caratteristica di avere la pallinatura come ultima fase del ciclo tecnologico, tale operazione consiste nel bombardare la superficie della molla con palline di metallo o ceramiche, questa operazione di deformazione plastica permette di incrudire la superficie generando tensioni di compressione che aumentano la vita a fatica del componente stesso.
Alcuni esempi di acciai per molle sono il $C60$, il $C100$, il $46Si7$ ed il $60SiCrV7$.

Acciai da cementazione

Gli acciai da cementazione vengono utilizzati per realizzare componenti soggetti a fenomeni di usura, strisciamento o danneggiamento superficiale.
Tali acciai possono essere al solo carbonio o debolmente legati e vengono tipicamente impiegati per realizzare ruote dentate, bielle e camme.
Questi acciai sono caratterizzati da un tenore di carbonio in lega inferiore allo $0,2\%$ e questo è dovuto al trattamento di cementazione che subiscono prima di essere messi in esercizio. La cementazione consente di indurire la superficie del componente arricchendola di carbonio e successivamente temprandola, in questo modo si forma una martensite più ricca di carbonio dopo la tempra.
Il componente da cementare viene messe in un'atmosfera ricca di carbonio ad una temperatura superiore ai punti critici per $2-5$ ore, in questo modo il carbonio penetra nel reticolo del ferro. Il risultato di tale trattamento è un componente con una differente concentrazione di carbonio tra pelle e cuore e questo garantisce un gradiente di durezza. Lo strato indurito può variare tra $1-2\ mm$ e si possono raggiungere durezza di circa $900\ HV$.
Alcuni esempi di acciai da bonifica sono il $C10$, $18CrMo4$ ed il $20NiCrMo2-2$.

Acciai da nitrurazione

Gli acciai da nitrurazione, come gli acciai da cementazione, vengono utilizzati per realizzare componenti soggetti a fenomeni di usura, strisciamento o danneggiamento superficiale.
Tali acciai sono debolmente legati e vengono tipicamente impiegati per realizzare ruote dentate, bielle e camme.
Anche questi acciai subiscono un trattamento termo-chimico di indurimento superficiale. Il trattamento di nitrurazione consiste nell'indurire la superficie del componente tramite l'arricchimento di azoto. L'azoto diffonde nel reticolo del ferro e, se sono presenti particolari elementi quali Cr, Al e V, può formare dei precipitati che induriscono la zona di diffusione.
La nitrurazione viene effettuata al di sotto dei punti critici in una atmosfera ricca di azoto per un tempo che può variare dalle 12 alle 96 ore.
Al termine del trattamento si ottiene un componente con uno spessore indurito che può variare tra $0,1 - 0,2\ mm$ ed una durezza superficiale pari a circa 1200 HV.
Il principale acciaio da nitrurazione è il $41CrAlMo7$.

1.2.3 Acciai per usi speciali

Acciai per cuscinetti

Gli acciai per cuscinetti devono resistere a moltissimi cicli di carico e per questo motivo la loro composizione chimica deve essere mantenuta entro limiti molto stretti, gli elementi indesiderati devono essere assenti e le inclusioni non metalliche devono essere severamente contenute.
I tipi di acciaio che vengono utilizzati per la costruzione di tali componenti sono divisi in: acciai "a tutta tempra" come il $100Cr6$, acciai da cementazione come il $18NiCrMo14-6$, acciai per tempra superficiale come il $43CrMo4$ e acciai inossidabili come il $X108CrMo17$.
Questi acciai sono caratterizzati da: elevata ed uniforme durezza, buona resistenza all'usura, elevata penetrazione di tempra, limitata penetrazione e discreta tenacità.

Acciai per funi

Gli acciai per funi, visito la loro specifica applicazione, sono stati sviluppati con una composizione eutettoidica.
Le funi vengono ottenute partendo da una vergella che viene sottoposta a successive operazioni di trafilatura, per questo motivo tali acciai devono avere elevata resistenza a trazione e torsione ed un'elevata tenacità.
Per ottenere tali proprietà è necessario combinare composizione chimica, deformazione plastica e trattamento termico, in questo modo è possibile ottenere una struttura quasi totalmente priva di inclusioni non metalliche e costituita principalmente da perlite fine.
Gli acciai per funi possono arrivare a carichi di rottura che superano i 1770 MPa.

Acciai per impieghi alle basse temperature

Gli acciai per impieghi alle basse temperature sono caratterizzati da un temperatura di transizione duttile-fragile molto bassa. E' opportuno infatti utilizzare gli acciai al di sopra della loro temperatura di transizione per evitare cedimenti improvvisi dovuti alla fragilità.
Si possono utilizzare acciai al solo carbonio per impieghi fino a $-40°\ C$, acciai debolmente legati contenenti Mn e Ni per impieghi fino a $-60°\ C$ o acciai al sono Ni per temperature più basse, al 9% di Ni si possono utilizzare per applicazioni criogeniche.
Alcuni esempi di acciai per impieghi alle basse temperature sono il $P265NL$, il $13MnNi6-3$ ed il $X10Ni9$.

Acciai per impieghi alle alte temperature

Gli acciai per impieghi alle alte temperature, a causa del loro impiego, sono soggetti a scorrimento viscoso corrosione ed ossidazione, per questo motivo si utilizzano diverse classi di acciai, mano a mano più legati, al crescere della temperatura di utilizzo.
Gli acciai al carbonio, come il $P235GH$ ed il $P355GH$, possono essere utilizzati per temperature di esercizio inferiori ai $450°\ C$, mentre acciai contenenti Cr e Mo, come il $13CrMo4-5$ ed il $X12CrMo5$, possono arrivare fino ai $600°\ C$. Per superare tale temperature di esercizio è necessario utilizzare acciai inossidabili con contenuti elevati di Cr o superleghe a base Ni.

1.2.4 Acciai per utensili

Gli acciai per utensili sono stati sviluppati per la lavorazione di altre leghe metalliche ed a causa della severità di impiego devono: essere stabili alle alte temperature, avere un elevato livello di durezza, possedere elevata resistenza all'usura alle alte temperature ed avere una buona resistenza meccanica e tenacità.
I principali elementi in lega di questi acciai sono: carbonio, cromo, molibdeno, tungsteno, vanadio e cobalto. Questi elementi in lega garantiscono un'elevata temprabilità ed una martensite con elevata durezza inoltre il tenore di carbonio molto elevato garantisce la formazione di carburi legandosi a Cr, Mo, W e V.
I carburi, oltre a garantire elevata resistenza all'usura, bloccano l'accrescimento del grano austenitico e consentono di avere una struttura a grana fine che garantisce una buona tenacità.

Acciai non legati per lavorazioni a freddo	Acciai legati per lavorazioni a freddo	Acciai legati per lavorazioni a caldo	Acciai rapidi
C45	50WCrV8	32CrMoV12-28	HS 0-4-1
C70	95MnWCr5	X40CrMoV5-1	HS 18-0-1
C80	X153CrMoV12	50CrMoV13-15	HS 6-5-2
C105	X210CrW12	X35CrWMoV5	HS 6-5-3-8
C120	X38CrMo16	38CrCoWV18-17-17	HS 10-4-3-10

Figura 1.7: Acciai per utensili

Acciai rapidi

Gli acciai rapidi sono impiegati per lavorazioni a freddo dei metalli nelle macchine utensili e sono caratterizzati da un'elevata durezza e capacità di taglio anche ad alte temperature.
Tali acciai hanno un tenore di carbonio che varia da $0,8$ e $1,20\%$ e contengono Cr, Mo, W, V e Co. Gli elementi in lega contribuiscono alla formazione di carburi e il cobalto aumenta la resistenza alle alte temperature.

Acciai per lavorazioni a caldo

Gli acciai per lavorazioni a caldo hanno un contenuto medio di carbonio di $0,35 - 0,45\%$ di carbonio ed un tenore di Cr, Mo, W e V che va dal 6 al 14%.
Questi acciai sono tipicamente utilizzati per realizzare stampi a caldo, matrici per estrusione o utensili per il taglio a caldo.

Acciai per lavorazioni a freddo

Gli acciai per lavorazioni a freddo possono essere acciai non legati o acciai legati.
Gli acciai non legati hanno un tenore di carbonio che va da $0,7$ a $1,2\%$ e sono tipicamente utilizzati per lavorazioni in cui non vi è un notevole sviluppo di calore come il taglio del legno, del rame o dell'alluminio.
Gli acciai legati invece contengono Cr, Mo, W e V e possono essere utilizzati per impieghi in cui le temperature possono toccare i $200° C$ per periodi limitati. Questi ultimi sono utilizzati per realizzare attrezzature da imbutitura e formatura a freddo.

1.2.5 Acciai inossidabili

Gli acciai inossidabili sono leghe $Fe - Cr$ o $Fe - Cr - Ni$ caratterizzate da un contenuto minimo di Cr pari al 12% il quale conferisce una notevole resistenza alla corrosione.
La resistenza alla corrosione è legata alla presenza del Cr che permette la formazione di un sottile strato di ossido di cromo che protegge la lega dall'ambiente esterno bloccando il fenomeno della corrosione.
Tale strato di ossido si forma spontaneamente ed istantaneamente con l'esposizione all'atmosfera e si rigenera autonomamente quando viene scalfito, inoltre è ben aderente al materiale sottostante, presenta un bell'aspetto ed è facile da pulire.
Gli acciai inossidabili sono classificati in base alla loro microstruttura e per questo è utile utilizzare il diagramma di Schaeffler (figura 1.8).

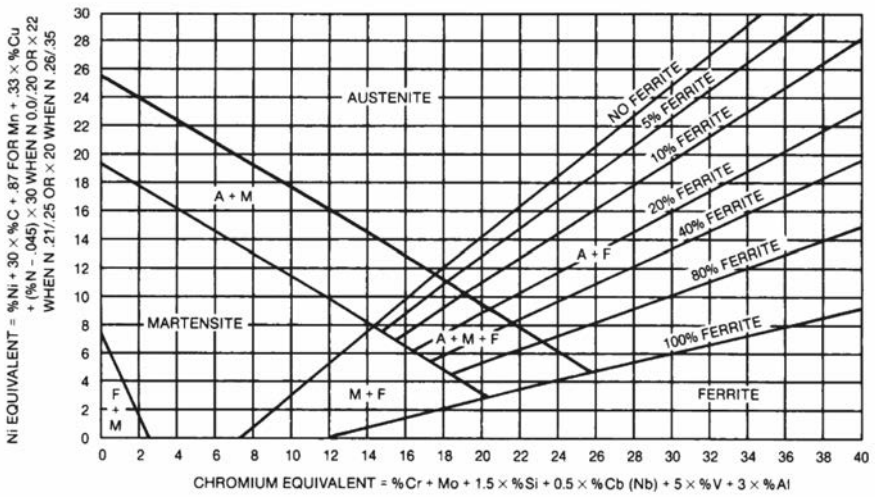


Figura 1.8: Diagramma Schaeffler

Acciai inossidabili austenitici

Gli acciai inossidabili austenitici sono caratterizzati da una struttura CFC che li rende privi di transizione duttile fragile.
Tali acciai sono caratterizzati da un contenuto di Cr pari a circa il 18% ed un tenore di Ni superiore all'8% che promuove una struttura austenitica. Il carbonio varia dallo $0,08\%$ allo $0,03\%$ per la serie low-carbon.
Il capostipite degli acciai austenitici è l'$AISI304$ che secondo la normativa $EN10027$ rappresenta il $X5Cr - Ni18 - 10$.

Acciai inossidabili ferritici

Gli acciai inossidabili ferritici sono caratterizzati da una struttura CCC che li rende sensibili transizione duttile fragile.
Tali acciai sono caratterizzati da un contenuto elevato di Cr che va dal 12% al 30% ed un tenore di Ni molto basso, il che promuove una struttura ferritica.
Il capostipite degli acciai ferritici è l'$AISI430$ che secondo la normativa $EN10027$ rappresenta il $X6Cr17$.

Acciai inossidabili martensitici

Gli acciai inossidabili martensitici sono caratterizzati da una struttura martensitica dopo il trattamento di tempra.
Tali acciai sono caratterizzati da un contenuto di Cr che va dal 12% al 20% ed un tenore di Ni basso $< 2,5\%$.
Il contenuto di carbonio in questi acciai può arrivare all'$1,2\%$ il che li rende temprabili.
Il capostipite degli acciai ferritici è l'$AISI410$ che secondo la normativa $EN10027$ rappresenta il $X12Cr13$.

Acciai duplex

Gli acciai duplex sono caratterizzati da una struttura bifasica austeno-ferritica a temperatura ambiente che garantisce un buon compromesso tra resistenza meccanica e resistenza a corrosione ed inoltre assicura una buona tenacità ed una transizione duttile fragile a temperature molto basse.
Tali acciai sono caratterizzati da un contenuto di Cr compreso tra il 22% e il 25%, un tenore di Ni compreso tra il 4% e il 7% ed aggiunte di Mo e N.
Un esempio di acciaio duplex è il $S22-05$ che secondo la normativa $EN10027$ rappresenta il $X2CrNiMoN22-5-3$.

Acciai induriti per precipitazione

Gli acciai induriti per precipitazione o acciai PH (precipitation hardened) sono acciai caratterizzati dalla presenza di alliganti in lega come Al, Nb, Ta e Ti che, per effetto di trattamenti termici, formano precipitati intermetallici rafforzanti.
Tali acciai possono avere una struttura austenitica, semi-austenitica o martensitica a secoonda delle proprietà desiderate.

Capitolo 2

La saldatura

La saldatura è un processo che permette la giunzione permanente tramite continuità di materiale di due componenti metallici tramite la fusione di parte dei componenti stessi e/o di un metallo di apporto.
L'apporto di calore genera il bagno di saldatura, che solidificando si trasforma nel cordone di saldatura, responsabile del collegamenti dei lembi.

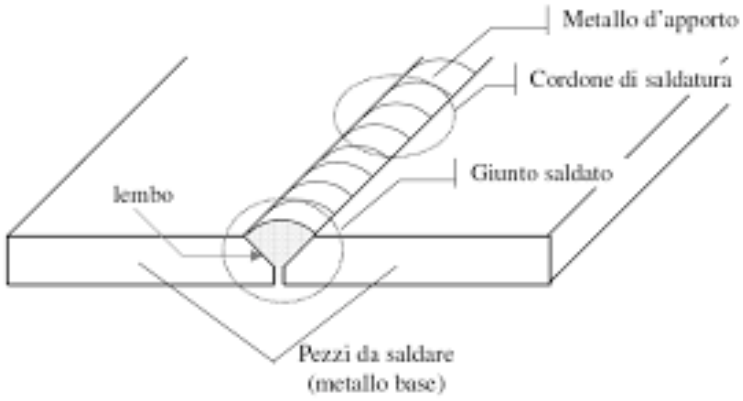


Figura 2.1: Schematizzazione di un giunto saldato

Una saldatura è costituita da:

* metallo base: è il metallo che costituisce i componenti da saldare;
* lembi: superfici affiancate dei componenti da unire;
* bagno di fusione: è la porzione di metallo che viene fuso durante il processo di saldatura;
* cordone di saldatura: è il metallo fuso che solidificando genera il collegamento tra i lembi;
* metallo d'apporto: è il metallo che, sotto forma di bacchette, fili o elettrodi, viene fuso e depositato tra i lembi;
* giunto saldato: è il risultato dell'operazione di saldatura ed è caratterizzato dalla continuità del materiale.

2.1 Saldabilità

La saldabilità può essere definita come l'attitudine con cui un materiale si presta alla realizzazione di unioni saldate di volute proprietà e caratteristiche e la capacità delle unioni saldate di soddisfare il livello di qualità richiesto.
La saldabilità è influenzata in modo significativo dagli elementi in lega, dalle impurezze, dalle inclusioni, dalla microstruttura e dal processo impiegato per ottenere il metallo base ed il metallo d'apporto.
Durante la saldatura si raggiungono elevate temperature, tali da portare il materiale in campo austenitico. E' fondamentale allora che si limiti la formazione di martensite durante il raffreddamento in quanto troppo fragile per le applicazioni richieste.
La formazione di martensite è determinata principalmente dalla composizione chimica del materiale, per questo si utilizza un parametro, detto carbonio equivalente che, tramite il suo controllo, garantisce la saldabilità in sicurezza del metallo.

$$C_{equivalente} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr+\%Mo+\%V}{5} + \frac{\%Ni+\%Cu}{15}$$

Se il carbonio equivalente è minore di $0,4$ l'acciaio viene ritenuto saldabile.
Altri parametri che possono influenzare la saldabilità sono: resistenza, tenacità, duttilità, sensibilità all'intaglio, modulo elastico, calore specifico, temperatura di fusione, coefficiente di dilatazione termica, caratteristiche di tensione superficiale del metallo fuso e corrosione.
Inoltre, la saldabilità di un metallo è fortemente dipendente dal tipo di processo di saldatura impiegato, dato che questo condiziona le temperature sviluppate e la loro distribuzione nella zona di saldatura, oltre ad altri elementi rilevanti per la saldabilità quali gas protettivi, flussi, velocità di saldatura, posizione di saldatura, velocità di raffreddamento, preriscaldo e trattamenti di post-saldatura (come la distensione o la normalizzazione).

Tipo di acciaio	Saldabilità	Considerazioni
Acciai dolci	Ottima	Saldabili con qualsiasi processo
Acciai duri	Bassa	La presenza del carbonio infragilisce la struttura (si tempra la ZTA), problemi di corrosione.
Acciai inox ferritico-martensitici	Bassa	La struttura è fragile per i grossi grani di cromo in matrice martensitica, è necessario un preriscaldamento e anche un trattamento di rinvenimento a saldatura effettuata.
Acciai inox austenitici	Ottima	L'unica cosa a cui prestare attenzione è la pulizia dalle scorie.
Ghise	Pessima	L'alto carbonio le rende fragilissime, la situazione migliora leggermente solo con quelle sferoidali.

Figura 2.2: Saldabilità di acciai e ghise

2.2 Tipologie di giunti saldati

Le tipologie e la geometria del giunto saldato è determinata fondamentalmente dalla richieste geometriche, dalle restrizioni della struttura e dal tipo di carico a cui sarà soggetto.
A seconda del posizionamento reciproco dei componenti da saldare si possono distinguere diverse tipologie di giunti saldati.

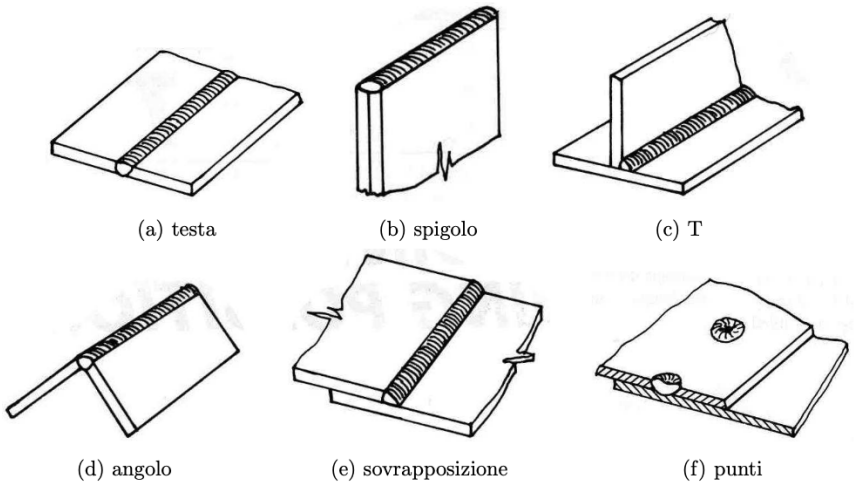


Figura 2.3: Tipologie di giunti saldati

E' possibile inoltre classificare i lembi di saldatura a seconda della loro geometria. Affinché una saldatura interessi l'intero spessore dei componenti da saldare è necessario preparare correttamente i lembi. Per spessori elevati è necessario infatti utilizzare lembi smussati in modo da poter depositare più passate successive.

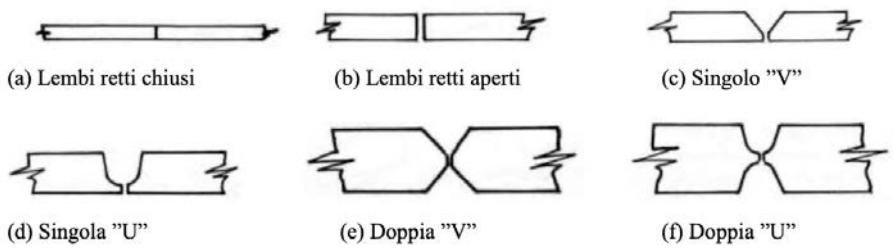


Figura 2.4: Tipologie di lembi per giunti di testa

Anche per il cordone di saldatura si può effettuare una distinzione, esso infatti può essere piano, concavo o convesso.

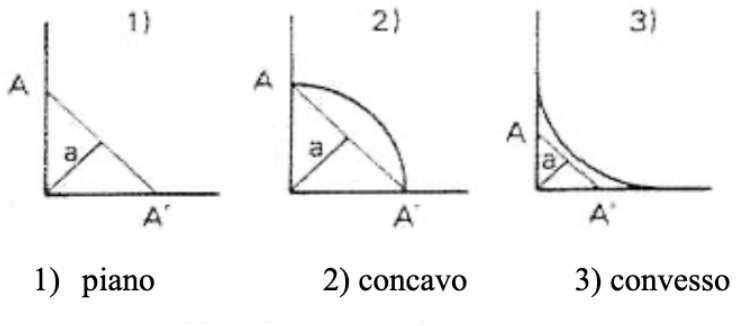


Figura 2.5: Tipologie di forma del cordone di saldatura

Infine, un giunto saldato può occupare, in seno alla costruzione, qualunque posizione. In seguito in figura 2.6 vengono riportate le posizioni più comuni con relativa nomenclatura.

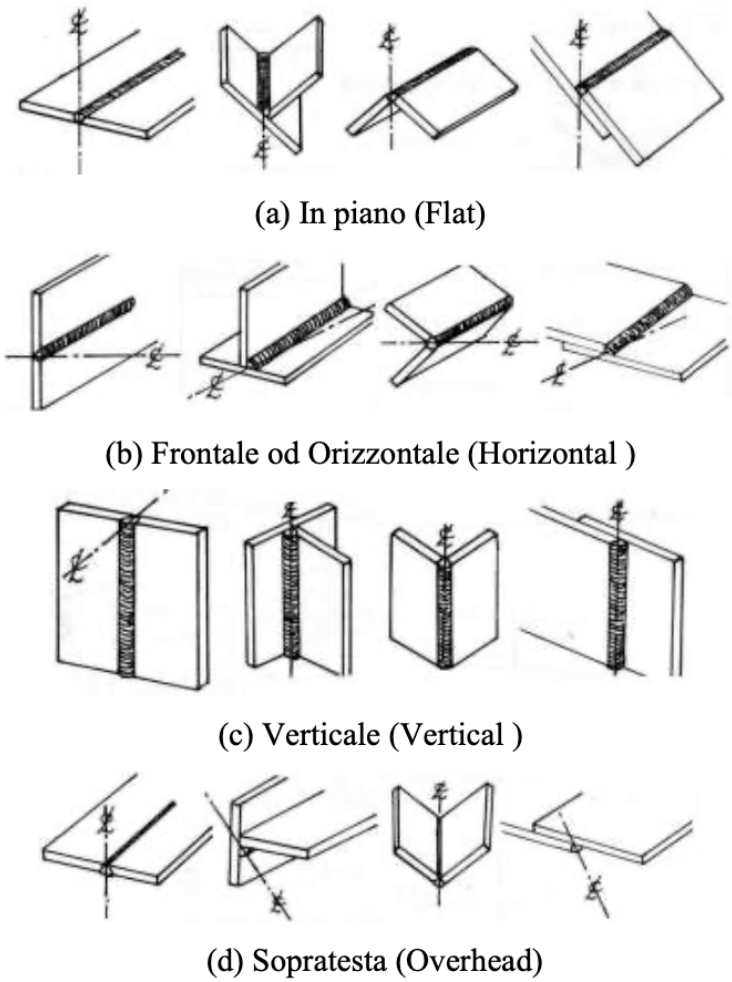


Figura 2.6: Posizioni di saldatura per diverse tipologie di giunti

2.3 Metallurgia della saldatura

L'operazione di saldatura prevede l'impiego di una sorgente termica potente e concentrata per fondere parte del materiale base e l'eventuale metallo d'apporto.
La distribuzione delle temperature in una saldatura permette di individuare tre zone distinte in base alla distanza dall'asse del cordone (figura 2.7).
L'asse è centrato su una porzione fusa e poi ri-solidificata, detta zona fusa (ZF). Allontanandosi ulteriormente e superata la ZF è presente una zona in cui sono avvenute trasformazioni strutturali, chiamata zona termicamente alterata (ZTA), la cui estensione dipende dal metallo base e dalla tecnica di saldatura utilizzata. All'esterno della ZTA si trova materiale base inalterato.

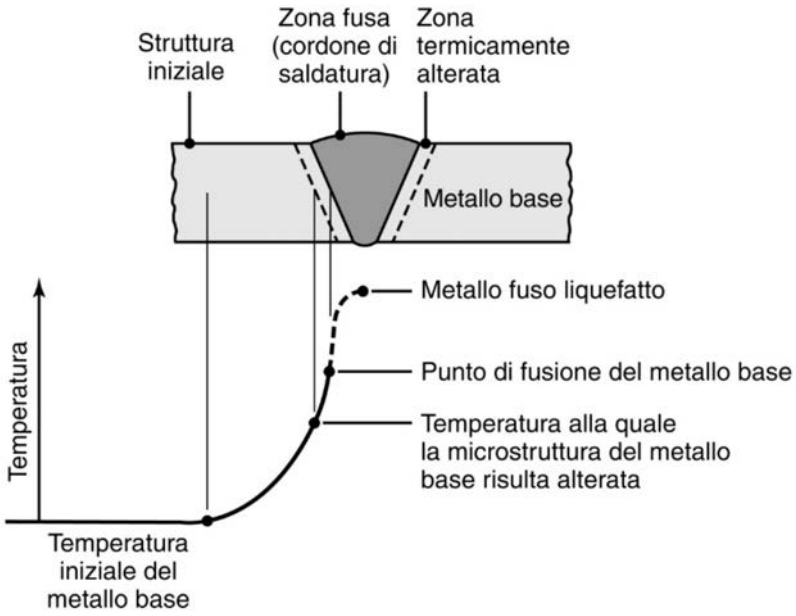


Figura 2.7: Struttura del giunto saldato

* La zona fusa (ZF) è l'insieme dei punti che durante la saldatura hanno superato il punto di fusione.
* La zona termicamente alterata (ZTA) è la parte di materiale base che non ha raggiunto la temperatura di fusione ma che ha subito delle trasformazioni a causa dell'apporto di calore.
* Il metallo base (MB) è la parte di materiale che non ha subito variazioni strutturali dovute all'esposizione al calore.

2.3.1 Zona fusa

Dopo che il calore somministrato dal processo di saldatura ha portato a fusione il metallo base e l'eventuale metallo d'apporto, la zona fusa inizia a raffreddarsi, fino a temperatura ambiente, e forma il cordone di saldatura.

Composizione chimica della zona fusa

La mescolanza del materiale base con quella dell'eventuale materiale d'apporto determina la formazione di una nuova composizione chimica che caratterizzerà la zona fusa.
La composizione chimica di tale zona sarà funzione delle analisi chimiche del materiale base, del materiale d'apporto e del loro contributo quantitativo.
E' possibile definire tale composizione tramite il rapporto di diluizione.

$$R_d = \frac{V_{mb}}{V_{mb}+V_{ma}} * 100$$

Dove:

* V_{mb} è il volume di materiale base portato in fusione
* V_{ma} è il volume di materiale d'apporto portato in fusione

Considerando che tipicamente il materiale d'apporto viene fuso totalmente, il rapporto di diluizione esprime la percentuale volumetrica del materiale base che è stato fuso.
In questo modo è possibile scegliere un materiale d'apporto con una composizione chimica tale per cui la zona fusa risulti priva di difetti o strutture indesiderate.

Struttura della zona fusa

Il processo di solidificazione è simile a quello che avviene nei processi di colata ed inizia con la formazione di grani austenitici a partire dalla superficie di separazione con il metallo base.
La via preferenziale per lo smaltimento del calore è costituita infatti dal materiale solido circostante. I grani austenitici si sviluppano perpendicolarmente alla linea di separazione tra la zona fusa ed il materiale base, allungandosi verso il centro della zona fusa e formando una struttura dendritica colonnare.
In definitiva i grani sono rivolti verso la sorgente termica ed inclinati nella direzione di asportazione del calore.

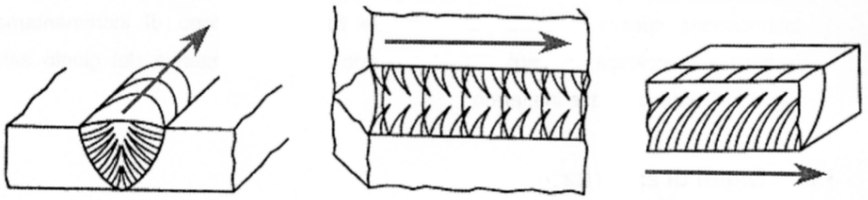


Figura 2.8: Orientamento delle dendriti

Le proprietà meccaniche della zona fusa migliorano, a parità di composizione chimica, all'aumentare dell'affinamento del grano.
Un raffreddamento lento causa la formazione di grani grossolani che sono caratterizzati da una scarsa durezza, resistenza, tenacità e duttilità. Tuttavia le proprietà meccaniche del giunto possono essere migliorate scegliendo un'opportuna composizione chimica del materiale d'apporto o effettuando trattamenti termici successivi.

2.3.2 Zona termicamente alterata

La zona termicamente alterata è situata all'interno del metallo base in prossimità della zona fusa all'incirca nei primi 3 mm, tale zona ha una microstruttura che differisce da quella del metallo base perché durante la saldatura subisce un ciclo termico.
La sua dimensione e struttura sono strettamente collegate alla tipologia di materiale base utilizzato.
Nel caso di acciai non legati o basso legati la zona termicamente alterata può essere divisa in 3 zone con microstruttura differente a seconda della temperatura massima raggiunta.

* La zona surriscaldata (tra i 1500° C ed i 1100° C) in cui il grano è ingrossato.
* La zona ricristallizata o normalizzata (tra i 1100° C e gli 850° C) in cui il grano è stato affinato.
* La zona con austenitizzazione parziale (tra gli 850° C ed i 720° C).

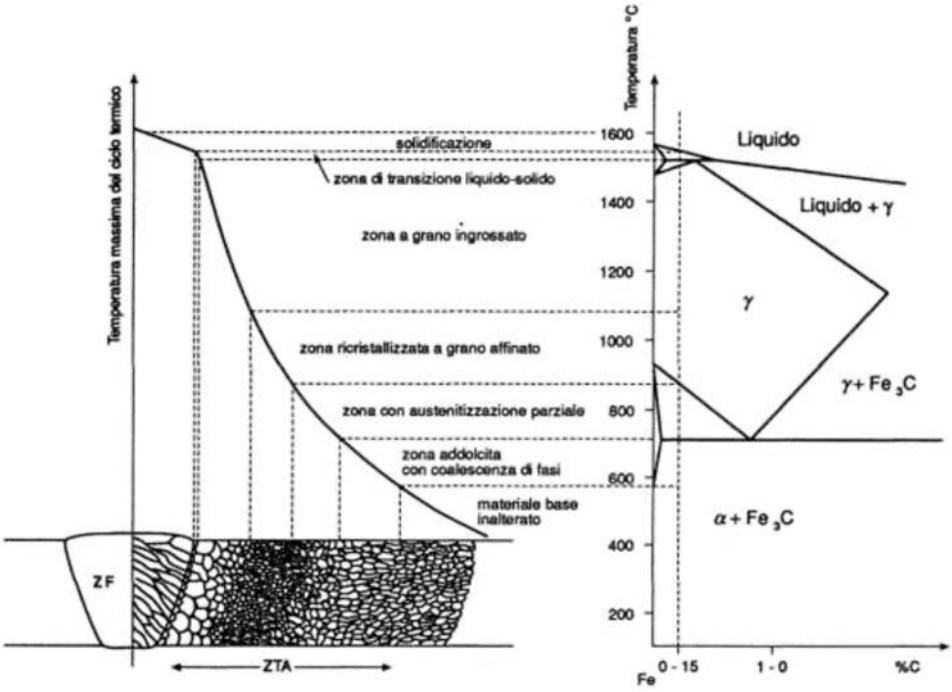


Figura 2.9: Strutture metallurgiche della ZTA

Parametri caratterizzanti della ZTA

Nella zona termicamente alterata le temperature, superando le linee di trasformazione, provocano una variazione della struttura micrografica. Inoltre l'apporto di calore genera un forte accrescimento della grana cristallina che comporta una riduzione delle proprietà meccaniche.
La situazione finale dipende:

* dal ciclo termico di saldatura che ogni punto subisce;
* dalla composizione chimica del materiale base e d'apporto;
* dalla struttura originaria del materiale base.

I parametri che determinano maggiormente la struttura della zona termicamente alterata sono:

* Velocità di riscaldamento: un'elevata velocità di riscaldamento comporta un minore ingrossamento del grano cristallino ed una distribuzione non omogenea del carbonio nella fase austenitica che aumenta la possibilità di trovare zone ad elevata durezza.
* Massima temperatura e tempo di mantenimento: all'aumentare delle temperature e dell'esposizione si assiste ad un ingrossamento della grana cristallina.
* Velocità di raffreddamento: un raffreddamento rapido può generare martensite aciculare che è dura e poco tenace.

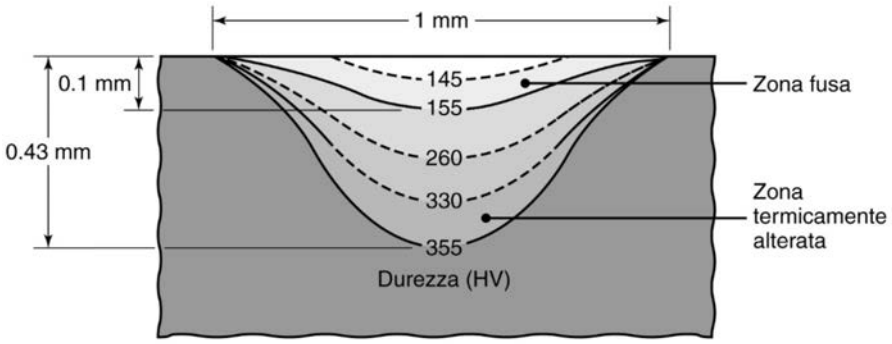


Figura 2.10: Zone ad elevata durezza

I cicli termici

La fusione del materiale viene realizzata con l'impiego di una sorgente che opera il riscaldamento in una zona molto localizzata intorno al giunto e che trasla lungo esso.
A causa di tale riscaldamento il materiale della ZF e della ZTA subisce dei cicli termici che influenzano le strutture che si andranno a creare. La severità di tali cicli e l'estensione del materiale interessato variano a seconda del materiale da saldare e del procedimento di saldatura utilizzato. Inoltre la temperatura massima che si raggiunge dipende dalla distanza dal cordone di saldatura, al crescere della distanza la temperatura massima raggiungibile diminuisce ed aumenta anche il tempo necessario per raggiungerla.

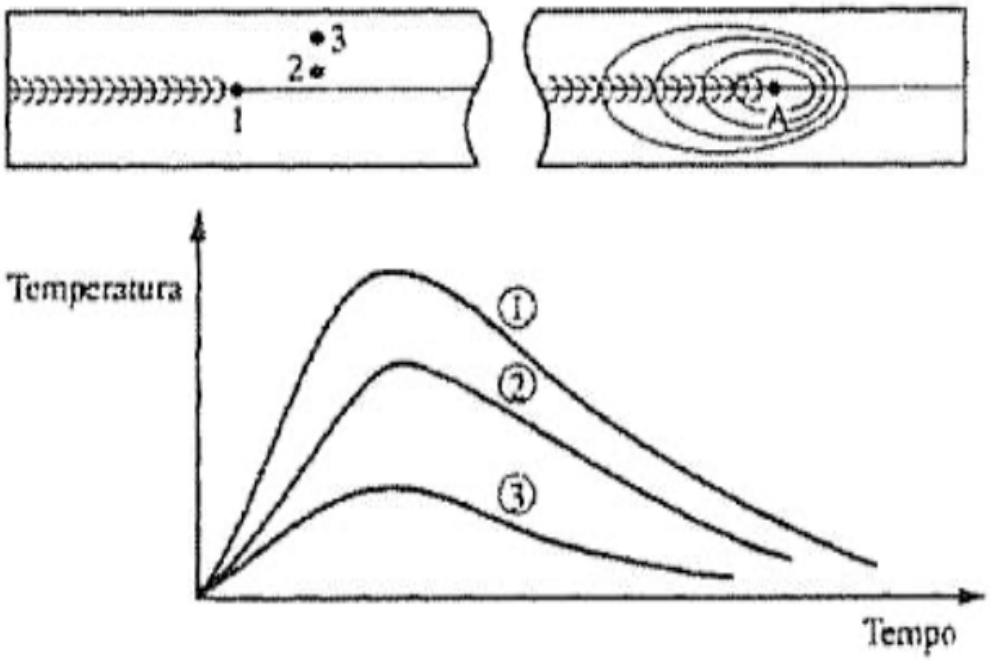


Figura 2.11: Ciclo termico di saldatura

La temperatura massima raggiunta e la velocità di raffreddamento sono parametri molto importanti in relazione alle trasformazioni metallurgiche. In particolare la velocità di raffreddamento, individuata dalla parte destra del ramo della curva in figura 2.11, determina la severità termica del ciclo che risulta essere tanto più severo quanto più rapido è il raffreddamento.

I fattori che influenzano la severità del ciclo termico sono:

* L'apporto di calore specifico, ossia l'energia fornita dalla sorgente per unità di lunghezza.

$$Q = \frac{I*V*60}{V_{sal}} * \eta$$

dove:

- Q è il calore specifico apportato $[J/cm]$;
- I è la corrente fornita dalla sorgente elettrica $[A]$;
- V è la tensione fornita dalla sorgente elettrica $[V]$;
- V_{sal} è la velocità di saldatura $[cm/min]$;
- η è l'efficienza di trasmissione termica.

Maggiore è l'apporto termico specifico e maggiore sarà la quantità di calore che il giunto dovrà smaltire, quindi il raffreddamento sarà più lento ed il ciclo termico risulterà meno severo. Però un raffreddamento più lento e temperature più alte favoriranno l'accrescimento del grano cristallino.

* Lo spessore dei componenti e la forma del giunto. Il calore infatti viene smaltito principalmente per conduzione attraverso il materiale base e la parte ceduta per convezione all'aria può essere trascurata.
Quindi, a parità di calore specifico apportato, il ciclo termico risulterà tanto più severo quanto maggiore sarà lo spessore dei componenti.
Inoltre il ciclo termico risulterà più severo nei giunti con una vasta superficie di scarico nell'intorno del bagno di fusione.

* L'eventuale preriscaldo dei lembi che in alcuni casi viene effettuato per diminuire la velocità di raffreddamento.

* La conducibilità termica del materiale di base. Passando dagli acciai al carbonio agli acciai molto legati il regime termico varia notevolmente, infatti all'aumentare degli elementi in lega la conducibilità termica diminuisce e di conseguenza anche la severità del raffreddamento.

In sintesi, la velocità di raffreddamento deve essere ottimizzata in quanto una velocità troppo elevata provoca fenomeni di tempra mentre una velocità troppo bassa provoca l'ingrossamento del grano.

2.3.3 I difetti di saldatura

A seguito dei cicli termici di saldatura e delle concomitanti trasformazioni microstrutturali, un giunto saldato può sviluppare dei difetti.
Secondo $UNI\ EN\ ISO\ 6520-1$ si definisce imperfezione qualsiasi deviazione dalla saldatura ideale e difetto un'imperfezione non accettabile.
I difetti di saldatura possono anche essere dovuti ad un'applicazione inadeguata o negligente di tecniche di salatura consolidate o ad un insufficiente addestramento dell'operatore.

Porosità

La porosità nelle saldature può essere causata da:

* gas intrappolati che sono rilasciati durante la fusione e vengono intrappolati durante la solidificazione;
* reazioni chimiche che avvengono durante la saldatura;
* contaminanti presenti nel bagno di fusione.

La maggior parte dei giunti saldati contengono porosità che, in genere, hanno una forma sferoidale o a cavità allungata.
La distribuzione delle porosità nella zona saldata può essere casuale o concentrata in una certa area.
La presenza di idrogeno è determinante per la formazione di porosità, l'idrogeno infatti può causare cavità nelle leghe di alluminio o l'infragilimento da idrogeno negli acciai.
Per limitare le porosità delle saldature è consigliabile: preriscaldare la zona di saldatura, diminuire la velocità di riscaldamento, pulire adeguatamente i lembi da saldare ed abbassare la velocità di saldatura.
In questo modo i gas hanno il tempo di fuoriuscire dal bagno di fusione.

Inclusioni di scoria

Le inclusioni di scoria sono costituite da vari materiali, quali ossidi e rivestimenti di elettrodi, che rimangono intrappolati nel cordone di saldatura. Se la protezione gassosa non è sufficiente, possono contribuire alla formazione di inclusioni anche i contaminanti che provengono dall'ambiente circostante.
In condizioni ideali la scoria fusa deve emergere sulla superficie del bagno fuso, senza rimanere intrappolata nel cordone.
Al fine di limitare tali inclusioni è consigliato utilizzare un gas protettivo adeguato e pulire correttamente la superficie del cordone di saldatura se si eseguono più passate.

Fusione incompleta e penetrazione incompleta

La fusione incompleta produce cordoni di saldatura di scarsa qualità come si può vedere in figura 2.12.

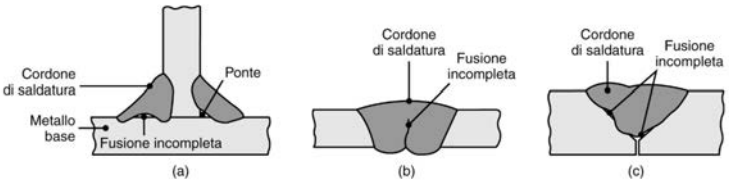


Figura 2.12: Fusione incompleta e penetrazione incompleta

Tali difetti possono essere dovuti alla presenza di ossidi o scoria nel giunto. Per limitare questo problema è possibile effettuare un preriscaldo del metallo base, effettuare una pulizia delle superfici o utilizzare un gas protettivo adeguato.
La penetrazione incompleta avviene quando la profondità di saldatura non è sufficiente, per evitare ciò è possibile preriscaldare il metallo base o abbassare la velocità di saldatura.

Difetti esterni o di profilo

Il profilo della saldatura ricopre un ruolo importante non solo per i suoi effetti sulla resistenza meccanica e l'aspetto esteriore della saldatura, ma anche perché può rilevare la presenza di fusione incompleta o di inclusioni di scoria.
Alcuni difetti tipici del profilo della saldatura sono:

* Il riempimento incompleto del giunto, che si verifica quando il giunto non è riempito con sufficiente materiale o quando si verifica una penetrazione eccessiva.

* Le incisioni marginali, che si verificano a causa di una fusione eccessiva del metallo base e generano un avvallamento. Tali avvallamenti, se sono profondi, si comportano come intagli provocando la concentrazione di tensioni e riducendo la resistenza a fatica del giunto.

* La sovrapposizione, che è un difetto superficiale dovuto al fatto che il cordone si sovrappone in modo eccessivo al componente da saldare

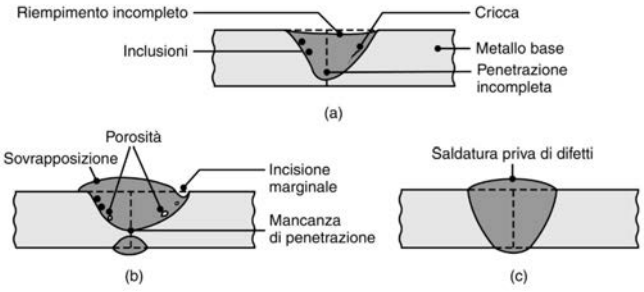


Figura 2.13: Difetti esterni o di profilo

Cricche

Le cricche, discontinuità originatesi per distacco in un materiale metallico originariamente sano e continuo, possono svilupparsi in varie posizioni e direzioni nella zona di saldatura. Possono presentarsi sia nella zona fusa, sia nella zona termicamente alterata.
Le cricche, come si vede in figura 2.14, possono essere di diversi tipi: longitudinali, trasversali, a cratere, sottocordone, frontali alla base.

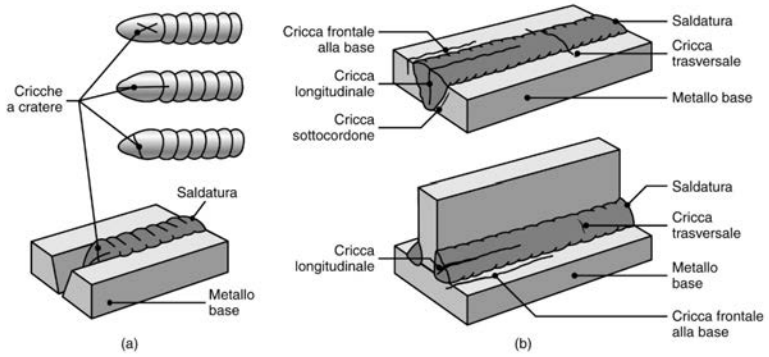


Figura 2.14: Vari tipi di cricche nei giunti saldati

Le cricche generalmente si formano per una combinazione dei seguenti fattori:

* Gradienti di temperatura che generano tensioni termiche nella zona di saldatura.

* Variazione nella composizione della zona di saldatura che causano contrazioni differenti.

* Infragilimento ai bordi dei grani per segregazione.

* Infragilimento da idrogeno.

* Impossibilità di contrazione del giunto saldato durante il raffreddamento.

Le cricche si classificano in:

* Cricche a caldo, che si sviluppano mentre il giunto è ancora ad elevate temperature. Quando la zona del cordone è ancora in fase liquida non c'è possibilità per la massa fusa di trasmettere tensioni, tuttavia, con l'inizio della solidificazione, i primi grani riescono a formare dei collegamenti intergrano per l'intera larghezza del cordone. Tali ponti sono soggetti a sforzi elevatissimi poiché la sezione resistente è molto piccola e se viene superato limite di rottura si ha la generazione di tali cricche.

* Cricche a freddo, che si sviluppano dopo che il cordone di saldatura si è raffreddato. Tali cricche sono principalmente dovute ad un alto tenore di idrogeno, una elevata durezza e fragilità ed a tensioni interne di autovincolo.

Per limitare l'insorgenza di cricche è possibile effettuare un preriscaldo dei componenti, evitare un raffreddamento troppo veloce dopo la saldatura e riprogettare il giunto al fine di minimizzare le tensioni generate durante il ritiro.

Strappi lamellari

Gli strappi lamellari sono assimilabili a cricche e sono tipici di giunti molto vincolati la cui forma è tale da limitare il ritiro durante il raffreddamento.
Questi difetti sono dovuti alla fibrosità del materiale, che deriva dall'allineamento di impurezze, inclusioni o vuoti all'interno del materiale durante la deformazione plastica di formatura. I pezzi, in particolare se ottenuti per laminazione, risultano essere meno resistenti nella direzione dello spessore che nelle altre direzioni.
Questi strappi possono essere evitati lasciando libero il ritiro dei componenti o aumentando la penetrazione della saldatura nel giunto.

Irregolarità superficiali

In una saldatura, parte del metallo fuso può formare spruzzi o gocce che danno luogo ad un cordone irregolare o si depositano sulle superfici adiacenti al cordone di saldatura.
Un'altra irregolarità superficiale, tipica della saldatura ad arco, sono i colpi d'arco. L'elettrodo può inavvertitamente toccare i componenti in punti al di fuori della zona di saldatura producendo fusioni localizzate del materiale.
Infine è possibili che si verifichi un disallineamento dei lembi, tale difetto è dovuto ad un imperfetto assemblaggio del giunto che ostacola la possibilità di eseguire una saldatura regolare.
Tutti questi difetti non sono solo sgradevoli del punto di vista estetico, ma possono anche compromettere la resistenza del giunto saldato perché possono generare intagli dannosi per la vita a fatica o punti di innesco per attacchi corrosivi.
Per limitare i punti di innesco di cricche può essere utile eseguire una scordonatura del cordone di saldatura.

2.4 Distorsioni e tensioni residue

I gradienti termici localizzati della saldatura determinano dilatazioni e contrazioni nella zona di saldatura che inducono tensioni residue nel pezzo.
Le tensioni residue possono avere effetti dannosi quali:

* distorsione e svergolamento dei pezzi saldati;
* fratture per tensocorrosione;
* ulteriore distorsione nel caso in cui successivamente una parte della struttura venga rimossa;
* riduzione della vita a fatica.

In generale le tensioni residue nelle saldature si distribuiscono come rappresentato in figura 2.15. Quando due piastre vengono saldate, solamente una regione stretta ed allungata è soggetta ad alte temperature, mentre il resto del materiale rimane a temperatura ambiente.
Il calore viene dissipato lateralmente dalla zona di saldatura verso le piastre che iniziano quindi ad espandersi, mentre la zona di saldatura, solidificando, inizia a contrarsi.
Questi due effetti opposti generano tensioni residue.

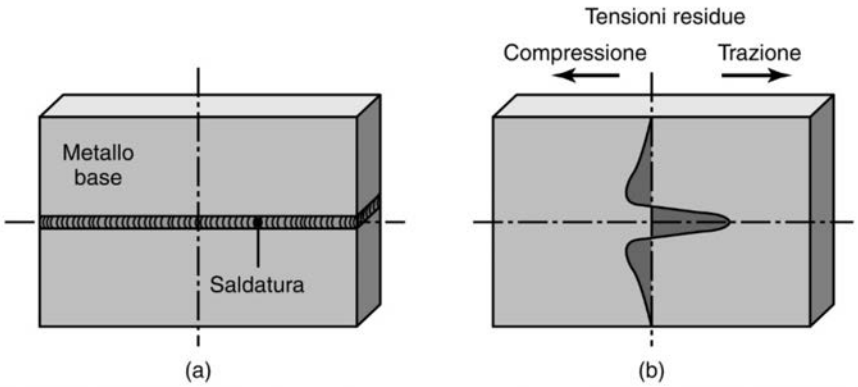


Figura 2.15: Tensioni residue

L'intensità delle tensioni residue di compressione diminuisce progressivamente fino ad annullarsi lontano dalla zona di saldatura; inoltre, in mancanza di forze esterne applicate, le tensioni di compressione e trazione si devono bilanciare reciprocamente. Quando le piastre sono vincolate ad una struttura più ampia, queste non possono dilatarsi o contrarsi liberamente e ciò genera una distorsione del giunto.

2.4.1 Tensioni residue

Le principali tensioni, che si hanno nel materiale o nella struttura, sono di origine termica e dipendono dal gradiente di temperatura.
Esse sono di tre tipi:

* Tensioni indotte da variazioni volumetriche, come l'espansione o la compressione, associati a cambiamenti di fase nel materiale;
* Tensioni dovute a differenti coefficienti di dilatazione termica dei materiali da saldare;
* Tensioni indotte dai gradienti di temperatura, dovuti alle differenti velocità di espansione nel riscaldamento e compressione nel raffreddamento.

La direzione in cui si manifestano queste tensioni è data dal ritiro impedito, mentre la loro intensità dipende dall'entità con cui detto ritiro viene contrastato, cioè dal grado di vincolo in quella direzione.
Le tensioni trasversali agiscono in direzione perpendicolare all'asse di saldatura. Queste tensioni, lungo una generica sezione trasversale, sono sempre dello stesso segno. Esse, invece, lungo una generica sezione longitudinale sono di trazione nella parte centrale e di compressione nelle parti estreme.
Per quanto riguarda i valori che le tensioni trasversali possono raggiungere, occorre notare che il ritiro trasversale, pur essendo soggetto a condizioni di autovincolo, riesce sempre a manifestarsi con una certa entità. In relazione a ciò le tensioni trasversali non raggiungono valori molto elevati.

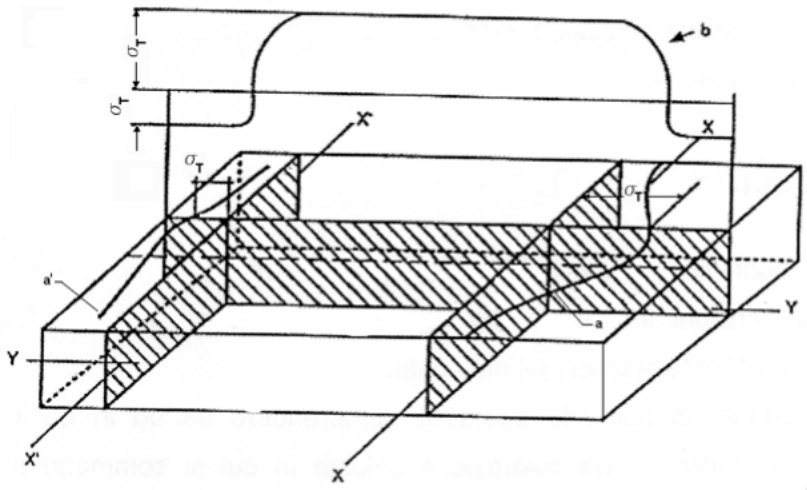


Figura 2.16: Andamento delle tensioni trasversali

Le tensioni longitudinali agiscono in direzione parallela all'asse del giunto. L'andamento delle tensioni interne longitudinali mostra che queste tensioni sono di trazione nel giunto e nella zona adiacente mentre risultano di compressione nelle zone lontane.
La distribuzione delle tensioni longitudinali è la stessa per tutte le sezioni trasversali, si manifestano costanti ad una data distanza dall'asse del cordone di saldatura ed il valore dipende da tale distanza. Le tensioni longitudinali, a causa delle severe condizioni di autovincolo in cui opera la saldatura in questa direzione, raggiungono valori molto alti.

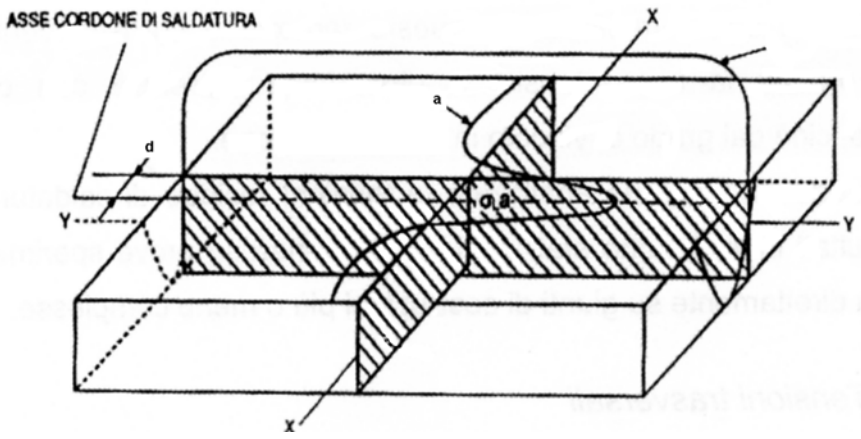


Figura 2.17: Andamento delle tensioni longitudinali

Data l'entità di tali tensioni diventa importante vederne l'influenza quando si sommano alle tensioni dovute a carichi esterni.
Le zone che sono maggiormente sollecitate dalle tensioni dovute al ritiro tenderanno a superare localmente il limite di snervamento, in tali condizioni si possono avere due conseguenze che dipendono dal comportamento del materiale:

* se il materiale è sufficientemente duttile, si hanno delle deformazioni permanenti microscopiche localizzate nei punti a massima sollecitazione, con il conseguente allargamento della zona deformata e la conseguente diminuzione dello stato di tensione finale della zona sollecitata;

* se il materiale ha un comportamento di tipo fragile, esso non può deformarsi plasticamente e quindi la tensione di snervamento e quella di rottura tendono a coincidere, quindi, l'aggiunta di un carico esterno può comportare la rottura del giunto.

Anche per questo motivo è preferibile saldare solamente materiali con un comportamento duttile.
Infine tali tensioni possono compromettere il funzionamento di componenti messi in esercizio a basse temperature in quanto il materiale diventa più fragile e ciò può causare cedimento per rottura fragile.

2.4.2 Ritiri e distorsioni

L' immediata conseguenza dei cicli termici, e delle tensioni che essi comportano, a cui è soggetta la zona adiacente al cordone di saldatura è la presenza di deformazioni permanenti.
Ciò è dovuto:

* alla tendenza del metallo a dilatarsi tanto più quanto maggiore è la temperatura raggiunta;
* alla sorgente termica che è concentrata ed in movimento e ciò comporta una distribuzione di temperatura non omogenea;
* all'aumentare della temperatura diminuisce la tensione di snervamento quindi è sufficiente uno sforzo minore per per ottenere una deformazione permanente.

In figura 2.18 è mostrato un esempio di distorsione. La struttura inizialmente è rigida e priva di tensioni interne. Quando viene saldata, il metallo fuso riempie lo spazio tra i due lembi da saldare e successivamente inizia a solidificare. Dopo la solidificazione, il cordone ed il materiale circostante si raffreddano progressivamente fino ad arrivare a temperatura ambiente e, raffreddandosi, si contraggono.
La contrazione però non è libera, ma è vincolata dal resto della struttura, si generano quindi tensioni interne e la struttura si distorce.

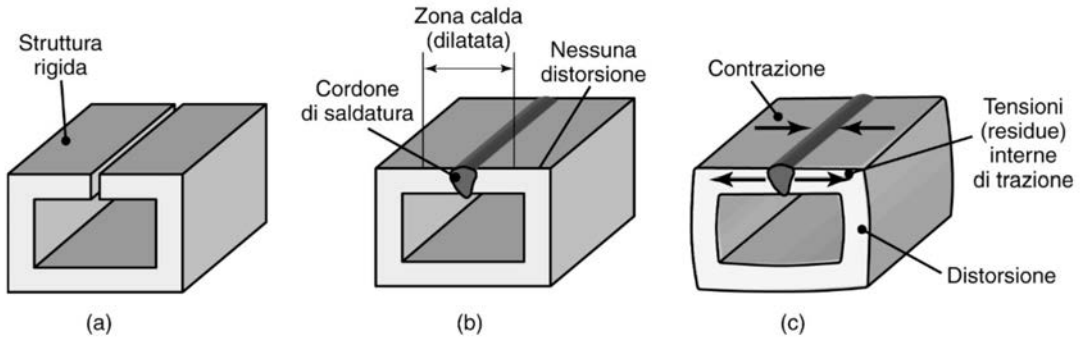


Figura 2.18: Sequenza di distorsione di una struttura saldata

Per comprendere l'origine del ritiro trasversale si può analizzare un giunto nel corso della sua esecuzione (fig. 2.19). Nei pressi della sorgente si genera un campo termico descritto da isoterme ellittiche. L'isoterma a 600° C individua la zona più soggetta al decadimento della tensione di snervamento e di conseguenza alle deformazioni termiche.

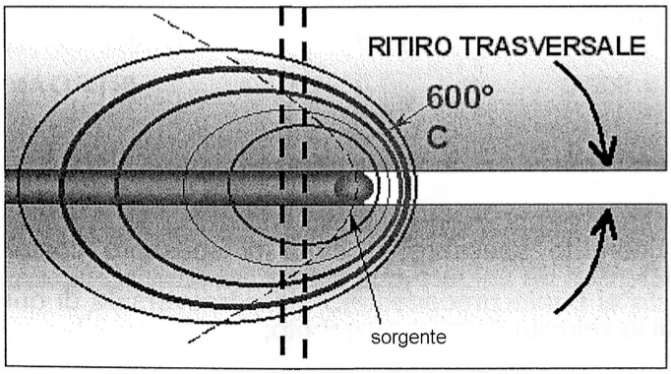


Figura 2.19: Campo di temperatura attorno alla sorgente di saldatura

Per capire cosa accede è necessario considerare una striscia sottile (zona tratteggiata) di materiale, essa subisce un riscaldamento nella zona centrale per cui tende a dilatarsi, tuttavia questa dilatazione risulta impedita dalla striscia contigua precedentemente saldata che è già a temperatura più bassa. La zona della striscia considerata compresa entro l'isoterma a 600° C subisce pertanto una notevole deformazione a caldo e per questo, nel successivo raffreddamento, essa risulta più corta di quello che sarebbe stato se fosse stata libera, sviluppando così una azione di ritiro che tende ad avvicinare i lembi.
Il ritiro angolare si riscontra principalmente nei giunti di testa e nei giunti a T.
Nei giunti di testa tale fenomeno si verifica quando i lembi vengono preparati con una forma a V. Per quanto detto in precedenza il ritiro trasversale aumenta dal basso verso l'alto in quanto aumenta la lunghezza della zona che si ritira e questo determina una certa deformazione angolare. Una preparazioni dei lembi ad X ridurrebbe il ritiro angolare per ragioni di simmetria.
L'analogo ragionamento vale per i giunti a T, il progressivo aumento del ritiro trasversale genera una deformazione risultante che tende a chiudere il giunto.

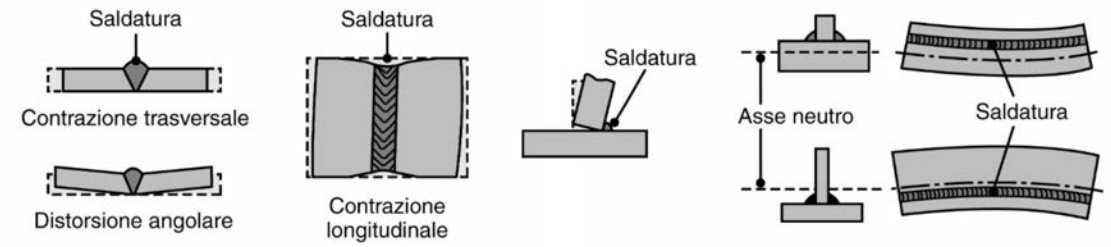


Figura 2.20: Schema del ritiro per diversi giunti

2.4.3 Riduzione delle tensioni residue

Gli effetti delle tensioni residue possono essere ridotti eseguendo un preriscaldo dei componenti da saldare.
Un preriscaldo infatti riduce la velocità di raffreddamento e l'entità dei gradienti termici, e di conseguenza delle tensioni, che si generano.
In questo modo si riduce il ritiro, la probabilità di generare cricche e si favorisce la saldabilità degli acciai temprabili per i quali un raffreddamento rapido causerebbe una struttura martensitica.
I componenti da saldare possono essere riscaldati in un forno con dispositivi elettrici o a induzione, oppure, nel caso di sezioni sottili, possono essere riscaldati con lampade radianti o getti d'aria calda.
Per ottimizzare la tenacità e la resistenza della struttura saldata, le temperature di preriscaldo e le velocità di raffreddamento devono essere regolate opportunamente.
Le tensioni residue possono poi essere ridotte con una ricottura di rilassamento. La temperatura ed il tempo necessari per il trattamento di distensione dipendono dal tipo di materiale e dall'intensità delle tensioni residue sviluppate.
Esistono anche metodi meccanici per ridurre le tensioni residue nei giunti saldati, come ad esempio pallinatura, martellatura e rullatura. Questi trattamenti inducono uno stato di compressione residua nella saldatura.
Oltre ai trattamenti per ridurre le tensioni residue, le strutture saldate possono essere sottoposte ad altri trattamenti termici al fine di migliorare le proprietà meccaniche del giunto.
In particolare alcuni trattamenti utilizzati per questa ragione sono:

* ricottura, normalizzazione o bonifica per parti saldate in acciaio;
* trattamento di solubilizzazione ed invecchiamento per leghe che possono essere trattate con indurimento per precipitazione.

2.5 Saldatura ad arco elettrico

I processi di saldatura vengono classificati e designati sulla base della normativa $UNI\ EN\ ISO\ 4063 : 2011$. La saldatura è ad oggi una professione specialistica. Le normative europee impongono che i saldatori siano in possesso di un patentino, rilasciato da uno degli enti certificatori autorizzati, secondo le normative $UNI\ EN\ ISO\ 9606 - X$ e $UNI\ EN\ ISO\ 15614 - X$. Tali normative definiscono le prove di qualificazione della procedura di saldatura, le condizioni di esecuzione ed i limiti di validità di una procedura di saldatura qualificata. Qualificare un processo di saldatura significa validare tramite prove di laboratorio, non distruttive e distruttive, che una saldatura eseguita con certi parametri, materiali d'apporto e modalità risponde a tutti i requisiti di qualità elencati nelle normative.
La saldatura ad arco elettrico, sviluppata a metà del XIX secolo, utilizza come sorgente termica un arco elettrico che, scoccando tra l'elettrodo ed il metallo base, genera il calore necessario per produrre la fusione sia dell'elettrodo che del metallo base.
I processi di saldatura per fusione che utilizzano un arco elettrico come fonte di calore sono chiamati AW (Arc Welding).
Le caratteristiche comuni di queste tecniche sono:

* il calore, fornito dall'arco voltaico che scocca tra l'elettrodo ed i lembi da saldare;
* il metallo d'apporto, costituito da una bacchetta o da un filo metallico;
* la protezione del bagno di fusione, realizzata da una sostanza o da un gas che impedisce il contatto tra l'aria ed il bagno fuso.

Il calore immesso nella saldatura ad arco può essere calcolato come:

$$\frac{H}{l} = e * \frac{V*I}{v}$$

dove:

* H è il calore emesso $[J]$;
* l è lunghezza di saldatura $[mm]$;
* V è la tensione elettrica applicata $[V]$;
* I è la corrente elettrica applicata $[A]$;
* v è velocità di saldatura $[mm/s]$;
* e è l'efficienza del processo che può variare da 75% per la saldatura con elettrodo metallico rivestito a 90% per la saldatura con elettrodo fusibile in gas protettivo e la saldatura ad arco sommerso.

2.5.1 Saldatura ad arco con elettrodo metallico rivestito

La saldatura ad arco con elettrodo metallico rivestito (shielded metal arc welding, SMAW) è uno dei primi processi di saldatura sviluppati.
Grazie alla sua semplicità e flessibilità, metà delle saldature è eseguita con tale processo. L'arco elettrico viene generato toccando il componente da saldare con la punta dell'elettrodo rivestito, la quale viene poi allontanata ad una distanza tale da mantenere l'arco.
Gli elettrodi sono costituiti da lunghe e sottili bacchette rivestite. Il calore generato fonde una porzione della punta dell'elettrodo, il suo rivestimento ed il metallo base nella vicinanza dell'arco che solidificando genera il cordone di saldatura.
Il rivestimento dell'elettrodo fondendo genera una protezione gassosa attorno alla zona fusa, proteggendola dall'ossigeno dell'aria.
L'estremità non rivestita dell'elettrodo viene serrata nella pinza porta elettrodo del generatore di corrente, mentre la presa di massa viene collegata al giunto da saldare.
Tale processo è caratterizzato da correnti che possono variare tra 50 e 300 A, con potenze inferiori a 10 kW. Una corrente troppo debole produce fusione incompleta, mentre una corrente troppo intensa può danneggiare il rivestimento dell'elettrodo riducendone l'efficacia.
La corrente può essere continua o alternata ma per la saldatura di lamiere si preferisce una corrente continua in quanto genera un arco più stabile.
La polarità della corrente continua può essere importante.
Nella polarità diretta il componente è collegato al polo positivo mentre l'elettrodo al negativo, tale soluzione è indicata per la saldatura di lamiere che richiede una debole penetrazione.
Nella polarità inversa invece l'elettrodo è collegato al polo positivo ed il componete al negativo, in questo modo è possibile ottenere maggiori profondità di penetrazione.
La saldatura ad arco elettrico con elettrodo metallico rivestito è un processo indicato soprattutto per spessori da saldare compresi tra 3 e 20 mm.
Dopo la saldatura, la scoria deve essere rimossa dal cordone perché potrebbe favorire la corrosione del cordone.

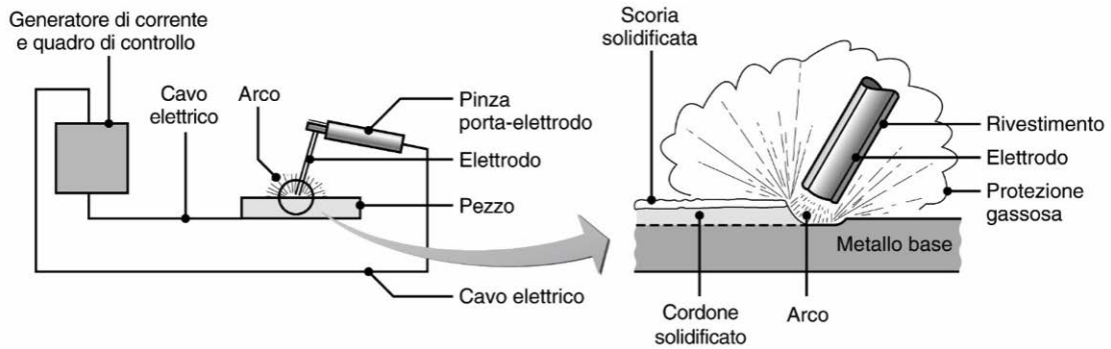


Figura 2.21: Saldatura ad arco con elettrodo metallico rivestito

2.5.2 Saldatura ad arco sommerso

Nella saldatura ad arco sommerso (submerged arc welding, SAW), l'arco elettrico viene protetto da un flusso granulare, costituito da silicati, ossidi e ferroleghe, che viene convogliato per gravità da un tubo nella zona di saldatura.
Il flusso granulare ha la funzione di coprire totalmente il metallo fuso al fine di prevenire la formazione di spruzzi e scintille e sopprimere l'emissione di raggi ultravioletti e fumi. Inoltre il flusso agisce anche da isolante termico, favorendo una profonda penetrazione del calore nel giunto da saldare.
Il materiale che non viene fuso viene recuperato attraverso un tubo di recupero, trattato e riutilizzato.
L'elettro fusibile è costituito da una bobina di filo non rivestito di diametro compreso tra $1,5$ e $10\ mm$, che viene fatto avanzare attraverso una torcia.
Tale processo è caratterizzato da correnti che possono variare tra 300 e 2000 A ed il generatore è connesso ad una rete trifase con tensione fino a 440 V.
A causa della natura del flusso granulare, che viene depositato per gravità, tale processo può essere impiegato solo per superfici orizzontali o per configurazioni che possano sostenere il flusso stesso.
Tale processo può essere anche automatizzato, permettendo di saldare piastre e lamiere di acciai al carbonio e legati, con velocità fino a $5\ m/min$.
Le applicazioni tipiche della saldatura ad arco sommerso sono la saldatura di lamiere spesse e la fabbricazione di recipienti in pressione, in quanto la qualità delle saldature è molto buona in termini di tenacità, duttilità, omogeneità e produttività.

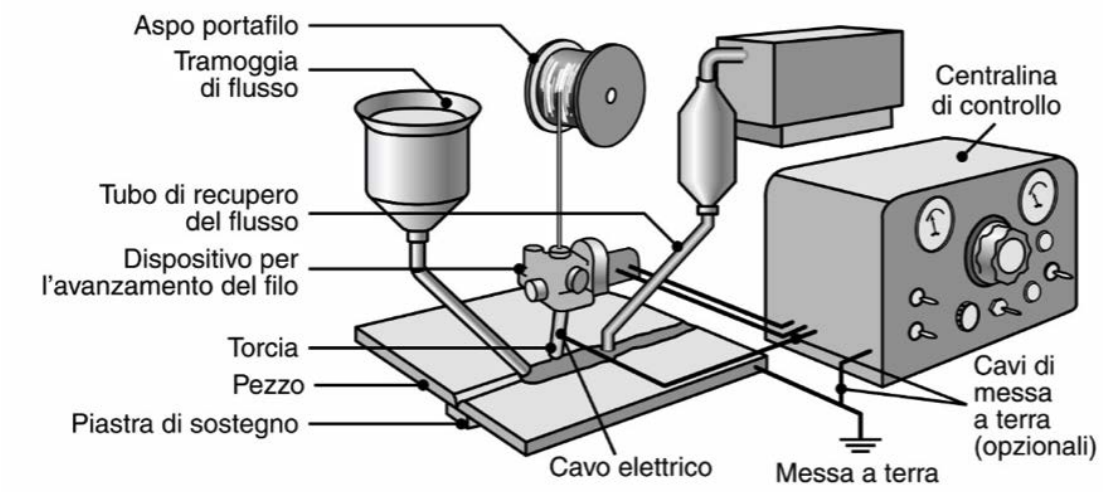


Figura 2.22: Saldatura ad arco sommerso

2.5.3 Saldatura con elettrodo fusibile in gas protettivo

Nella saldatura con elettrodo fusibile in gas protettivo (gas metal arc welding, GMAW) la zona fusa è protetta da un gas, come argon, elio, anidride carbonica o altre miscele, che fluisce dalla torcia di saldatura. Nell'elettrodo inoltre sono presenti elementi disossidanti che prevengono la formazione di ossidi nel bagno di fusione.
Il filo metallico viene alimentato automaticamente in modo continuo nella zona di saldatura attraverso un ugello.
Tale processo può essere utilizzato per saldare svariati metalli e leghe ferrose e non ferrose. Il processo è rapido, versatile ed economico, inoltre la sua produttività è doppia rispetto al processo di saldatura ad arco con elettrodo metallico rivestito e si presta facilmente all'automatizzazione.
I processi di saldatura con elettrodo fusibile in gas protettivo sono anche detti MIG o MAG, a seconda del gas protettivo che utilizzano:

* MIG (Metal Inert Gas) è un processo che utilizza gas inerti come argon ed elio;

* MAG (Metal Active Gas) è un processo che utilizza gas attivi, ossia disossidanti come l'anidride carbonica.

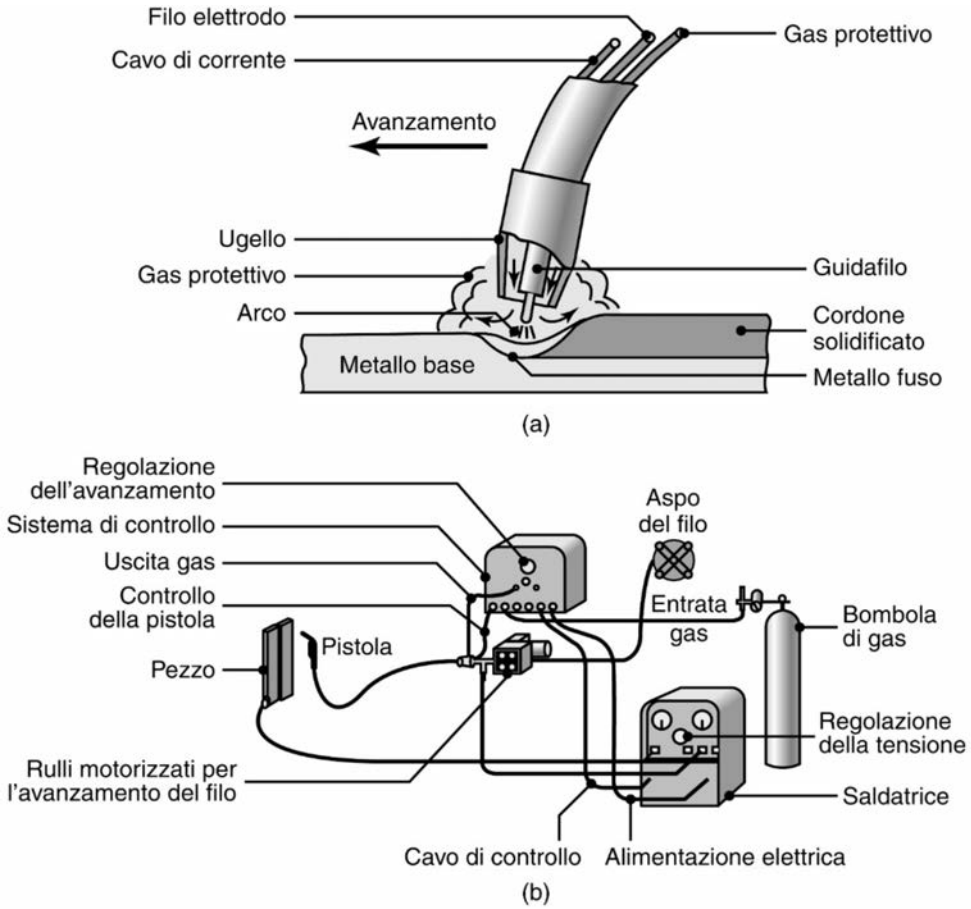


Figura 2.23: Saldatura con elettrodo fusibile in gas protettivo

A seconda del tipo di gas impiegato, del diametro del filo, e dei parametri elettrici di saldatura variano le modalità di trasferimento delle gocce di metallo d'apporto dall'elettrodo al bagno di fusione.

* Trasferimento a spruzzo. Il metallo viene trasferito sotto forma di piccole gocce, senza spruzzi indesiderati ed è molto stabile. Tale meccanismo si verifica impiegando corrente continua con valori elevati di tensione ed intensità, fili di grande diametro e miscele ricche di argon. Inoltre con tale processo è possibile saldare in tutte le posizioni.

* Trasferimento globulare. Il metallo viene trasferito sotto forma di grosse gocce e ciò può provocare spruzzi indesiderati, tuttavia garantisce maggiore penetrazione e velocità di saldatura. Tale meccanismo si verifica utilizzando anidride carbonica e intensità di corrente inferiori.

* Trasferimento a immersione. Il metallo viene trasferito una goccia alla volta dall'elettrodo al bagno di fusione. Tale meccanismo si verifica utilizzando anidride carbonica, intensità di corrente e tensioni basse e fili di piccoli diametro. Le temperature raggiunte sono relativamente basse quindi questo metodo è adatto solo per lamiere e sezioni sottili.

2.5.4 Saldatura a idrogeno atomico

Nella saldatura a idrogeno atomico (atomic hydrogen welding, AHW) viene generato un arco tra due elettrodi in tungsteno immersi in un'atmosfera protettiva creata da un flusso di gas idrogeno.
In questo caso gli elettrodi sono infusibili.
L'idrogeno H_2, in prossimità dell'arco, dove le temperature superano i $6000° C$, si dissocia in forma atomica assorbendo gran parte dell'energia prodotta dall'arco.
Colpendo la superficie fredda da saldare, l'idrogeno di ricombina in forma biatomica e rilascia istantaneamente l'energia immagazzinata, sotto forma di calore ceduto alla superficie.
Variando la distanza tra arco e superficie del pezzo è possibile variare l'energia rilasciata.
Questo processo tuttavia non viene utilizzato spesso in quanto più costoso dei processi che utilizzano gas protettivi.

2.5.5 Saldatura con elettrodo a flusso incorporato

La saldatura con elettrodo a flusso incorporato (flux-cored arc welding, FCAW) è simile al processo di saldatura con elettrodo fusibile in gas protettivo.
La differenza sta nell'elettrodo che in questo caso non è in metallo massiccio ma è un tubolare riempito con un flusso interno. Tali elettrodi, di diametro compreso tra $0,5$ e $4\ mm$, producono un flusso più stabile ed un cordone di saldatura più regolare e resistente in quanto il flusso è molto più flessibile dei rivestimenti impiegati nella saldatura con elettrodo metallico rivestito.
La potenza richiesta da tale processo è circa di $20\ kW$.
Il processo di saldatura con elettrodo a flusso incorporato combina i vantaggi della saldatura mediante elettrodo metallico con le caratteristiche di automazione tipiche delle saldature con gas protettivo.
Il principale vantaggio di questa tecnica è la possibilità di variare la chimica del flusso per generare una protezione gassosa o per generare leghe d'apporto di qualsiasi composizione.

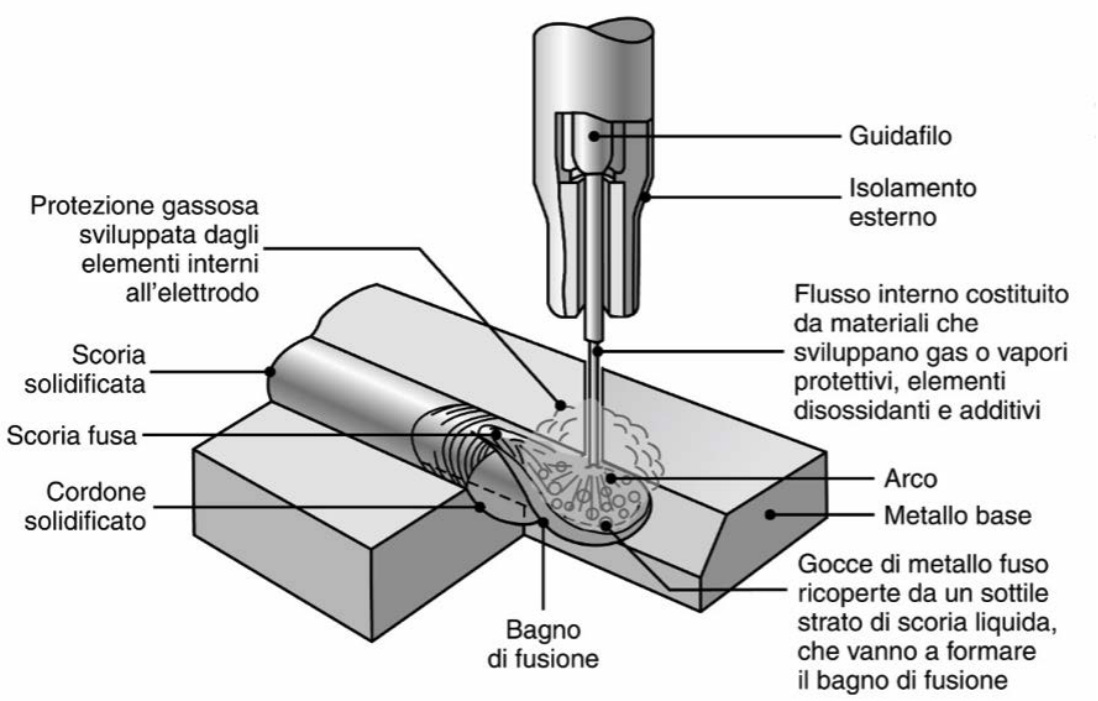


Figura 2.24: Saldatura con elettrodo a flusso incorporato

2.5.6 Saldatura elettrogas

La saldatura elettrogras (electrogas welding, EGW) viene impiegata principalmente per giunti di testa in posizione verticale.
Tale tecnica richiede una specifica apparecchiatura. Il metallo d'apporto viene depositato in una cavità ricavata tra i lembi da saldare, mantenuti ad una certa distanza. I lembi vengono racchiusi tra due dighe in rame, detti pattini, raffreddate ad acqua che impediscono la caduta del bagno fuso.
All'avanzare della saldatura, dal basso verso l'alto, un dispositivo meccanico fa scorrere anche i pattini verso l'alto.
Gli elettrodi sono alimentati attraverso un guidafilo conduttore con correnti fino a 750 A per elettrodi a flusso incorporato, fino a 400 A per elettrodi pieni. La potenza richiesta è circa 20 kW.
A seconda del materiale da saldare è possibile utilizzare vari gas protettivi che vengono forniti da un sistema esterno o direttamente dall'elettrodo nel caso di elettrodi a flusso incorporato.
Con tale tecnica si possono saldare spessori da 12 a 75 mm.

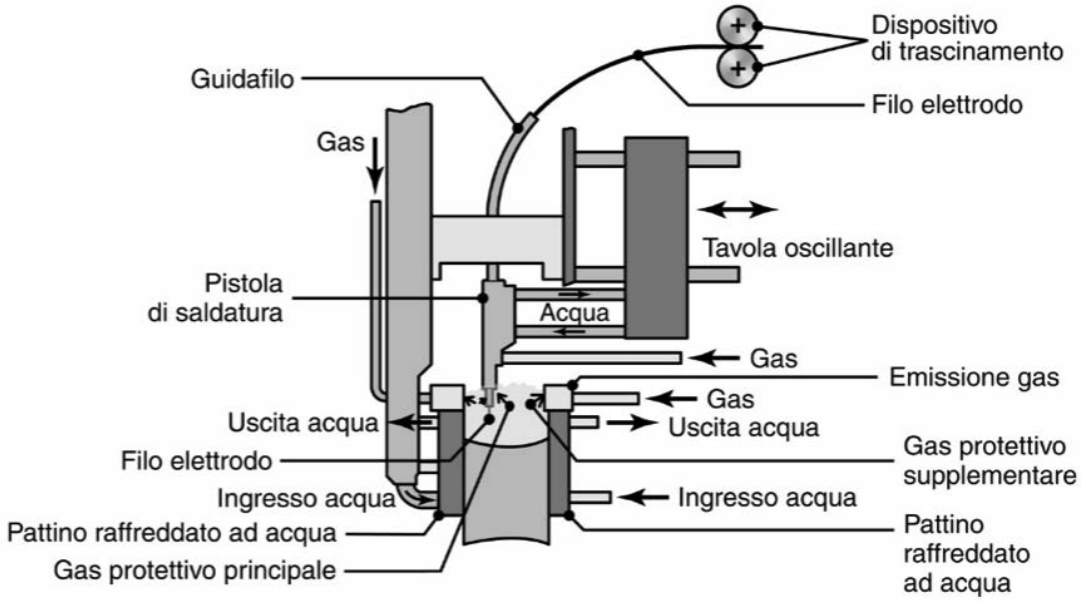


Figura 2.25: Saldatura elettrogas

2.5.7 Saldatura ad elettroscoria

La saldatura ad elettroscoria (electroslag welding, ESW) viene anch'essa utilizzata per saldature in posizione verticale e per questo è molto simile, dal punto di vista dell'apparecchiatura utilizzata, alla saldatura elettrogas. Anche in questa tecnica sono presenti pattini in rame raffreddati ad acqua.
In questo caso però il calore necessario per portare a fusione il metallo base ed il metallo d'apporto non viene generato dall'arco elettrico che si crea tra filo e bagno di fusione, ma per effetto Joule.
Prima della saldatura viene introdotto nella cavità da saldare un certo quantitativo di flusso che poi viene fatto penetrare dal filo elettrodo fino al fondo della parte da saldare. All'avvio dell'alimentazione elettrica si crea un arco elettrico che porta a fusione il flusso, come nella saldatura ad arco sommerso, tuttavia tale flusso è in grado di condurre corrente.
A questo punto l'arco si spegne e da questo momento il flusso fuso, che collega l'estremità del filo al componente da saldare, si comporta come un tratto resistivo di un circuito elettrico. L'energia termica generata per effetto Joule dal flusso è tale da fondere il metallo d'apporto ed i lembi del metallo base.
Tale processo si utilizza per elevati spessori che vanno da 50 a più di 900 mm e può raggiungere velocità di saldatura di $12 - 36$ mm/min.
La corrente richiesta è di circa 600 A e $40 - 50$ V

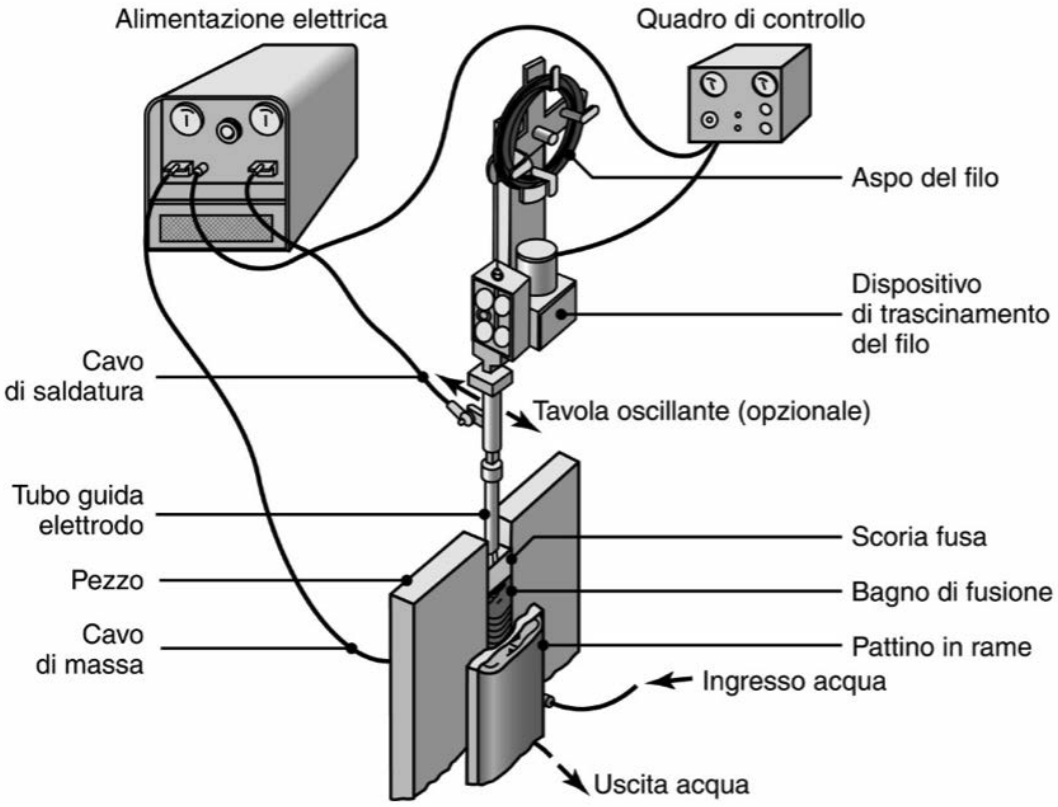


Figura 2.26: Saldatura ad elettroscoria

2.5.8 Saldatura con elettrodo in tungsteno in gas protettivo

Nella saldatura con elettrodo in tungsteno in gas protettivo (gas tungsten arc welding, GTAW), detta anche saldatura TIG (tungsten inert gas), il materiale d'apporto viene fornito da una bacchetta d'apporto in quanto l'elettrodo è infusibile. Tuttavia può essere eseguita anche senza materiale d'apporto. La composizione chimica dei materiali d'apporto deve però essere simile a quella del metallo da saldare.
Tale tecnica utilizza il gas protettivo che è solitamente argon, elio o una miscela dei due.
Non consumandosi, l'elettrodo in tungsteno mantiene l'arco molto stabile con una distanza fissa di lavoro tra elettrodo e pezzo e con corrente costante.
Le potenze richieste da tale tecnica variano tra 8 e 20 kW e si può utilizzare corrente continua a 200 A o corrente alternata a 500 A a seconda del materiale da saldare.
Un problema di tale tecnica è la contaminazione dell'elettrodo in tungsteno da parte del metallo fuso in quanto può portare discontinuità nella saldatura, pertanto il contatto tra elettrodo e bagno fuso deve essere evitato.
Tale tecnica viene utilizzata per applicazioni diverse ma soprattutto dove vi sono problemi di ossidazione in quanto genera cordoni di saldatura molto puliti e che non richiedono successiva operazione di finitura.

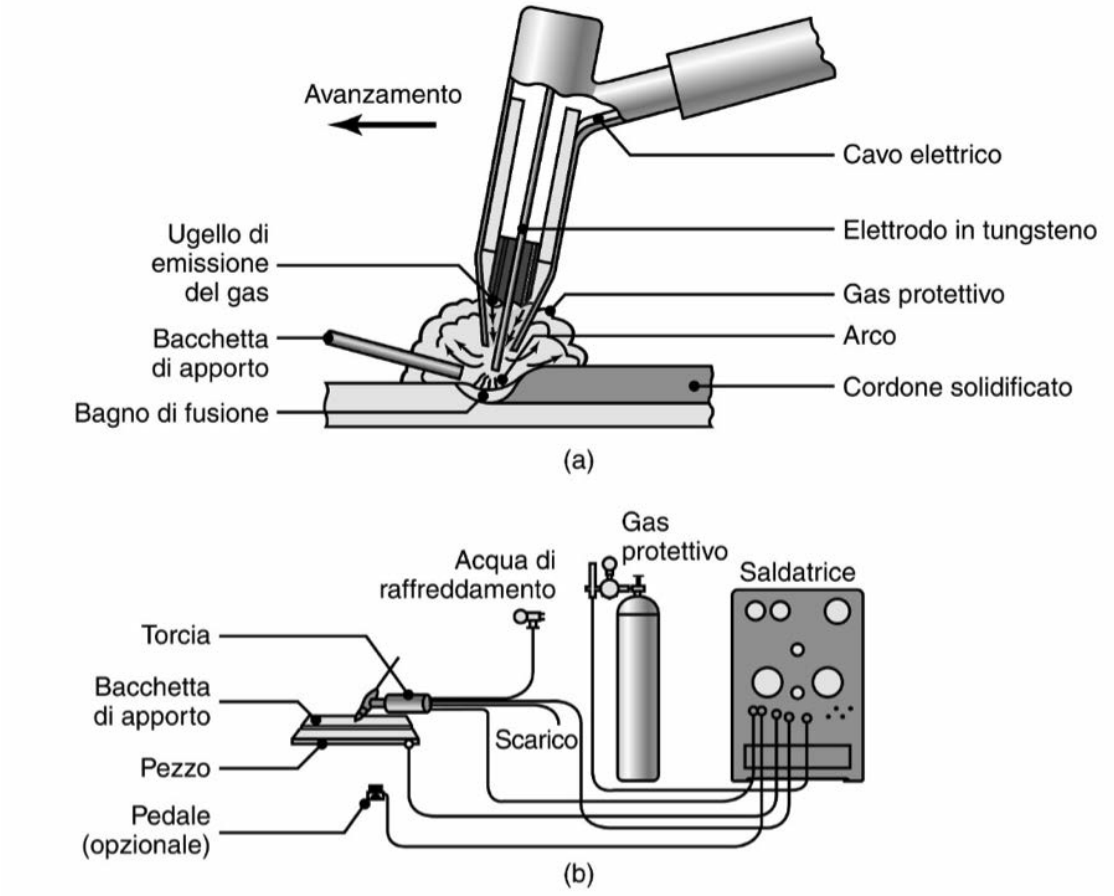


Figura 2.27: Saldatura con elettrodo in tungsteno in gas protettivo

2.5.9 Saldatura al plasma

La saldatura al plasma (plasma arc welding, PAW) utilizza per la saldatura un gas fortemente ionizzato ad elevata temperatura (plasma).
L'arco stabile raggiunge temperature fino a 33000° C e genera così il plasma tra l'elettrodo in tungsteno e l'orifizio.
A differenza dell'arco generato da altri processi, l'arco della saldatura al plasma è concentrato in quanto deve passare attraverso un orifizio stretto. Tale processo necessita di corrente inferiore a 100 A che può essere aumentata in caso di applicazioni speciali.
Anche in questa tecnica l'elettrodo è infusibile, quindi l'eventuale materiale d'apporto deve essere avvicinato all'arco come nella saldatura TIG. La protezione dell'arco e del bagno di fusione è garantita da una miscela di gas inerti quali argon ed elio.
Esistono due diversi metodi di saldatura al plasma:

* Ad arco trasferito. Il pezzo è parte integrante del circuito elettrico e l'arco scocca tra l'elettrodo ed il componente.

* Ad arco non trasferito. L'arco scocca tra elettrodo ed ugello e di conseguenza il calore è apportato sulla superficie del pezzo dal plasma.

La saldatura al plasma è caratterizzata da: un'elevata concentrazione di energia che consente di ottenere saldature strette e fonde, un'elevata stabilità dell'arco, una bassa distorsione termica ed un'elevata velocità di saldatura che va da 120 a 1000 mm/min.
Si possono saldare molti metalli diversi, generalmente con spessori inferiori ai 6 mm.

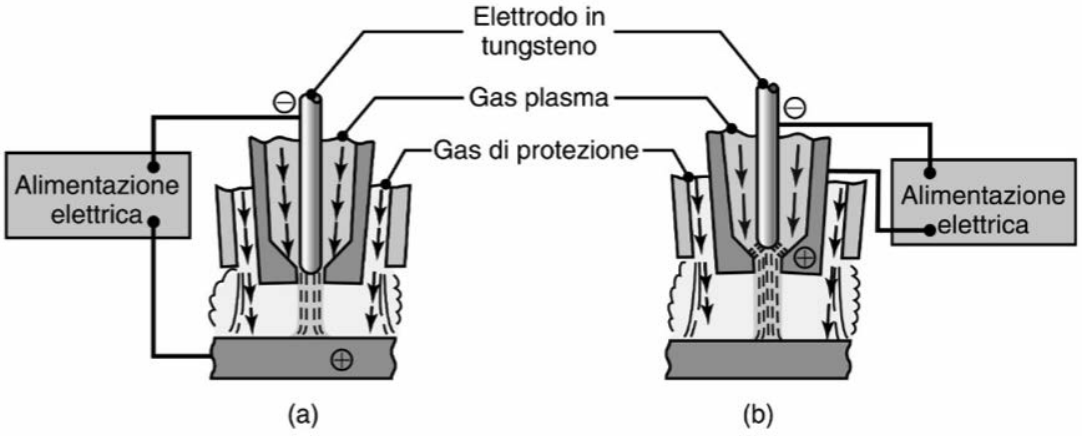


Figura 2.28: Saldatura al plasma

Capitolo 3

Software di simulazione numerica

I processi di saldatura ricoprono un ruolo fondamentale nella produzione industriale per questo è importante conoscere a priori alcuni degli aspetti fondamentali di tale processo, come per esempio:

* la determinazione del numero ottimale di passate;
* la scelta del posizionamento dei vincoli;
* i problemi relativi all'espansione termica ed al restringimento;
* i problemi relativi alle trasformazioni microstrutturali ed allo sviluppo di tensioni residue e distorsioni.

Per fare ciò è conveniente l'utilizzo di tecniche computer-aided perché possono fornire informazioni utili per quanto riguarda le tematiche sopra citate e perché possono fornire ipotesi di soluzione in tempi relativamente contenuti.
Tali tecniche, data la loro grande utilità ed affidabilità, vengono utilizzate sia in fase di progettazione che in fase di verifica in quanto consentono di incrementare la produttività e la flessibilità degli impianti e garantiscono la corretta esecuzione della giunzione.
Uno dei fattori più importanti da analizzare, in un processo di saldatura, è la previsione delle distorsioni e delle tensioni residue dei giunti saldati . Tale fattore è molto importante perché influenza direttamente gli altri, ossia la scelta dei parametri di processo (tensione, corrente, velocità di saldatura, velocità di alimentazione del filo, erogazione del gas protettivo), le caratteristiche geometriche e di vincolo del giunto e la scelta di eventuali trattamenti termici pre o post-saldatura.
Con l'impiego di codici numerici agli elementi finiti si tenta di simulare l'intero processo di saldatura considerando gli effetti che intervengono nel fenomeno (trasformazioni di fase, comportamento elastico e plastico del materiale, proprietà fisiche e meccaniche dipendenti dalla temperatura e dalle fasi, creep). Tuttavia lo sviluppo di un sistema computer-aided, che possa essere di supporto al progettista nella previsione delle deformazioni delle strutture sottoposte a processi di saldatura, rappresenta una sfida difficile a causa dell'elevata complessità dei fenomeni fisici che si verificano in prossimità del cordone. Infatti, per costruire un modello completo di un generico processo di saldatura, il sistema dovrebbe tenere in considerazione

un numero molto elevato di fenomeni interagenti che sono spesso sconosciuti o comunque non quantificabili con una sufficiente accuratezza.
Questi sistemi semi empirici tendono a semplificare il problema ma sono comunque utili poiché danno la possibilità di stimare il comportamento di strutture, anche di grandi dimensioni, in tempi ragionevoli.

A questo scopo, già nel 1979, venne presa la decisione di sviluppare un software per la simulazione numerica agli elementi finti degli effetti della saldatura.
Il software SYSTUS divenne operativo nel 1981 ed anno dopo anno furono apportati importanti miglioramenti in tutti gli aspetti.
Il software SYSWELD, che verrà utilizzato in seguito per la simulazione, è derivato direttamento dal sistema SYSTUS. Tale software è in grado di determinare l'entità delle tensioni e deformazioni residue derivanti da saldature o trattamenti termici.
Integrando gli effetti delle trasformazioni metallurgiche, il sistema può calcolare il legame tra struttura del materiale, stress residuo e diffusione dell'idrogeno.
Il software è costituito da 5 parti distinte come si vede in figura 3.1.

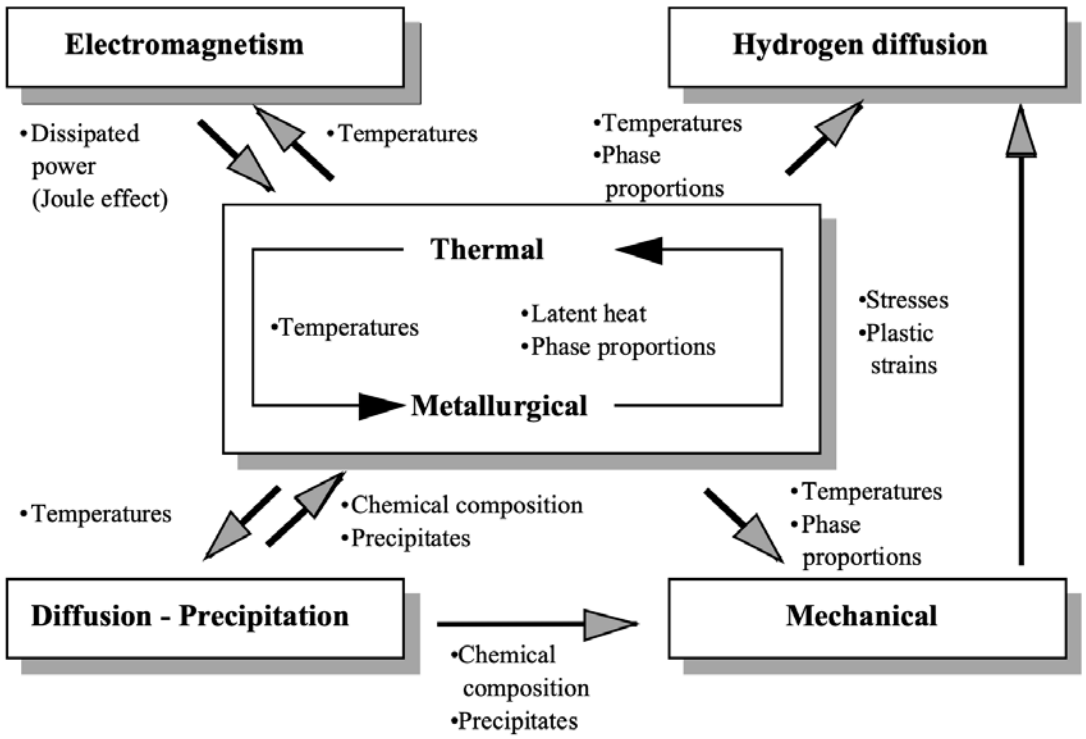


Figura 3.1: Architettura generale di Sysweld

L'elaborazione di un problema può essere riassunta come segue:

* Dalle proprietà termiche dei materiali, parametri di processo, schemi di trasformazione metallurgica, il calcolo termico prevede: i cicli termici, i flussi termici, le variazioni di fase e la granulometria austenitica.

* Cambiamenti di temperatura, proporzioni delle fasi, elementi chimici e granulometria austenitica sono i dati per il calcolo meccanico. Per effettuare tale calcolo sono necessarie anche le caratteristiche meccaniche in funzione delle fasi, della composizione chimica e della temperatura.

* Cambiamenti di fase, proporzioni delle fasi, tensioni e deformazioni plastiche servono per il calcolo della diffusione dell'idrogeno.

Di norma, la simulazione di un processo può essere effettuata in due fasi: il calcolo termo-metallurgico prima ed infine il calcolo meccanico. Il calcolo termo-metallurgico fornisce la distribuzione della temperatura, la formazione della struttura metallurgica e lo sviluppo della durezza durante l'intero processo; il risultato del calcolo meccanico sono le sollecitazioni interne, le variazioni dimensionali e la distorsione sull'intero processo.
L'analisi termica e meccanica sono eseguite in maniera sfalsata, approccio staggered. Le sollecitazioni termiche sorgono durante la saldatura a causa dell'espansione termica e la contrazione. Ulteriori sollecitazioni sono create da trasformazioni metallurgiche, che si sovrappongo arbitrariamente alla sollecitazione termica, in funzione del tempo. La sovrapposizione dei due effetti si traduce in una condizione di sollecitazione complessa e multiassiale, accompagnata da cambiamenti dimensionali e di distorsione del componente. La sequenza di sovrapposizione dei due effetti è fondamentale in questo caso: a seconda del punto in cui si verificano sollecitazioni termiche e sollecitazioni di trasformazione, vengono prodotte condizioni di sollecitazione interna residua completamente diverse, variazioni dimensionali e distorsioni. Nella simulazione, il calcolo meccanico è essenzialmente determinato, a parte gli effetti termici classici, da due effetti termo-metallurgici:

* cambiamenti di volume che accompagnano le trasformazioni metallurgiche degli acciai;

* le caratteristiche specifiche del materiale in funzione delle fasi presenti.

3.1 Analisi termo-metallurgica

Il metodo agli elementi finiti è uno dei più accettati ed ampiamente usati strumenti per la soluzione di equazioni differenziali a derivate parziali che si ottengono quando si modellano vari fenomeni fisici e vari processi. Tale metodo era stato originariamente sviluppato per l'analisi strutturale ma ora è applicabile in tutti i campi dell'ingegneria e delle scienze applicate come la trasmissione del calore, la dinamica dei fluidi, le vibrazioni, l'elettromagnetismo.
La modellazione della deposizione di materiale nella saldatura è un fenomeno termo-meccanico accoppiato non lineare. La sorgente di calore mobile produce

uno sviluppo di calore localizzato ed elevati gradienti termici. La distribuzione di temperatura non uniforme determina distorsioni e tensioni termiche.

3.1.1 Trasformazioni metallurgiche

In termini metallurgici, un materiale è definito dalle proporzioni P_i delle varie fasi che lo compongono (ferrite, bainite, martensite, asutenite, ecc.).
Sono disponibili diversi modelli per descrivere la storia metallurgica e calcolare i cambiamenti nelle proporzioni delle diverse fasi. In SYSWELD è possibile distinguere due diversi approcci:

* Il primo approccio che si basa su una generalizzazione delle legge di Johnson-Mehl-Avrami per includere le trasformazioni di tipo cinetico. Tale approccio richiede la determinazione del diagramma di raffreddamento continuo (CCT) o l'utilizzo del test dilatometrico per creare quest'ultimo. Tale approccio viene utilizzato di default dal software.

* Il secondo approccio, impiegato da Nancy Metal Materials Engineering e Science Laboratory, si basa sull'uso di diagrammi di trasformazione isotermica. Questo approccio non verrà trattato.

Primo approccio

L'approccio iniziale è di tipo fenomenologico, ed il modello è semi-empirico, basato su equazioni di tipo chimico e cinetico anziché essere un modello totalmente empirico basato sull'introduzione diretta dei diagrammi CCT.
L'equazione generale è:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\bar{P}-P}{TR}$$

Dove:

* P è la proporzione di fase metallurgica;
* t è il tempo;
* $\bar{P}$ è la proporzione di fase in condizioni di equilibrio;
* TR è il ritardo temporale.

Possono verificarsi numerose trasformazioni del materiale e ciò implica che la velocità di trasformazione per la fase i dipende dalle altre fasi metallurgiche.

$$\frac{dP_i}{dt} = \sum_{i \neq j} A_{ij} (j = 1, 2, 3, ..., n)$$

Dove A_{ij} rappresenta la quantità di fase i trasformata in fase j per unità di tempo ed è indipendente dalle altre fasi.

$$A_{ij} = (K_{i\to j} * P_i) - (K'_{i\to j} * P_j)$$

Dove $K_{i\to j}$ e $K'_{i\to j}$ sono costanti della reazione $i \to j$ che possono dipendere dalla temperatura θ.

$$K_{i\to j} = K(\theta) * F(\theta)$$

$$K'_{i\to j} = K'(\theta) * F'(\theta)$$

Per esempio, se si considera una singola trasformazione $1 \to 2$ come l'austenitizzazione (1 fase alfa, 2 fase gamma).

$$\frac{dP_2}{dt} = (K_{1\to 2} * P_1) - (K'_{1\to 2} * P_2)$$

Sapendo che $P_1 + P_2 = 1$

$$\frac{dP_2}{dt} = K_{1\to 2} - (K_{1\to 2} + K'_{1\to 2}) * P_2$$

$$K_{1\to 2} = \frac{\bar{P_2}}{TR}$$

$$K'_{1\to 2} = \frac{1-\bar{P_2}}{TR}$$

$$K_{1\to 2} = K(\theta) * F(\theta)$$

$$K'_{1\to 2} = K'(\theta) * F'(\theta)$$

Otteniamo:

$$P = \frac{1}{1+\frac{F'*K'}{F*K}}$$

$$TR = \frac{1}{F'*K'+F*K}$$

E' possibile utilizzare due variabili $Peq(\theta)$ e $Tau(\theta)$ che identificando la proporzione di fase all'equilibrio ed il tempo di ritardo, entrambe funzioni della temperatura.

$$K(\theta) = \frac{Peq(\theta)}{Tau(\theta)}$$

$$K'(\theta) = \frac{1-Peq(\theta)}{Tau(\theta)}$$

Da cui:

$$\bar{P} = \frac{Peq*F}{Peq*F+(1-Peq)*F'}$$

$$TR = \frac{Tau}{Peq*F+(1-Peq)*F'}$$

Quindi, per poter caratterizzare una trasformazione metallurgica è necessario conoscere $Peq(\theta)$, $Tau(\theta)$, $F(\theta)$ e $F'(\theta)$.

Tale modello è stato generalizzato per riprodurre la legge di Johnson-Mehl-Avrami di tipo cinetico, in questo modo è possibile dare la proporzione corrente P_i della fase i in funzione del tempo, per una data temperatura θ.

$$P_i(\theta, t) = \bar{P} * (1 - e^{(-\frac{t}{TR})^n})$$

Al variare della temperatura, si considera la derivata P_i rispetto al tempo a temperatura costante, con parametri di trasformazione dipendenti dalla temperatura.

$$\frac{dP_i}{dt} = n * (\frac{\bar{P} - P_i}{TR}) * (\ln(\frac{\bar{P}}{\bar{P} - P_i})^{(\frac{n-1}{n})})$$

Dove:

* $\bar{P}$ è la proporzione di fase metallurgica che si otterrebbe dopo infinito tempo;
* n è un indice che illustra la velocità di reazione;
* TR è il ritardo temporale associato alla reazione.

Considerando una generica trasformazione $i \to j$, introducendo le generiche costanti di reazione viste in precedenza.

$$K_{i \to j} = \frac{Peq(\theta)}{Tau(\theta)} * F(\theta)$$

$$K'_{i \to j} = \frac{1 - Peq(\theta)}{Tau(\theta)} * F'(\theta)$$

L'equazione diventa quindi:

$$\frac{dP_j}{dt} = n_{i \to j} * (\frac{K_{i \to j} * P_i - K'_{i \to j} * P_j}{TR}) * (\ln(\frac{K_{i \to j} * (P_i + P_j)}{K_{i \to j} * P_i - K'_{i \to j} * P_j})^{(\frac{n-1}{n})})$$

Quindi, per poter caratterizzare una trasformazione metallurgica è necessario conoscere $Peq(\theta)$, $Tau(\theta)$, $F(\theta)$, $F'(\theta)$ e $n(\theta)$. Tali parametri possono essere ottenuti per aggiustamento che coinvolge il confronto tra i risultati di un diagramma CCT e le previsione fornite dal modello oppure identificando tali parametri da un diagramma di trasformazione isotermica.

3.1.2 Calcolo della dimensione della grana cristallina

Il calcolo della granulometria può essere utile per due motivi:

* é di per sé importante perché influenza le proprietà meccaniche del materiale;
* può influenzare le trasformazioni di fase.

Le variazioni della dimensione del grano riguardano solo la fase austenitica e dipendono da un lato dalle variazioni di temperatura e, dall'altro, dalla proporzione di tale fase.
La variazione granulometrica viene calcolata utilizzando un'estensione dell'equazione convenzionale.

$$D^a = C * e^{-\frac{Q}{RT}}$$

Dove:

* D è la dimensione del grano;
* T è la temperatura assoluta;
* a, C, Q/R sono costanti.

Questa equazione però è valida solamente nel caso in cui la porzione di austenite rimanga costante o decresca. Infatti, se la porzione di austenite aumenta si possono osservare due fenomeni fisici distinti:

* aumentano le dimensioni dei grani già esistenti;
* si formano nuovi grani cristallini con una granulometria iniziale pari a zero.

Generalizzando l'equazione precedente si ottengono due espressioni:

* Se non vi è creazione di austenite $\dot{\lambda} \leq 0$ e l'equazione diventa:

$$D^a = C * e^{-\frac{Q}{RT}}$$

* Se vi è creazione di austenite $\dot{\lambda} > 0$ e l'equazione diventa:

$$D^a = C * e^{-\frac{Q}{RT}} * \frac{\dot{\lambda}}{\lambda} * D^a$$

Dove:

* $\dot{\lambda}$ è la velocità di trasformazione dell'austenite;
* λ è la proporzione di austenite.

3.1.3 Calcolo della temperatura

Il calcolo termico si basa sulla risoluzione dell'equazione del calore, modificata per tenere conto del calore latente di fusione o solidificazione e del calore di trasformazione di fase allo stato solido.

$$\rho * C * \frac{d\theta}{dt} = \nabla(\lambda \nabla \theta) * \sum_{i<j} L_{ij} * A_{ij}$$

Il calore specifico e la conducibilità termica sono pesati secondo le proporzioni delle varie fasi.

$$C = \sum_{i} P_i * C_i$$

$$\lambda = \sum_{i} P_i * \lambda_i$$

Il calore specifico delle varie fasi C_i ed il calore latente per le varie trasformazioni L_{ij} è funzione dell'entalpia delle diverse fasi H_i.

$$C_i = \frac{dH_i}{d\theta}$$

$$L_{ij} = H_j - H_i$$

3.2 Analisi meccanica

3.2.1 Plasticità

Il calcolo meccanico si basa sui risultati ottenuti dal calcolo termo-metallurgico. Il calcolo delle sollecitazioni termoplastiche, tenendo conto delle variazioni di temperatura e di fase, può essere:

* bidimensionale;
* tridimensionale.

Esistono diversi modelli di comportamento elastoplastico compatibili con la simulazione delle trasformazioni metallurgiche come: la plasticità perfetta, l'incrudimento cinematico e l'incrudimento isotropico.
L'influenza della storia termica sulla storia meccanica riguarda simultaneamente le variazioni delle proprietà meccaniche (modulo di Young, carico di snervamento) al variare della temperatura e le dilatazioni o contrazioni termiche.
L'influenza della storia metallurgica sulla storia meccanica si divide in quattro fattori:

* L'influenza della struttura metallurgica e della dimensione del grano austenitcio sulle proprietà meccaniche.
  In particolare, la tensione di snervamento è calcolata come la media delle tensioni di snervamento delle singole fasi con una legge di ponderazione lineare, nel caso di una miscela completamente ferritica.

$$\sigma_y^\alpha(\theta) = \sum_i P_i * \sigma_i^\alpha(\theta)$$

  Dove:

  - σ_y^α è la tensione di snervamento della miscela delle fasi ferritiche;
  - P_i è la proporzione della fase i ferritica;
  - σ_i^α è la tensione di snervamento della fase i ferritica.

  Mentre viene calcolata con una legge di ponderazione non lineare in funzione delle proporzioni delle singole fasi per una miscela austeno-ferritica.

$$\sigma_y(\theta) = [1 - f(\lambda)] * \sigma_y^\gamma(\theta) + f(\lambda) * \sigma_y^\alpha(\theta)$$

  Dove:

  - λ è la proporzione della miscela ferritica;
  - σ_y^γ è la tensione di snervamento dell'austenite;
  - σ_y è la tensione di snervamento della miscela austeno-ferritica.

λ	0	12.5%	25%	50%	75%	100%
f(λ)	0	0.044	0.124	0.391	0.668	1

Figura 3.2: Funzione $f(\lambda)$

∗ L'espansione e la contrazione prodotta dalle trasformazioni metallurgiche. Tali sollecitazioni sono dovute a fattori termici e metallurgici e sono espresse come:

$$\epsilon^{th}(p,\theta) = \sum_i P_i * \epsilon_i^{th}(p,\theta)$$

Dove $\epsilon_i^{th}(p,\theta)$ è la deformazione termica della fase i alla temperatura θ. Questa formula considera contemporaneamente:

- dilatazione-contrazione termica ($\epsilon_i^{th}(p,\theta)$ cresce con θ);
- espansione-contrazione metallurgica ($\epsilon_i^{th}(p,\theta)$ varia da una fase all'altra).

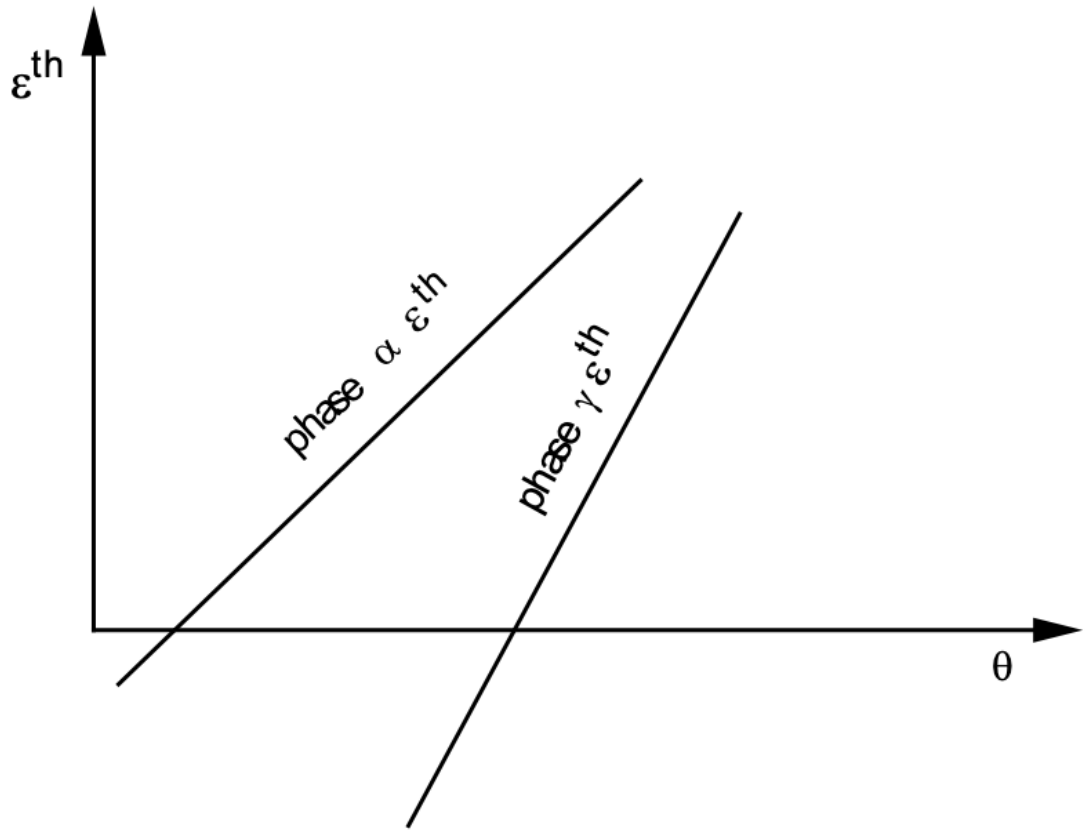


Figura 3.3: Espansione-contrazione metallurgica

* Il recupero della plasticità durante le trasformazioni.
Durante una trasformazione metallurgica, l'incrudimento del materiale può scomparire a causa delle dislocazioni rimosse dal cambiamento strutturale. Dal punto di vista meccanico, tale fenomeno viene descritto utilizzando due parametri di incrudimento, uno per la fase α e uno per la fase γ. Il modello si basa sull'inserimento di un coefficiente di memoria θ. La memoria è inesistente se $\theta = 0$ ed è totale se $\theta = 1$. Se si formano più fasi nella trasformazione $\gamma \rightarrow \alpha$ viene utilizzata la segue formula:

$$\theta = \sum_{\alpha \neq \gamma} \frac{\theta_\alpha * P_\alpha}{\sum_\alpha P_\alpha}$$

Dove P_α indica le proporzioni delle fasi α.
Questa formula esprimente che θ è la media dei coefficienti di memoria per le trasformazioni $\gamma \rightarrow \alpha$.

* La plasticità di trasformazione.
Durante le trasformazioni metallurgiche, in presenza di sollecitazioni anche molto inferiori al carico di snervamento, avviene un flusso plastico che tende a ridurre le sollecitazioni a zero. Questo fenomeno è legato alle differenze di volume tra le varie fasi con conseguente deformazione plastica della fase più debole anche in assenza di tensioni esterne.
Quindi la deformazione totale in un punto può essere scritta come:

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^{th} + \epsilon^{pc} + \epsilon^{tp}$$

Dove:

- ϵ^e è la deformazione elastica;
- ϵ^{th} è la deformazione termica e metallurgica;
- ϵ^{pc} è la deformazione plastica convenzionale;
- ϵ^{tp} è la deformazione plastica di trasformazione.

$$\epsilon_{ij}^{tp} = -\frac{3}{2} * K * \ln \lambda * S_{ij} * h(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_y}) * \lambda$$

Dove:

- K è il coefficiente di plasticità di trasformazione e può essere inserito manualmente dall'utente in seguito a test dilatometrici o può essere calcolato automaticamente dal software;
- λ è la proporzione di fase ferritica;
- $h(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_y})$ è il termine di non linearità ed è presente solo se la sollecitazione applicata supera la metà del carico di snervamento della miscela;
- S_{ij} è il deviatore di deformazione.

.

3.2.2 Viscoplasticità

Modello standard

Il comportamento di ciascuna fase è descritto dalla seguente legge:

$$\dot{\epsilon}_i^{eq} = \left(\frac{\sigma_i^{eq} - k_i(T, \epsilon_i^{eff})}{K_i * (\epsilon_i^{eff})^{\frac{1}{m_i}}}\right)^{n_i}$$

Dove:

* $\dot{\epsilon}_i^{eq}$ è la velocità di deformazione viscoplastica equivalente della fase i;
* ϵ_i^{eff} è il parametro scalare di incrudimento (attuale deformazione viscoplastica);
* $k_i(T, \epsilon_i^{eff})$ è il limite elastico in funzione della temperatura e/o del parametro di incrudimento ϵ_i^{eff};
* K_i, m_i, n_i sono parametri che rappresentano il comportamento viscoplastico.

Modello specifico per il rilassamento delle tensioni interne

Questo modello è pensato principalmente per il trattamento di distensione infatti non tiene conto degli effetti viscosi della saldatura. Tale modello è sviluppato per casi in cui le temperature variano tra alte temperature e temperatura ambiente. Non è adatto per cicli termici.
Questo modello può essere utilizzato per descrivere il comportamento elastoplastico cinetico dei materiali, quindi per:

* plasticità perfetta;
* plasticità con incrudimento cinematico;
* plasticità con incrudimento isotropo;
* termo-plasticità cinematica;
* termo-plasticità isotropa.

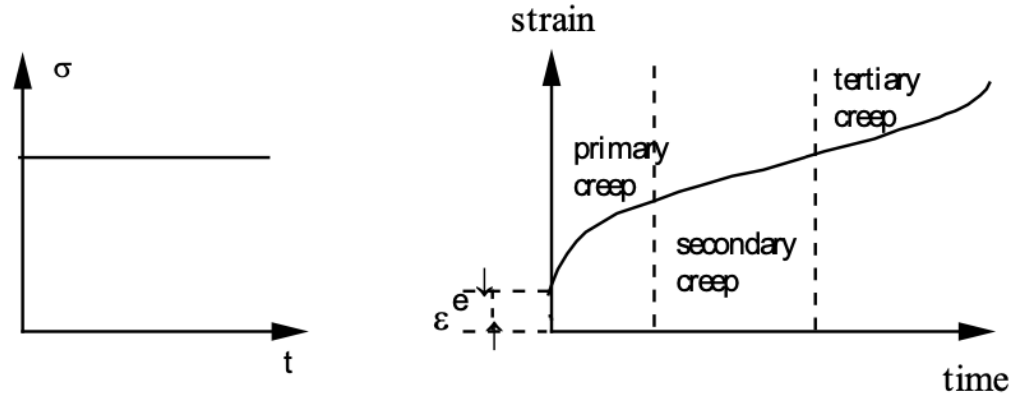


Figura 3.4: Prova di creep

3.3 Proprietà del materiale

3.3.1 Dati termici

Conducibilità termica

Conducibilità termica in funzione della temperatura per la fase α (ferrite, bainite, martensite, bainite rivenuta, martensite rinvenuta) e per la fase γ (austenite).
Per la fase α.

Tabella 3.1: Conducibilità termica per la fase α

T $[°C]$	λ $[\frac{W}{mm*K}]$
0	0,0433
1400	0,0210

Per la fase γ.

Tabella 3.2: Conducibilità termica per la fase γ

T $[°C]$	λ $[\frac{W}{mm*K}]$
0	0,0210
1400	0,0355

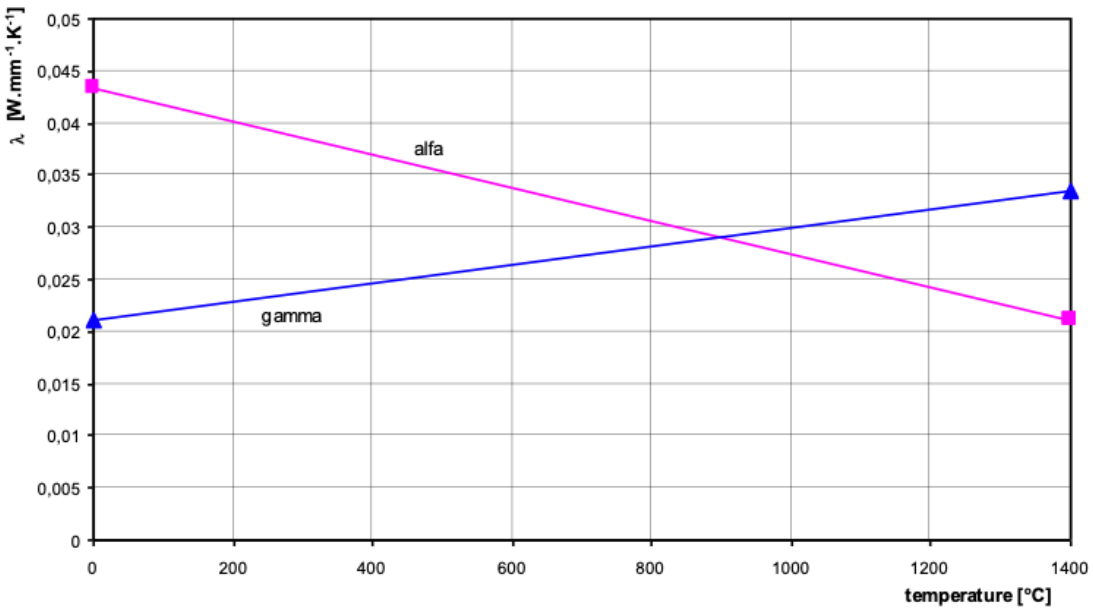


Figura 3.5: Conducibilità termica

Densità

Densità in funzione della temperatura per tutte le fasi.

Tabella 3.3: Densità in funzione della temperatura

T $[°C]$	$\rho * 10^9[\frac{kg}{mm^3}]$
0	7867
100	7836
200	7805
300	7774
400	7739
500	7704
600	7668
700	7641
800	7662
900	7608
1000	7557
1200	7452

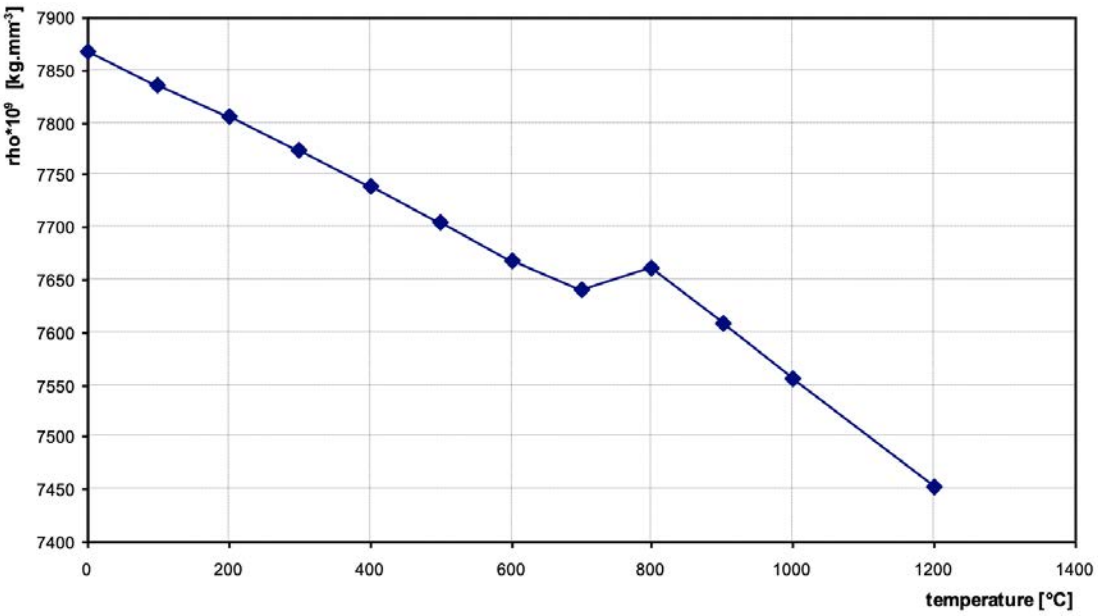


Figura 3.6: Densità in funzione della temperatura

Calore specifico

Calore specifico in funzione della temperatura per tutte le fasi.

Tabella 3.4: Calore specifico in funzione della temperatura

T $[°C]$	$c[\frac{J}{kg*k}]$
100	487
200	512
300	531
400	549
500	569
600	594
700	630
800	679
900	675
1000	671
1100	667
1200	663
1300	659

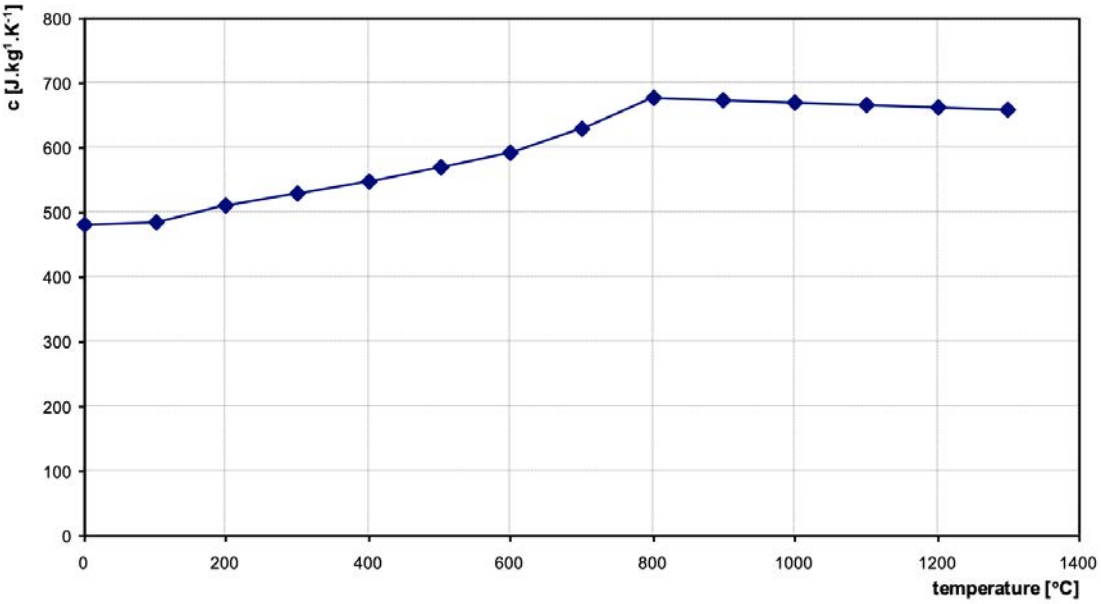


Figura 3.7: Calore specifico in funzione della temperatura

Coefficiente di scambio termico

Coefficiente di scambio termico per lo scambio in aria in funzione della temperatura $[W/m^2 * K]$.

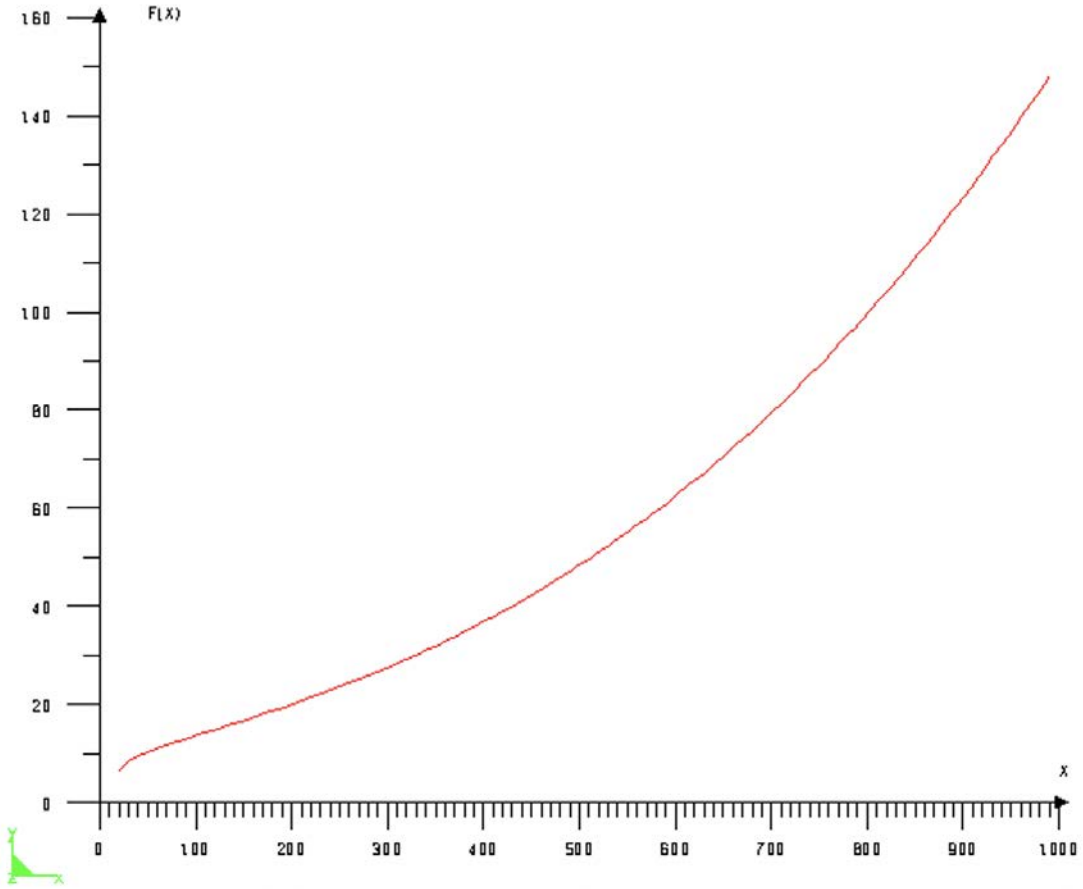


Figura 3.8: Coefficiente di scambio termico in funzione della temperatura

3.3.2 Dati meccanici

Deformazione termica

Deformazione termica in funzione della temperatura (da non confondere con il coefficiente di dilatazione termica) per le fasi α e γ.

Tabella 3.5: Deformazione termica in funzione della temperatura

T $[°C]$	$\epsilon_\alpha * 10^3$	$\epsilon_\gamma * 10^3$
20	0	-9
100	5,6320	
200	1,7112	
300	3,0302	
400	4,4782	
500	5,9582	
600	7,4602	
700	8,9832	
1200	15,9400	15,9400

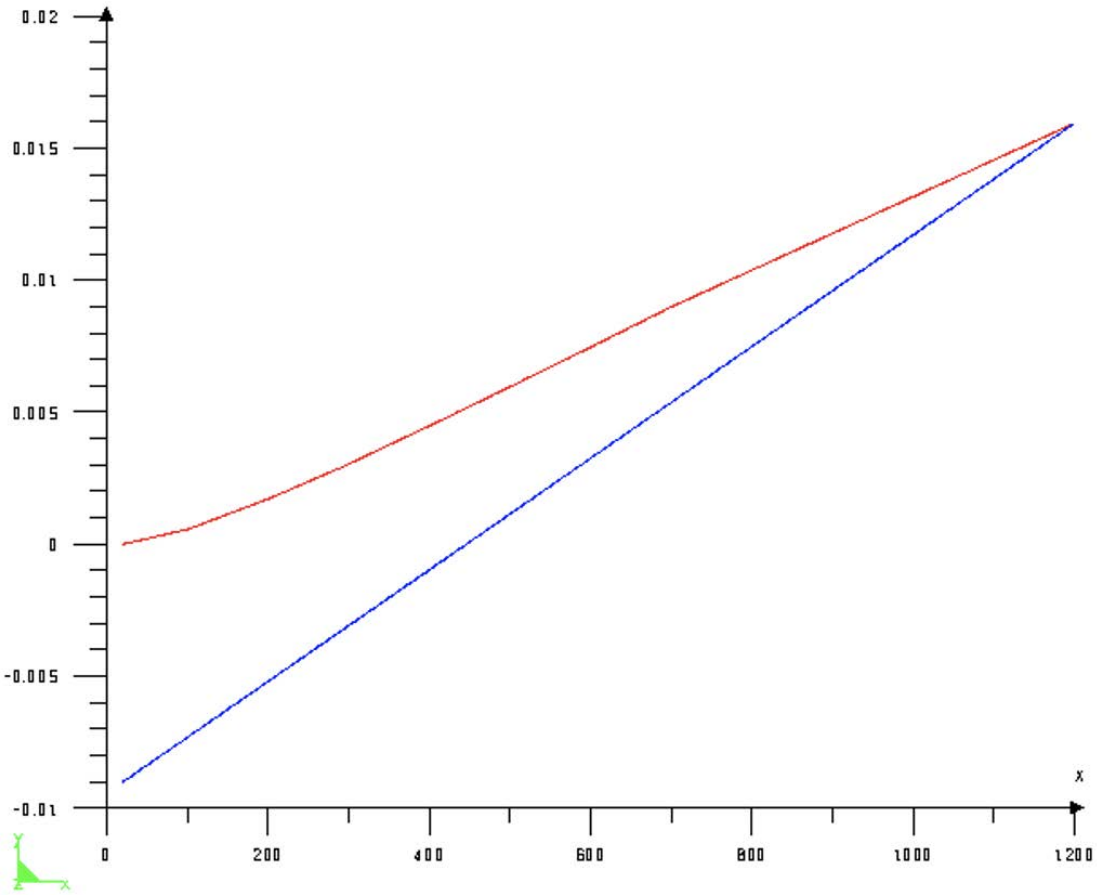


Figura 3.9: Deformazione termica in funzione della temperatura

Modulo di Young

Modulo di Young in funzione della temperatura.

Tabella 3.6: Modulo di Young in funzione della temperatura

T $[°C]$	$E[MPa]$
20	206900
200	180160
300	176980
400	168705
500	141970
600	133055
700	85560
800	53000
900	39000
1000	25000
1200	10500
1300	6250
1450	50

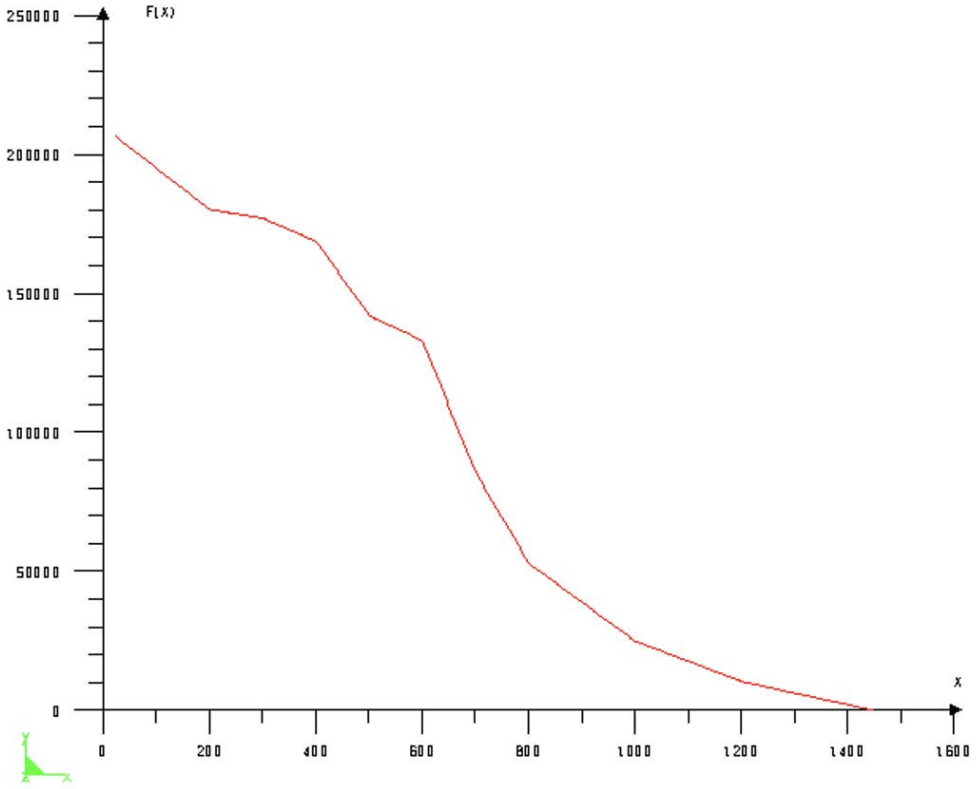


Figura 3.10: Modulo di Young in funzione della temperatura

Carico di snervamento

Carico di snervamento in funzione della temperatura per le diverse fasi $[MPa]$.

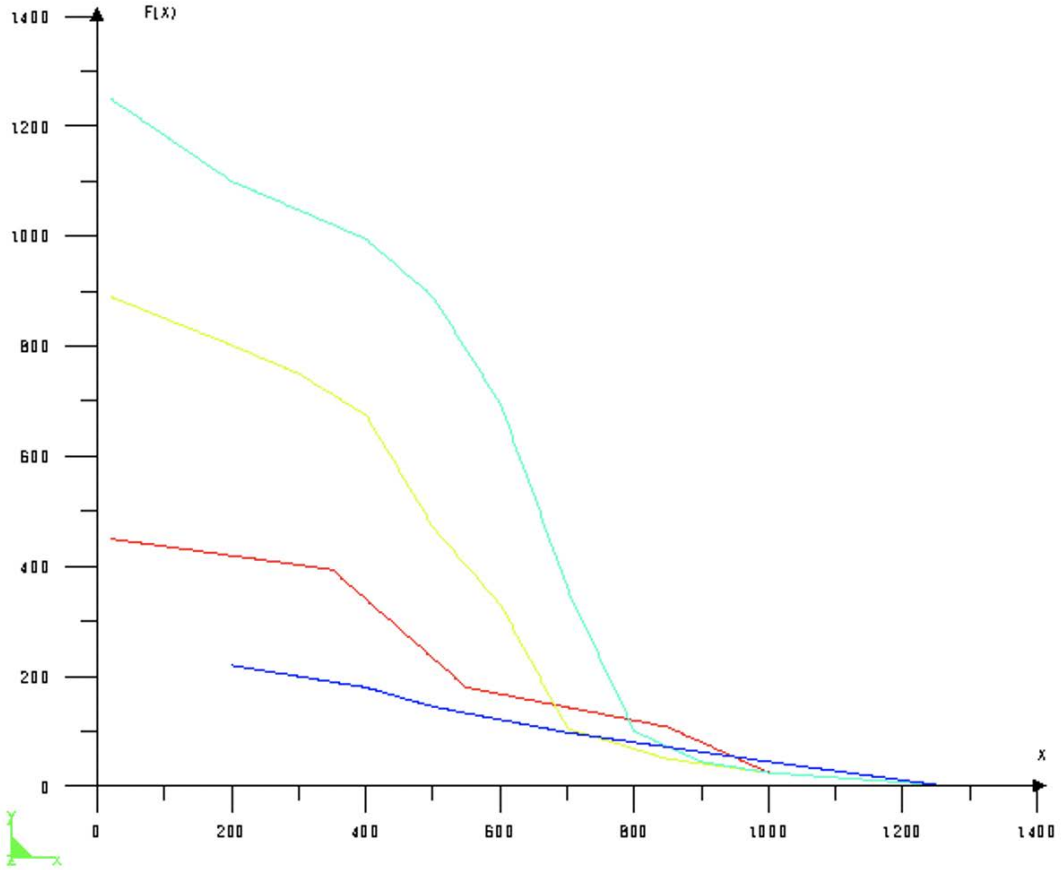


Figura 3.11: Carico di snervamento in funzione della temperatura

Dove:

* Blu: austenite;
* Rosso: ferrite e bainite rinvenuta;
* Giallo: bainite e martensite rinvenuta;
* Azzurro: martensite.

Coefficiente di Poisson

Il coefficiente di Poisson è costante per tutte le fasi al variare della temperatura $\mu = 0,3$.

Pendenza

Pendenza al variare della temperatura per le diverse fasi $[MPa]$.

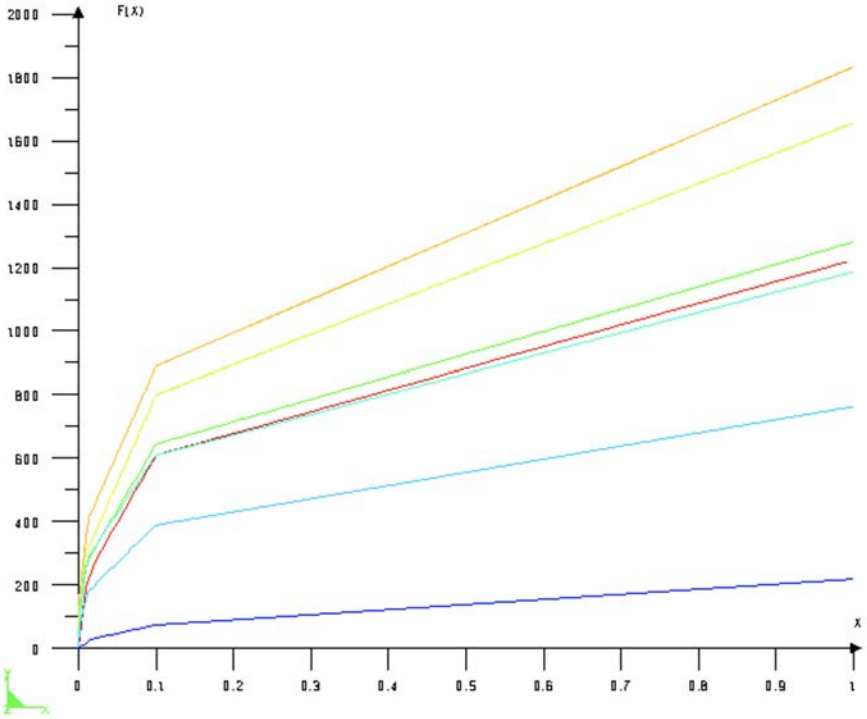


Figura 3.12: Slope delle fase α in funzione della temperatura

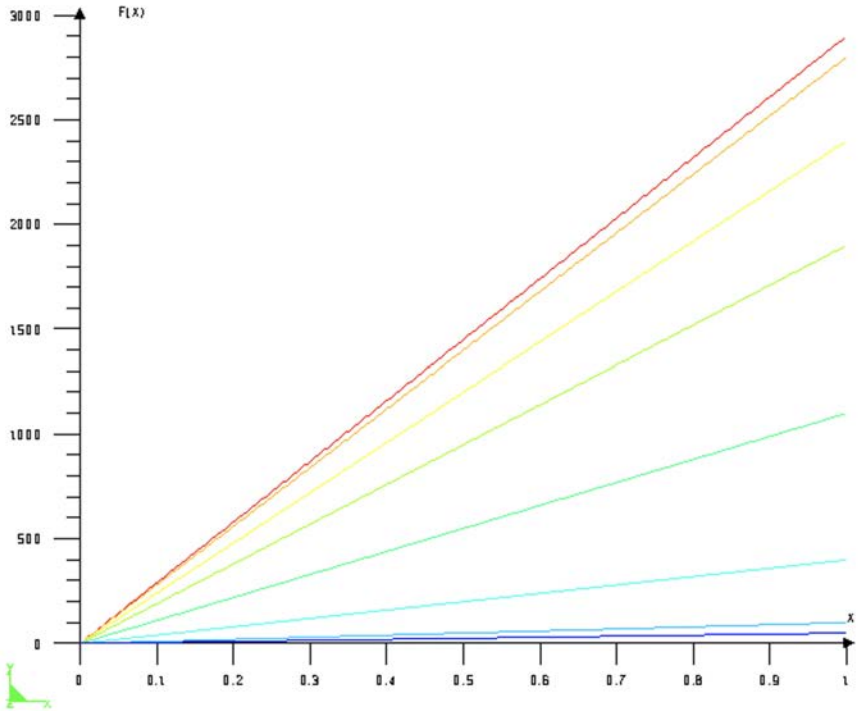


Figura 3.13: Slope delle fase γ in funzione della temperatura

Creep

Proprietà viscoelastiche in funzione della temperatura per tutte la fasi.

Tabella 3.7: Proprietà viscoelastiche in funzione della temperatura

T $[°C]$	$\log_{10}(K)$	n	H	$\log_{10}(C)$	P
400	-80,000	1,00	10	-1	1
482	-15,555	3,40	85000	-12,511	4
565	-15,000	4,11	29040	-15,511	7
650	-11,523	3,20	12000	-6,2218	1,9

3.3.3 Dati metallurgici

Diagramma CCT

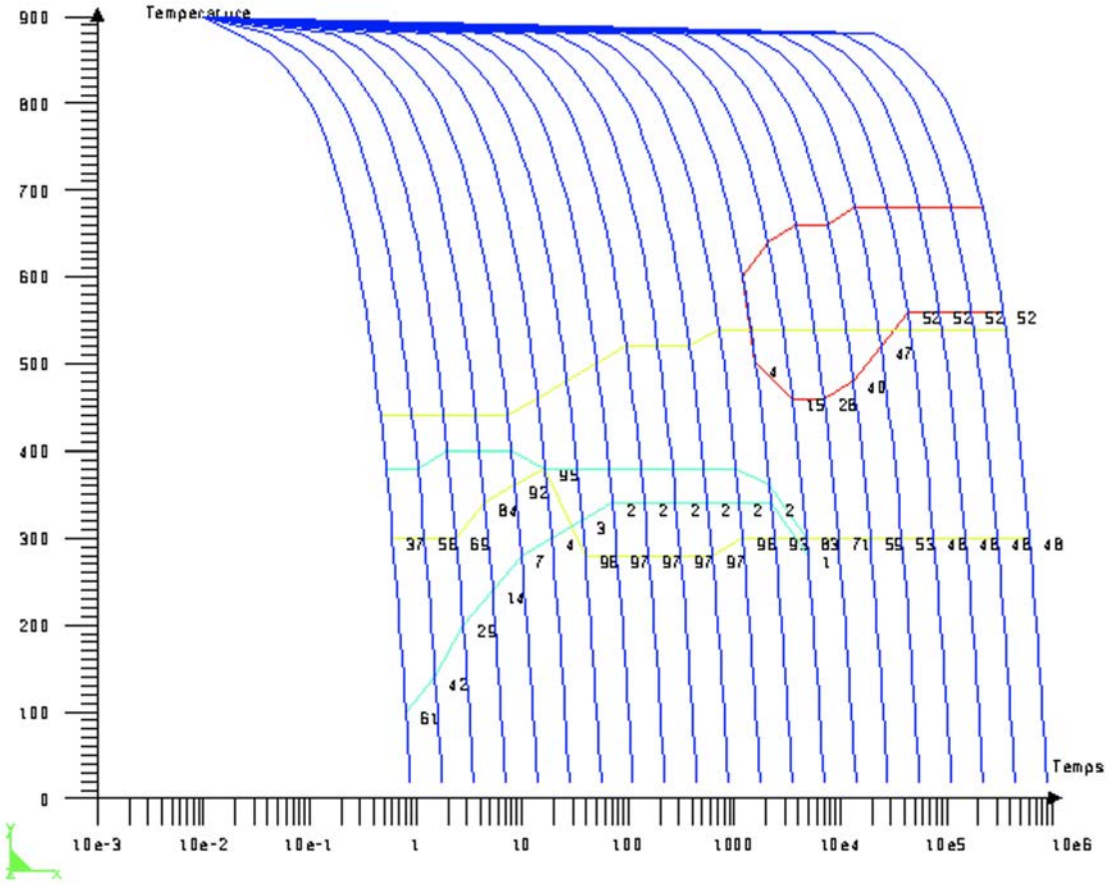


Figura 3.14: Diagramma CCT

Le sei fasi utilizzate sono:

* ferrite;
* bainite;
* martensite;
* bainite rinvenuta;
* martensite rinvenuta;
* austenite.

Capitolo 4

Analisi sperimentale

Per l'analisi sperimentale è stata necessaria una fornitura di acciaio $S355$.
L'acciaio acquistato è un $S355J2 + N$ come mostra la certificazione in figura 4.1.

Tabella 4.1: Composizione chimica

$C\%$	$Mn\%$	$Si\%$	$P\%$	$S\%$	$Cr\%$	$Ni\%$	$Mo\%$	$Cu\%$	$Sn\%$	$Al\%$	CEV
0,1900	1,2300	0,0290	0,0080	0,0024	0,0686	0,0638	0,0098	0,1930	0,0143	0,0298	0,4281

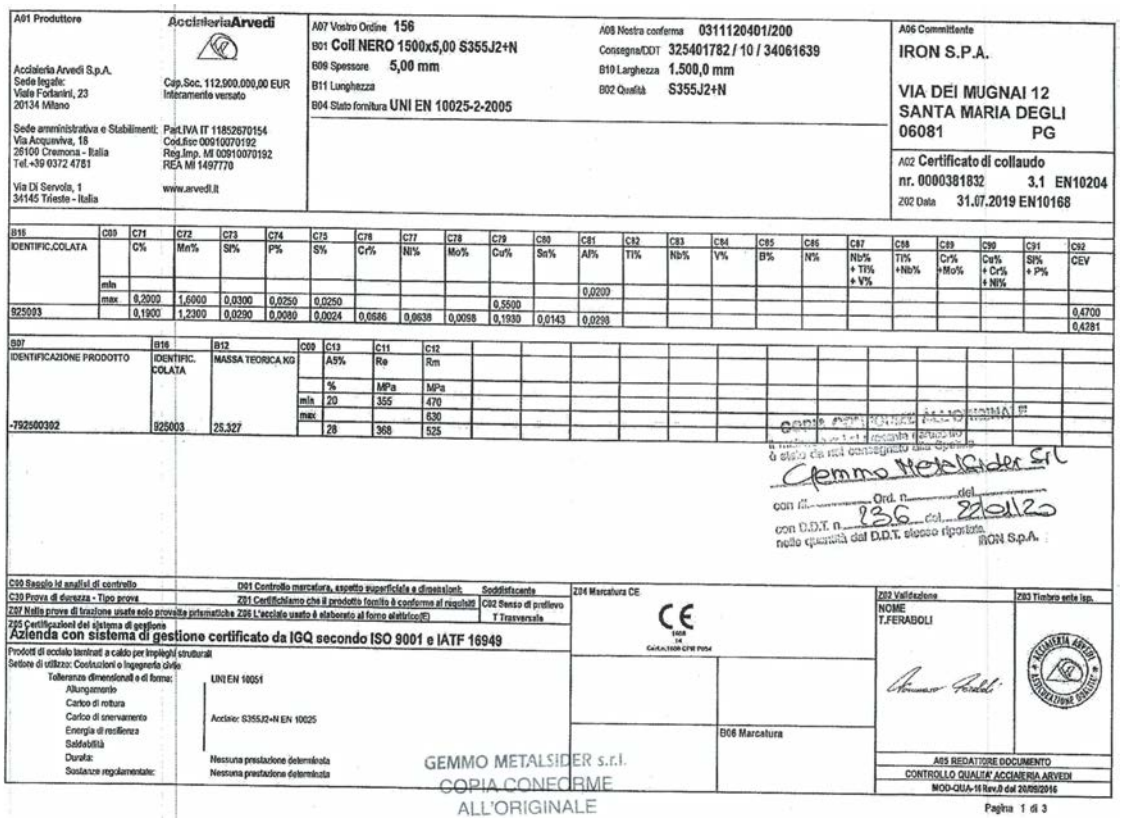


Figura 4.1: Certificazione acciaio

Una volta arrivata la lamiera è stato necessario tagliarla per ottenere i campioni che successivamente verranno saldati per ottenere i provini da analizzare.
Per tagliare la lamiera è stato utilizzato il taglio laser in modo da non deformare i lembi della lamiera che successivamente verranno saldati.

Figura 4.2: Piastre da saldare

La lamiera è stata divisa in piastre $100x200\ mm$ e $200x200\ mm$.

Figura 4.3: Piastre 100x200

Figura 4.4: Piastre 200x200

Prima di eseguire la saldatura, due coppie di campioni sono stati sottoposti ad un trattamento di detensionamento in modo da rimuovere eventuali tensioni residue, nate durante il processo di laminazione, che potrebbero causare deformazioni inattese durante la saldatura.
I provini sono stati messi in forno per un'ora e trenta a 300°, con il forno già caldo, e poi lasciati raffreddare in forno fino a temperatura ambiente.

4.1 Saldatura dei campioni

Una volta effettuato il detensionamento di due dei sei provini, le piastre sono state saldate con una saldatura MIG al fine di ottenere 6 giunti a T.
Durante la saldatura sono stati monitorati i parametri di processo al fine di individuare i dati di input per la simulazione numerica.
In particolar modo sono stati rilevati:

* tensione d'arco;
* intensità di corrente;
* velocità di saldatura.

4.1.1 Attrezzatura utilizzata

Per effettuare la saldatura sono stati utilizzati:

* una saldatrice con filo d'apporto del diametro di $1,2\ mm$;
* una miscela di gas 92% Argon e 8% anidride carbonica;
* una squadra per assicurarsi che le piastre fossero perfettamente perpendicolari;
* un casco per saldatura;
* un aspiratore per eliminare i fumi generati durante la saldatura;
* una videocamera;
* un calibro per saldature.

Figura 4.5: Saldatrice

4.1.2 Descrizione del processo

Inizialmente le piastre sono state assemblate e messe in squadra effettuando dei punti di saldatura agli estremi in modo da evitare che si generassero deformazioni inattese che potessero compromettere i risultati dell'analisi.

Figura 4.6: Puntatura

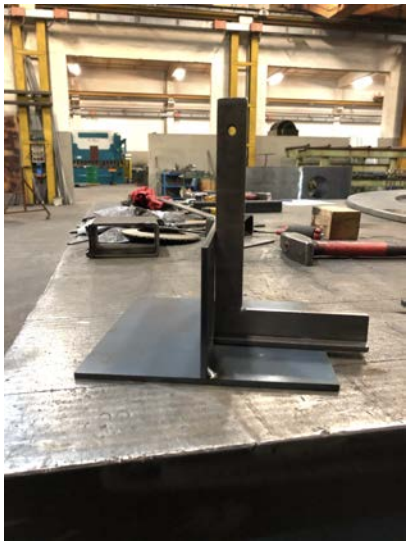


Figura 4.7: Messa in squadra

Dopo essersi assicurati che le piastre fossero perfettamente perpendicolari l'una all'altra è stato possibile iniziare la saldatura dei giunti monitorando i parametri di processo.

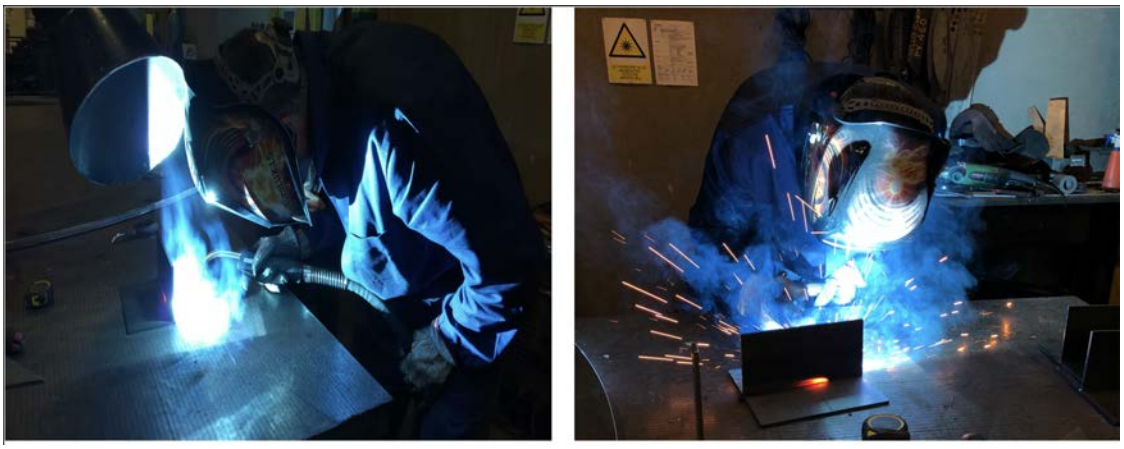


Figura 4.8: Saldatura dei giunti

Infine, dopo aver fatto raffreddare i giunti e dopo aver pulito i cordoni di saldatura, con l'ausilio di un calibro per saldature, è stato possibile misurare il cordone di saldatura.

Figura 4.9: Deformazione giunto

Figura 4.10: Misurazione cordone

4.1.3 Parametri di processo

Per monitorare i parametri di processo è stata utilizzata una videocamera con la quale sono stati eseguiti diversi filmati durante le saldature dei diversi giunti.
Analizzando i filmati è stato poi possibile definire la velocità di saldatura e le dimensioni del bagno di fusione.
Dopo diverse prove, l'operatore ha individuato la tensione e l'intensità di corrente ottimali per saldare piastre dello spessore di 5 mm.
I parametri di processo utilizzati sono:

* tensione d'arco: $29,8\ V$;
* intensità di corrente: $290\ A$;
* velocità del filo d'apporto $8,7\ m/min$
* velocità di saldatura: $5,8\ mm/s$.

Efficienza di trasmissione termica	η
MMA	0,8
MAG, tutti i tipi	0,8
SAW	1,0
TIG	0,6

Figura 4.11: Efficienza della trasmissione termica

4.2 Misurazione dei campioni

Dopo essere stati saldati i campioni sono stati misurati per rilevare la deformazione indotta dalla saldatura. Tali misurazioni verranno poi confrontate con i risultati forniti dalla simulazione numerica per valutare l'attendibilità di quest'ultima. Per effettuare la misura è stato utilizzato un'absolute arm ed un supporto per mantenere in posizione in campioni durante le rilevazioni.

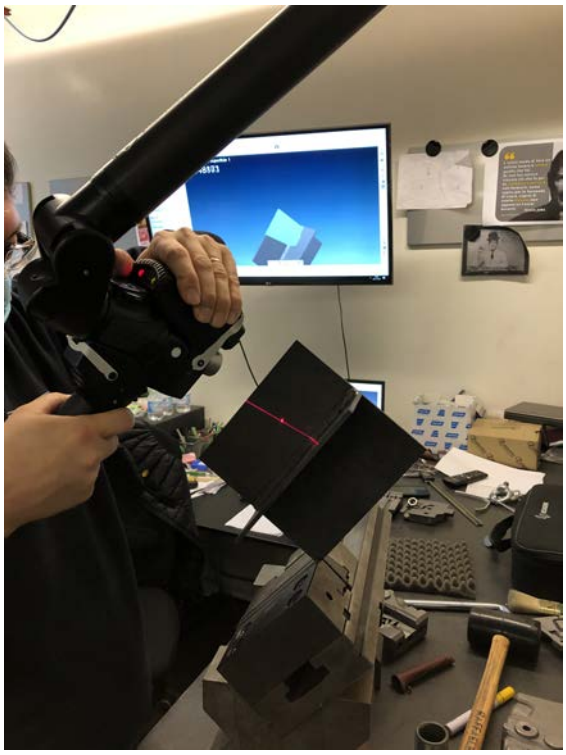


Figura 4.12: Misurazione provini

I campioni sono stati fissati e misurati con il braccio al fine di ottenere una nuvola di punti da poter elaborare via software. Una volta fatto ciò, utilizzando i punti rilevati, è stato possibile generare due piani e misurare l'angolo tra essi.

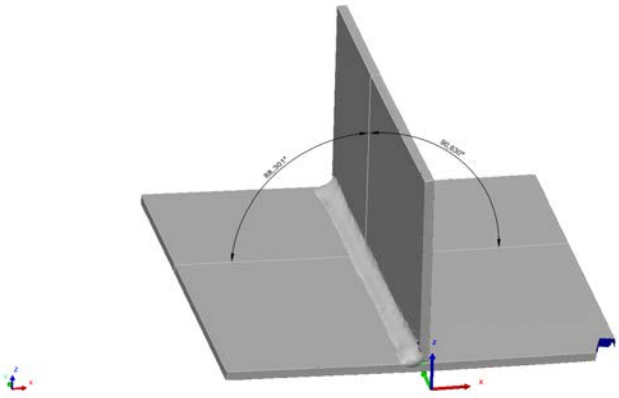


Figura 4.13: Analisi delle rilevazioni

4.2.1 Risultati della misurazione

Dalle misurazioni risultano i seguenti angoli per i 6 campioni.

Campione	Angolo tra le piastre	Deformazione
1	88,41°	1,59°
2	88,48°	1,52°
3	88,32°	1,68°
4	88,75°	1,25°
5	88,71°	1,29°
6	88,68°	1,32°

Figura 4.14: Deformazione dei campioni post saldatura

Si può notare che nonostante la saldatura sia stata eseguita manualmente vi è una buona ripetibilità nei risultati rilevati durante le misurazioni.

4.3 Analisi metallografica

Dopo aver misurato i campioni, uno di essi è stato sezionato per effettuare un'analisi metallografica tramite la quale sarà possibile analizzare la zona termicamente alterata e le fasi metallurgiche che si sono generate durante la saldatura.

4.3.1 Descrizione del processo

Per osservare al microscopio ottico la microstruttura del materiale è stato necessario lucidare la superficie del materiale in modo che risultasse esente da imperfezioni superficiali.
Inizialmente il provino è stato sezionato con una sega a nastro al fine di prelevare una porzione di materiale nella zona del cordone di saldatura.
Successivamente il materiale è stato inglobato a caldo nella resina fenolica al fine di facilitarne la manipolazione durante il processo di lucidatura.
I campioni sono stati lucidati tramite lappatura utilizzando dapprima carte abrasive con grana via via decrescente (P180 - P600 - P1200 - P2400) ed infine con pasta diamantata (6 μm e 1 μm).
Infine è stato effettuato un attacco chimico con il Nital 3 per poter osservare al microscopio le fasi che si sono generate.

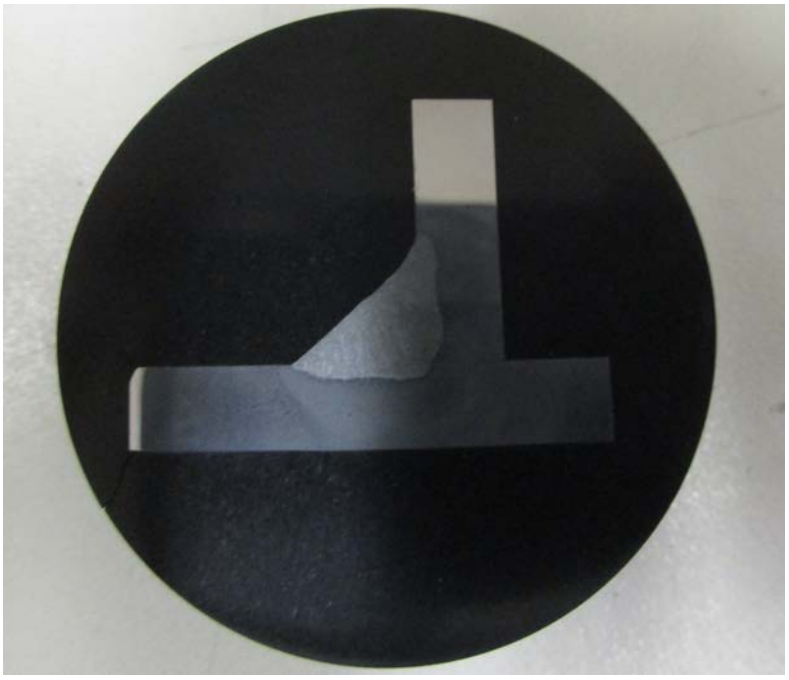


Figura 4.15: Campione

4.3.2 Risultati dell'analisi

In seguito sarà possibile vedere le strutture metallurgiche presenti nel metallo base, nella ZTA e nella ZF. In figura 2.16 è possibile vedere una panoramica della saldatura.

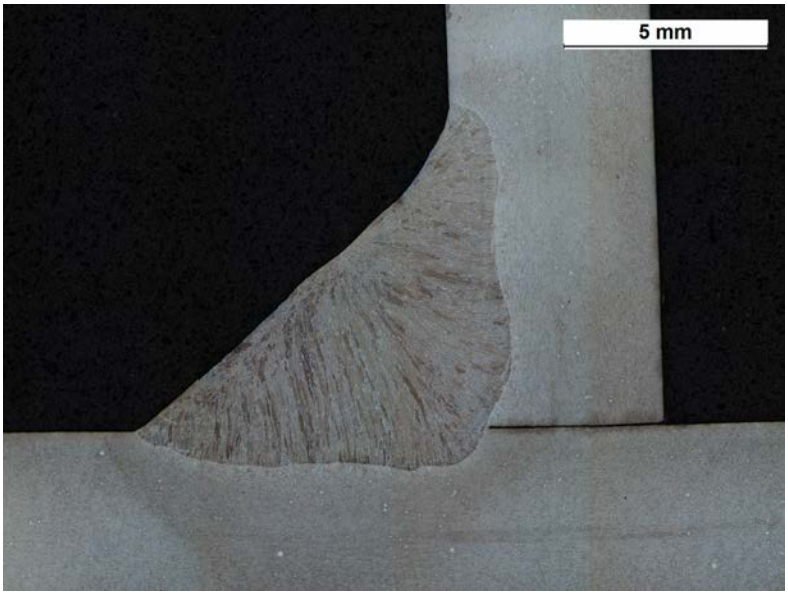


Figura 4.16: Panoramica della saldatura

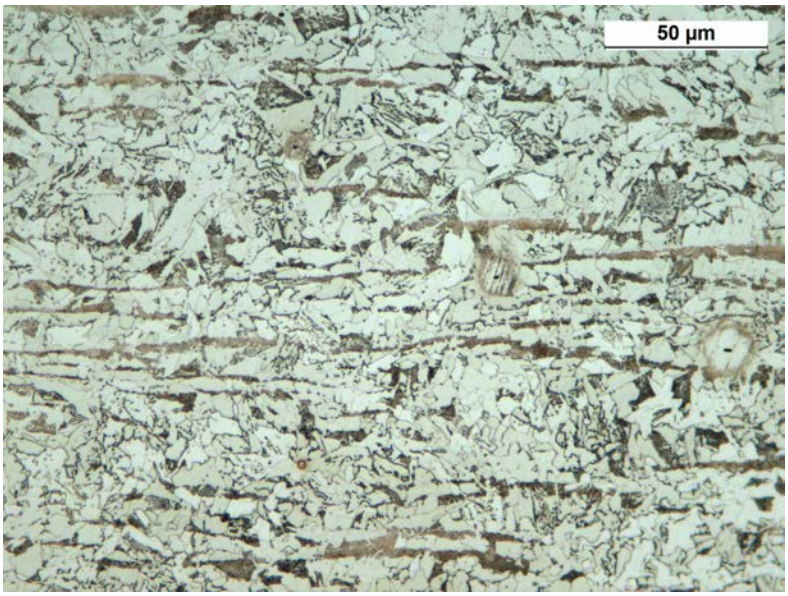


Figura 4.17: Metallo base

Nel metallo base è possibile notare una struttura ferritico-perlitica con i grani cristallini orientati nel verso di laminazione.

Nella zona termicamente alterata si può notare una struttura bainitica.
Tale struttura è dovuta alle elevate temperatura a cui è stata esposta questa zona che hanno comportato ad una trasformazione della struttura del metallo base.

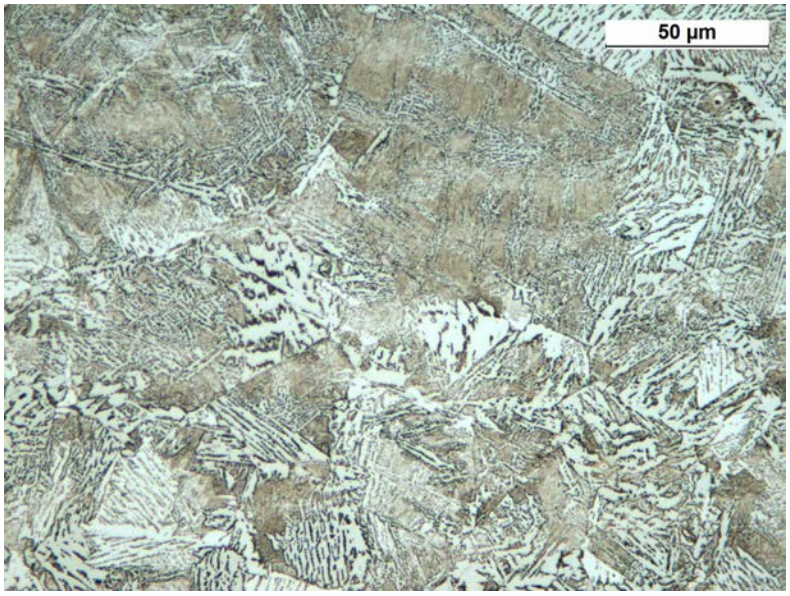


Figura 4.18: ZTA

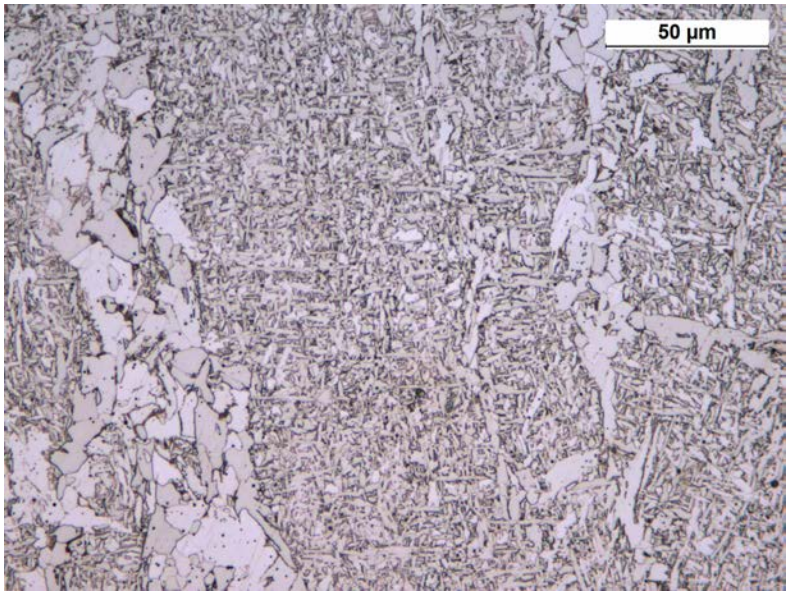


Figura 4.19: ZF

Infine nella zona fusa è possibile notare la formazione di ferrite aciculare.

4.4 Trattamento termico e misurazione

Infine due provini, uno precedentemente detensionato ed uno non detensionato, sono stati sottoposti ad un trattamento termico di distensione post saldatura. I campioni sono stati messi in forno per 3 ore ad una temperatura di 510° e successivamente lasciati raffreddare all'interno di esso. A questo punto i due provini sono stati misurati nuovamente per analizzare la riduzione delle deformazioni che ha comportato il trattamento termico.

Campione	Angolo tra le piastre	Deformazione
1	88,41°	1,59°
3	88,32°	1,68°

Figura 4.20: Deformazione dei campioni post trattamento

Come si può notare l'angolo tra le piastre è rimasto invariato dopo il trattamento termico.

4.5 Simulazione numerica

Dopo aver identificato le dimensioni del cordone di saldatura è stato possibile procedere alla creazione della mesh del modello 3D da analizzare.

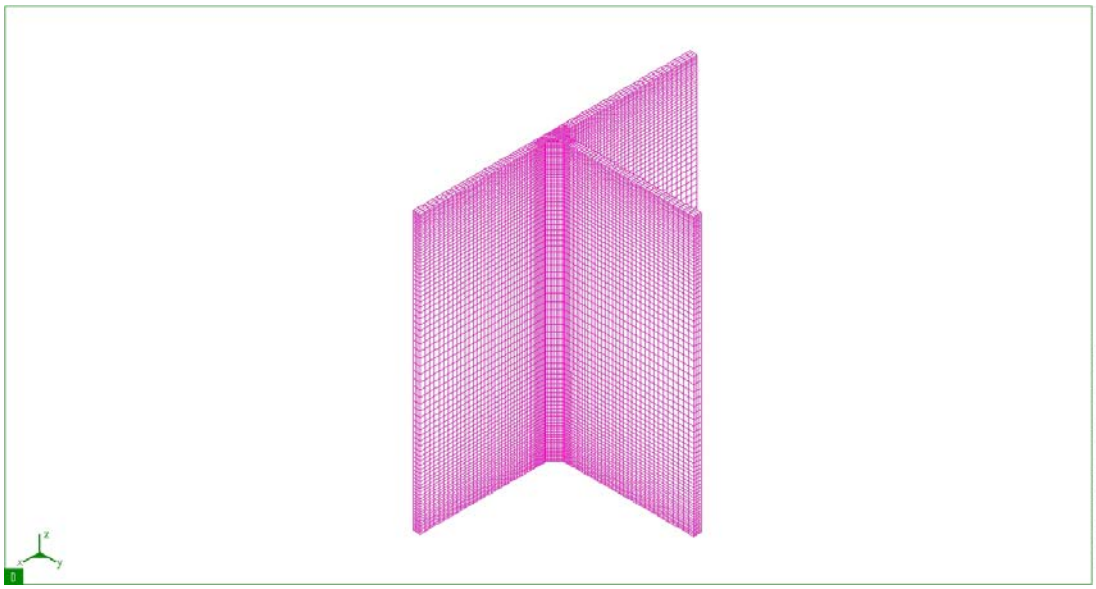


Figura 4.21: Mesh

Per la creazione della mesh sono stati utilizzati elementi esaedrici con funzioni di forma lineari.

Nelle prime fasi dell'analisi è stato necessario tarare la simulazione modificando i parametri della sorgente termica al fine di ottenere un bagno di fusione simile a quello reale.

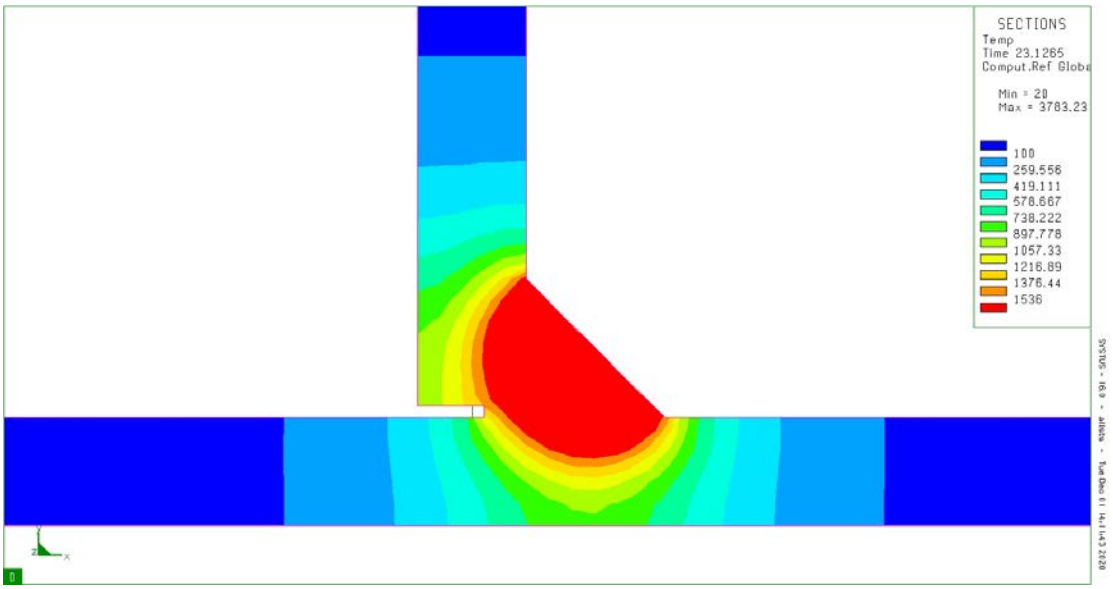


Figura 4.22: Zona fusa

Dopo alcuni tentativi il risultato ottenuto si poteva considerare soddisfacente.
In figura 4.23 è possibile vedere un confronto tra il bagno di fusione reale e teorico.

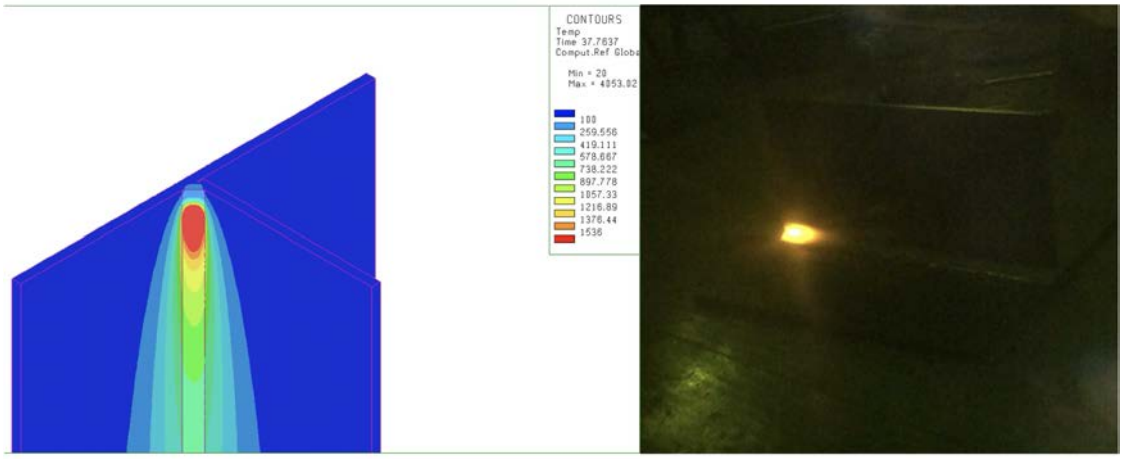


Figura 4.23: Bagno di fusione teorico e reale

4.5.1 Analisi termica

A questo punto è stato possibile procedere con l'analisi termica per identificare la struttura del giunto dopo la saldatura ed il trattamento termico.
Al termine della saldatura si può notare dalla figura 4.24 che il cordone di saldatura e la zona termicamente alterata hanno una struttura principalmente bainitica.

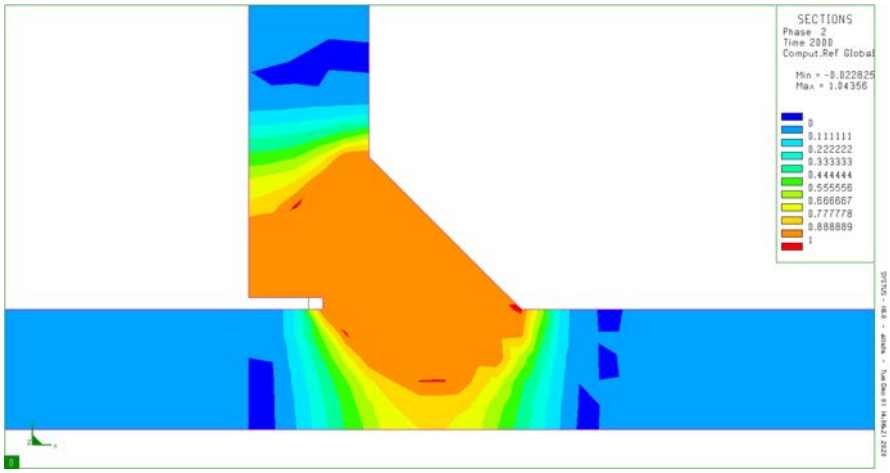


Figura 4.24: Sezione del giunto post saldatura

In figura 4.25 è possibile vedere la struttura del cordone lungo l'intero giunto saldato.

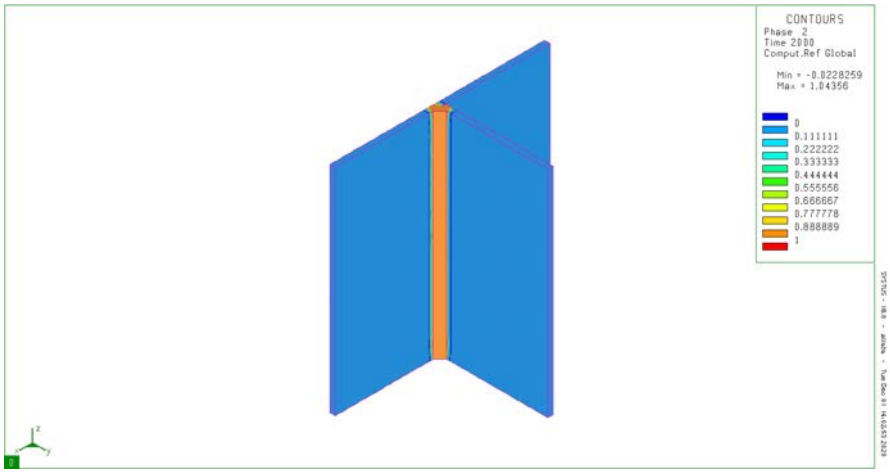


Figura 4.25: Giunto post saldatura

A questo punto è stato possibile procedere con il trattamento termico.
Dopo aver inserito l'andamento della temperatura in funzione del tempo (figura 4.26) è stato possibile procedere con la simulazione.

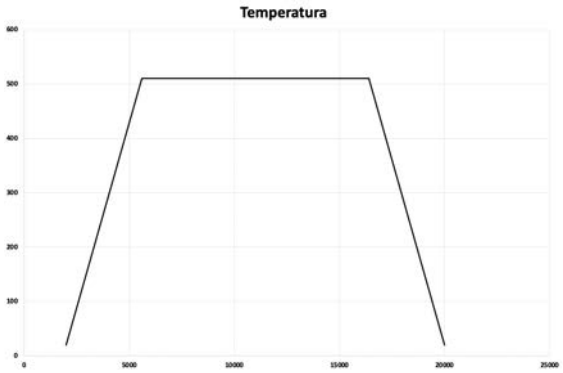


Figura 4.26: Andamento della temperatura in funzione del tempo

Al termine del trattamento si può notare dalla figura 4.27 che la bainite che si era generata durante la saldatura è rinvenuta completamente.

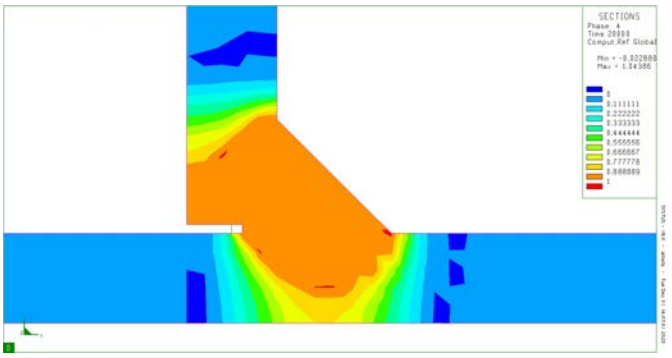


Figura 4.27: Sezione del giunto post trattamento

In figura 4.28 è possibile vedere la struttura del cordone lungo l'intero giunto saldato.

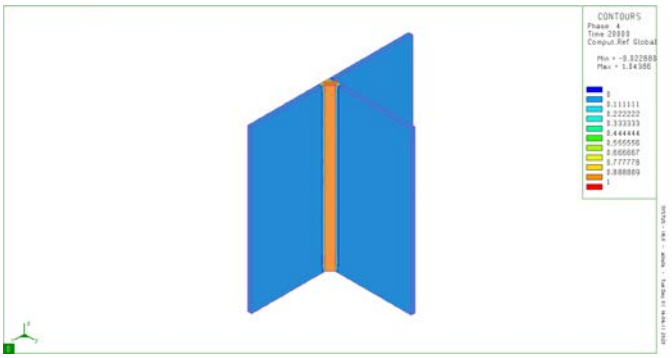


Figura 4.28: Giunto post trattamento

4.5.2 Analisi meccanica

Dopo aver concluso l'analisi termica è stato possibile procedere con l'analisi meccanica.
Per procedere con l'analisi meccanica è stato necessario definire i vincoli da applicare al modello.
I vincoli utilizzati sono quelli in figura 4.29.

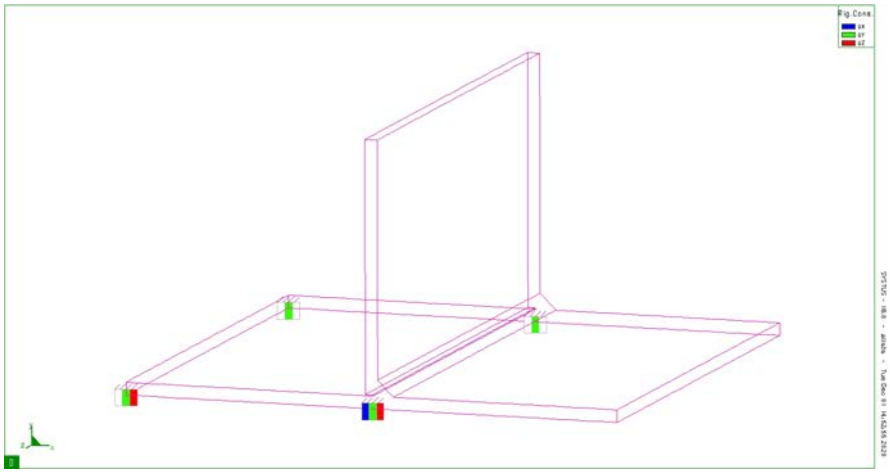


Figura 4.29: Giunto vincolato

Nello specifico sono stati vincolati 4 punti:

* FIX1: UY e UZ;
* FIX6: UX, UY e UZ;
* FIX6: UY;
* FIX6: UY.

In questo modo si è cercato di riprodurre una situazione il più possibile simile a quella reale.

Analisi delle deformazioni

Terminata la prima parte di simulazione in cui si effettuava la saldatura è stato possibile misurare gli spostamenti delle piastre e calcolare indirettamente l'angolo che si è generato tra esse (figura 4.30).

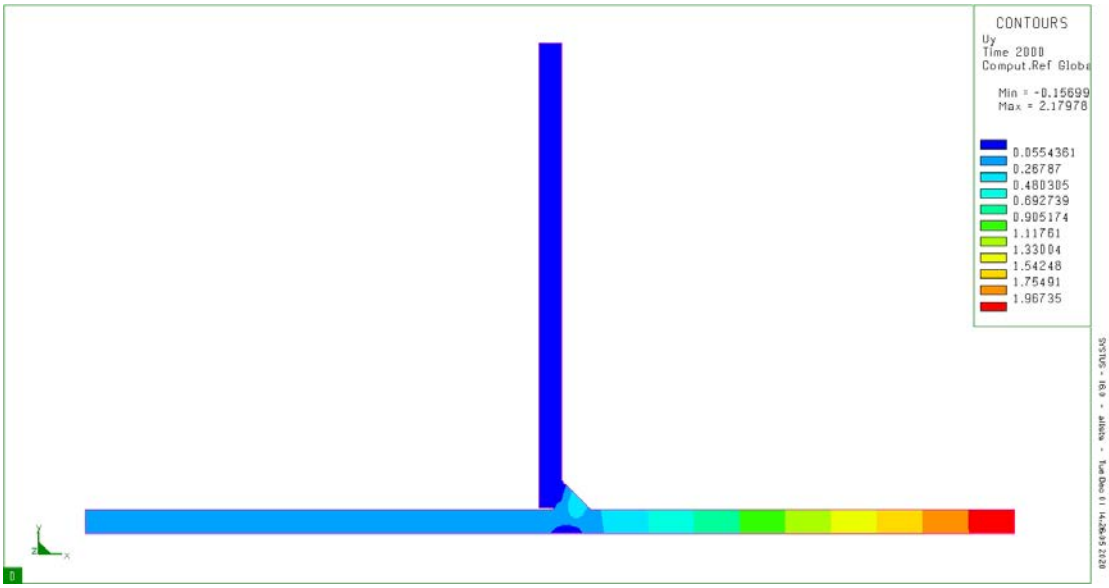


Figura 4.30: Deformazione del giunto post saldatura

In figura 4.31 è possibile vedere la deformata x5.

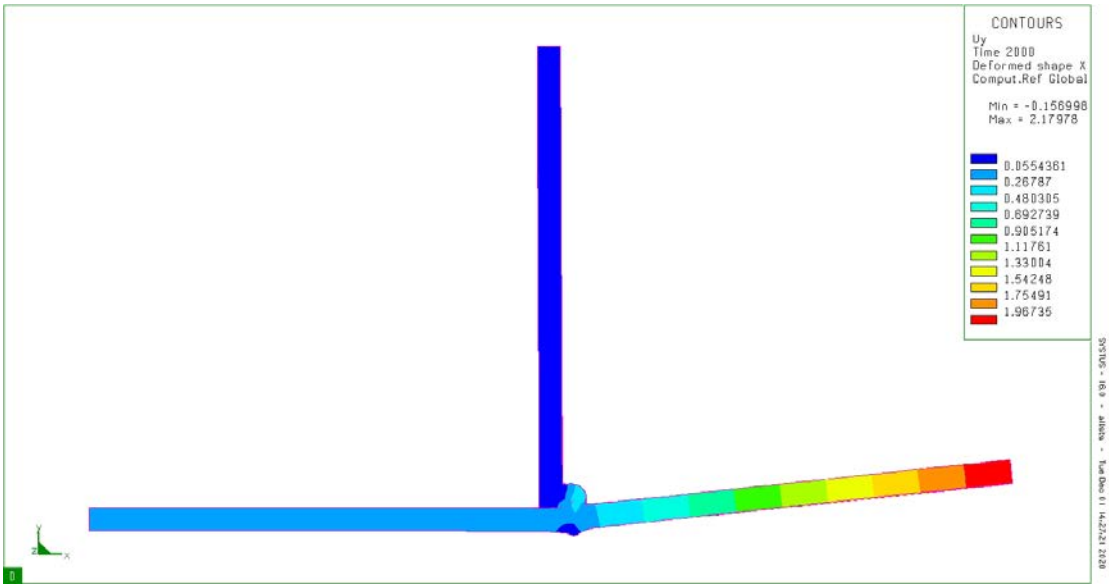


Figura 4.31: Deformata post saldatura x5

A questo punto è stato possibile procedere con la simulazione del trattamento termico e con la lettura dei risultati in modo analogo a quanto fatto per la saldatura.

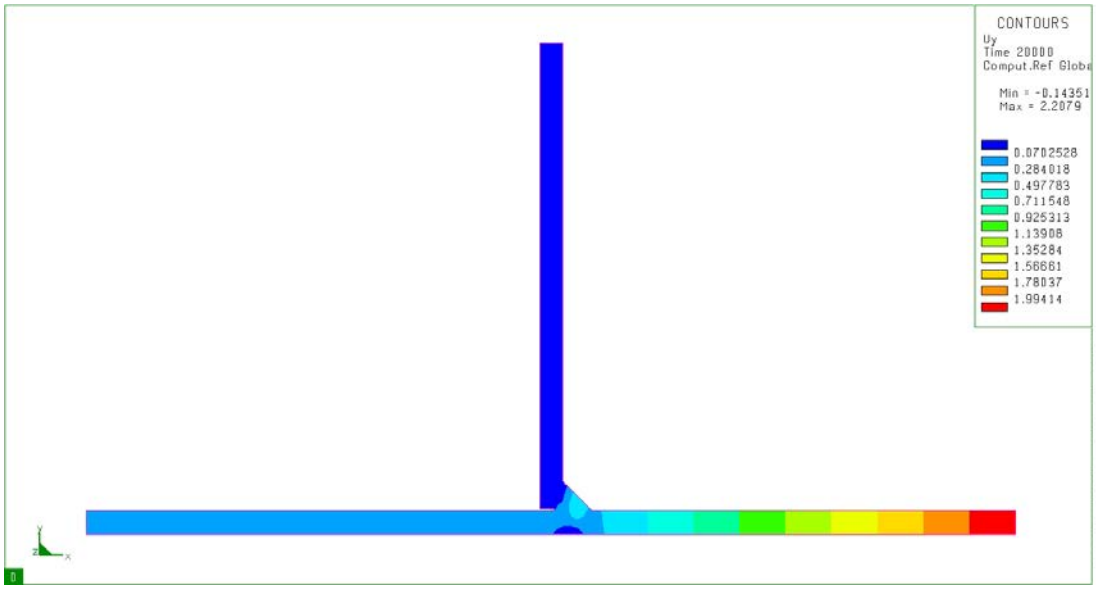


Figura 4.32: Deformazione del giunto post trattamento

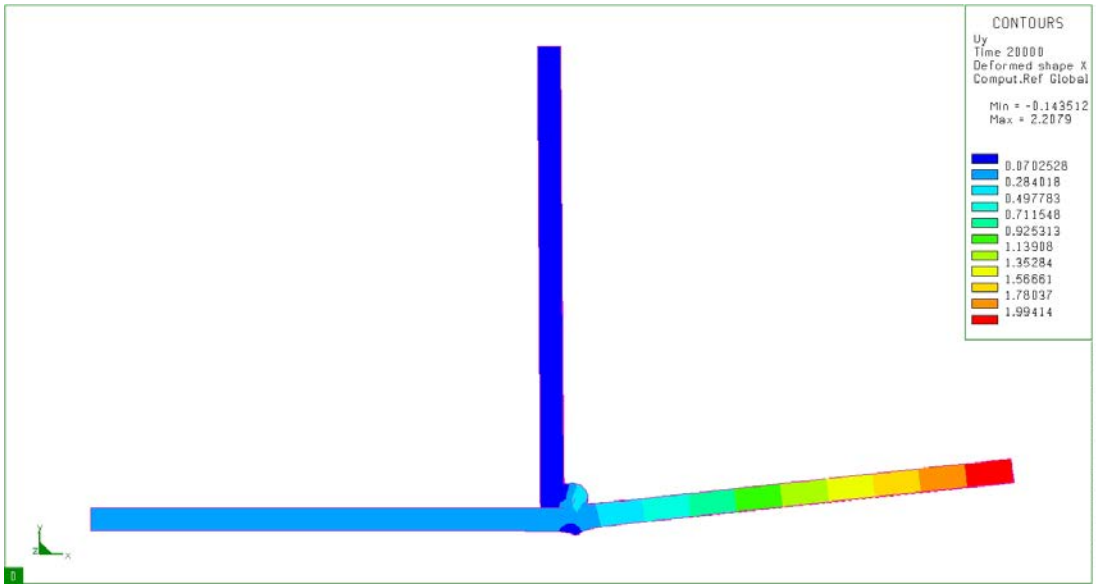


Figura 4.33: Deformata post trattamento x5

Analisi delle tensioni

Terminata la simulazione meccanica è stato possibile misurare anche le tensioni residue dopo la saldatura (figura 4.34) e dopo il trattamento (figura 4.35).

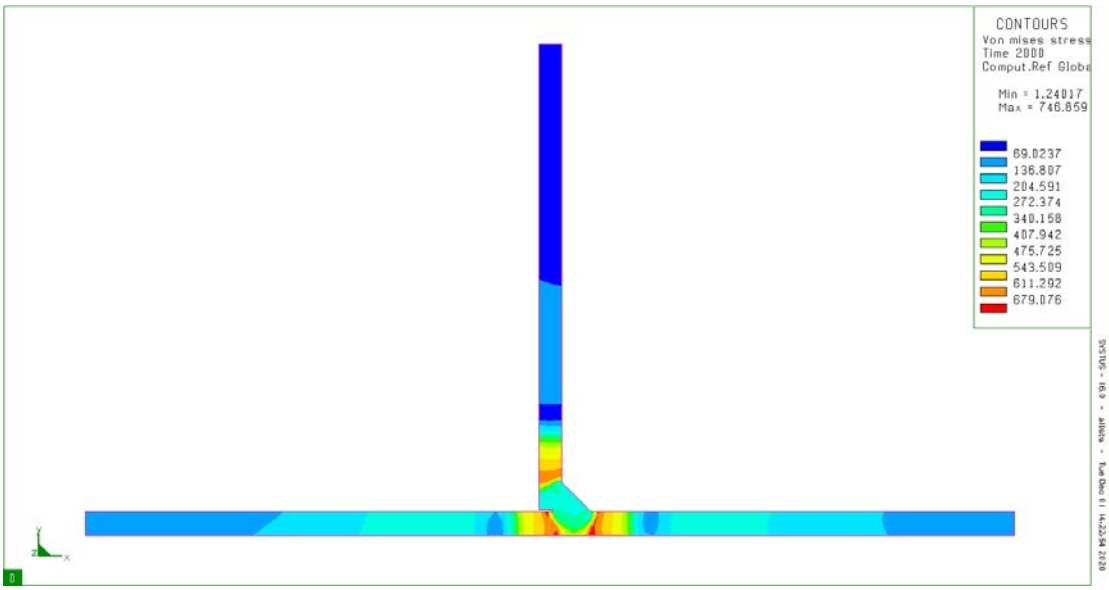


Figura 4.34: Tensioni residue post saldatura

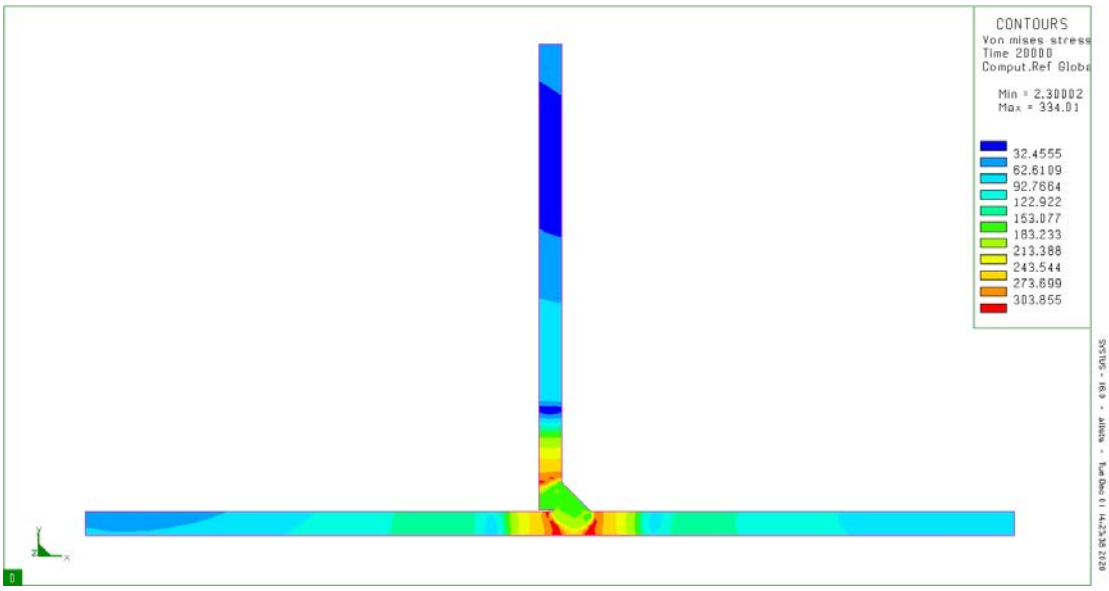


Figura 4.35: Tensioni residue post trattamento

Si può notare una riduzione delle tensioni residue all'interno del giunto dopo il trattamento termico.

Nel diagramma in figura 4.36 è possibile vedere l'andamento delle tensioni trasversali e longitudinali lungo la mezzeria del giunto.

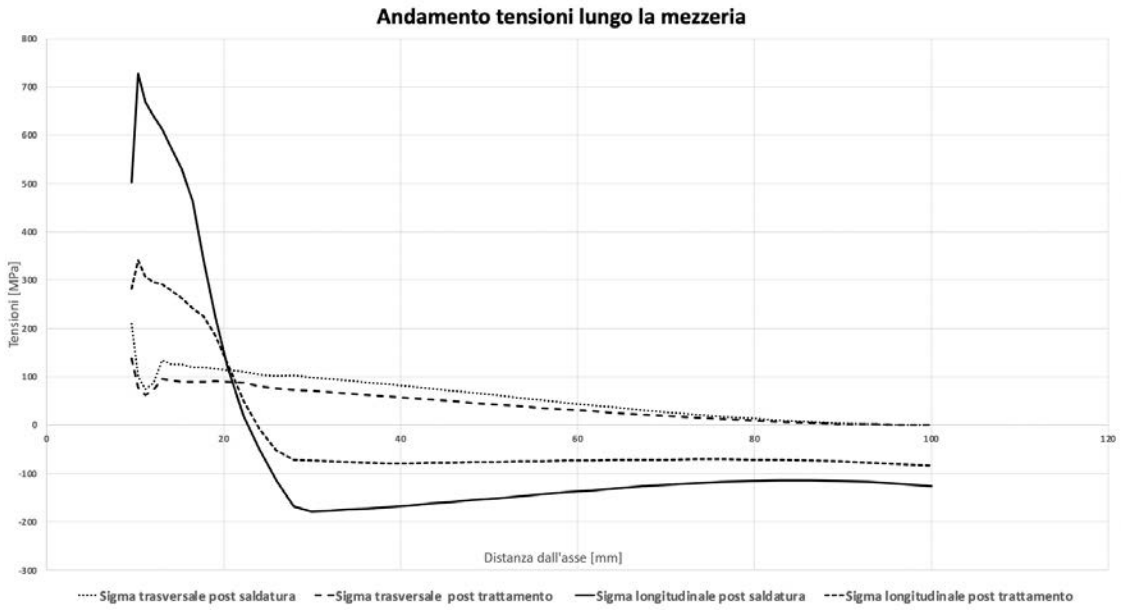


Figura 4.36: Andamento delle tensioni longitudinali e trasversali

Come si nota dal grafico, le tensioni trasversali, che agiscono perpendicolarmente al cordone, decrescono lungo la sezione trasversale al cordone di saldatura rimanendo però dello stesso segno. Al contrario, le tensioni longitudinali, che agiscono parallelamente al cordone di saldatura, lungo la sezione trasversale sono di trazione nel tratto più vicino al cordone mentre di compressione agli estremi.
Inoltre, le tensioni trasversali risultano di intensità minore minore rispetto alle tensioni longitudinali perché, nonostante le condizioni di autovincolo il ritiro trasversale riesce a manifestarsi con una certa entità, cosa che non accade per il ritiro longitudinale che quindi genera tensioni residue maggiori.
Infine si può notare un riduzione di tali tensioni dopo il trattamento termico.

4.6 Conclusioni

Terminate le analisi sperimentali e numeriche è stato possibile mettere a confronto i risultati.
Dal confronto dei risultati della simulazione termica con le sezioni metallografiche è possibile notare come la zona fusa, prevista dalla simulazione, corrisponda con la zona fusa dei provini (figura 4.37).

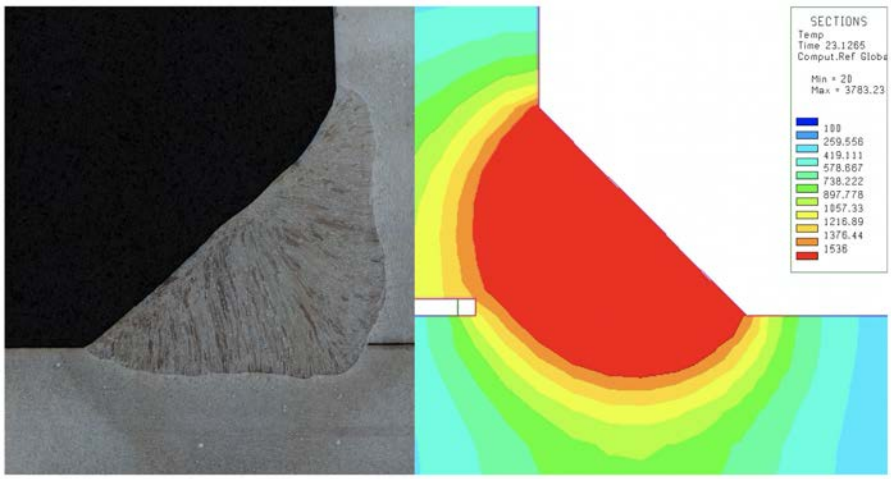


Figura 4.37: Confronto Zona Fusa teorica e reale

Per quanto riguarda la struttura metallurgica si può notare che il materiale base è caratterizzato da una struttura ferritico-perlitica, la ZTA è caratterizzata da una struttura bainitica mentre la ZF, al contrario di quanto previsto dalla simulazione non è caratterizzata da una struttura bainitica ma bensì è costituita da ferrite aciculare.

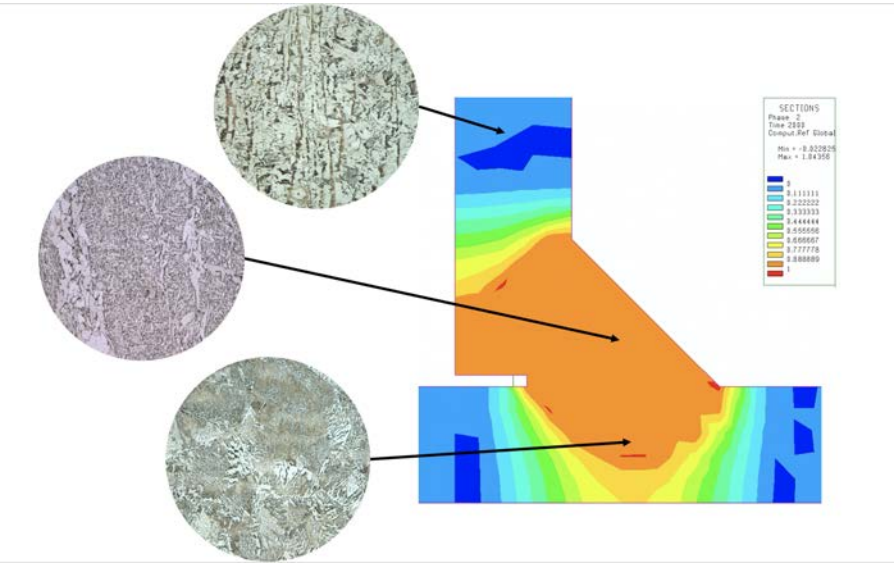


Figura 4.38: Confronto fasi teoriche e reali

Per quanto riguarda la deformazione delle piastre si ha un leggero scostamento dei risultati analitici rispetto a quelli reali (figura 4.39).
L'angolo tra le piastre, dopo la simulazione della saldatura, è $89,39°$ mentre l'angolo medio tra le piastre dei provini è $88,56°$.
Vi è quindi una lieve differenza di $0,83°$.

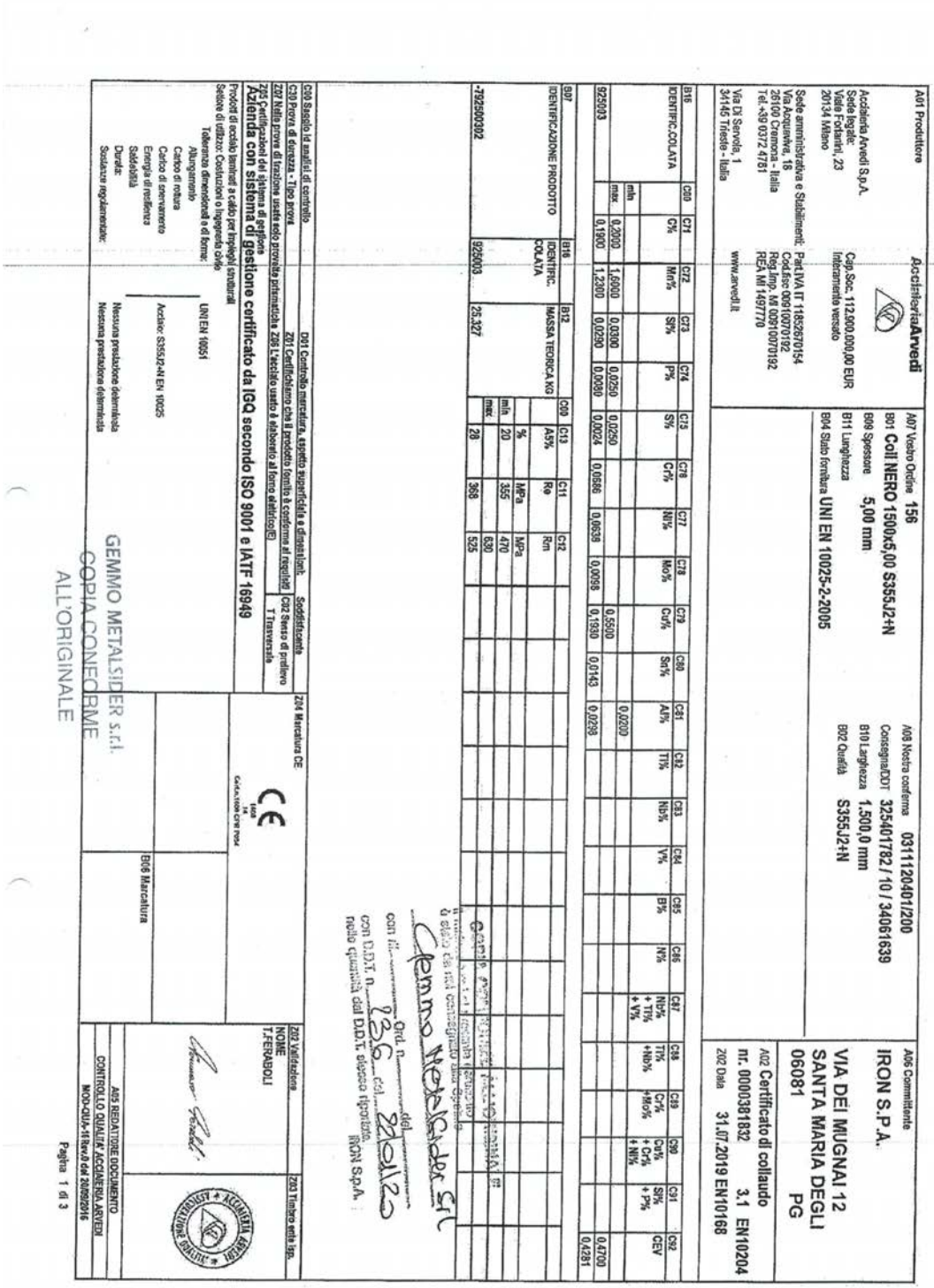
Campione	Angolo tra le piastre reale	Angolo tra le piastre teorico	Scostamento
1	88,41°	89,39°	0,98°
2	88,48°	89,39°	0,91°
3	88,32°	89,39°	1,07°
4	88,75°	89,39°	0,64°
5	88,71°	89,39°	0,68°
6	88,68°	89,39°	0,71°

Figura 4.39: Confronto tra gli angoli reali e l'angolo teorico

Dopo la simulazione del trattamento termico l'angolo tra le piastre rimane invariato a $89,39°$ quindi rimangono invariate anche le differenza con gli angoli reali.
Il trattamento termico infatti non aveva comportato una variazione dell'angolo reale tra le piastre del provino e quindi si può dire che la simulazione dia risultati in linea con quelli reali.
Infatti, nonostante non vi sia una variazione della deformazione, l'analisi numerica prevede comunque una riduzione delle tensioni residue che rispecchia il risultato desiderato da un trattamento di distensione.
Inoltre l'andamento delle tensioni trasversali e longitudinali lungo la sezione trasversale è concorde con l'andamento reale di tali tensioni.

Appendice A

Certificato



DICHIARAZIONE DI PRESTAZIONE CE [n°. 0000381832]
EC DECLARATION OF PERFORMANCE [n°. 0000381832]

CE
1608
12
Cert.n.1608 CPR P054

1.Codice di identificazione del prodotto tipo: **rotoli e nastri laminati a caldo per impieghi strutturali, secondo le norme UNI EN 10 10025-2 e UNI EN 10025-5**

Identification code of product type: **hot rolled coils and strips of structural steels according to standard UNI EN 10025-2 and UNI EN 10025-5**

Dimensioni: **spessore da 1,2 a 12,0 mm; larghezza da 100 a 1600 mm**
Dimensions: **thickness 1,2 - 12,0 mm; width 100 - 1600 mm**

2. Numero di tipo, lotto, serie o elemento di identificazione del prodotto da costruzione ai sensi dell articolo 11, paragrafo 4:
Type, batch or serial number or any element allowing identification of construction product as required under article 11(4):

In accordo con no.lotto e numero colata indicato sul certificato di collaudo
In agreement with lot number and heat number indicated on the test certificate

Partita	Colata
792500302	925003

3.Uso o usi previsti dal prodotto da costruzione, conformemente alla relativa specifica armonizzata, come previsto dal fabbricante:
Intended use or uses of the construction product in accordance with the applicable harmonised technical specification, as foreseen by manufacturer:

Acciaio laminato a caldo per usi strutturali - Hot rolling steel for structural uses

4. Nome, denominazione commerciale registrata o marchio registrato e indirizzo del fabbricante ai sensi dell' articolo 11, paragrafo 5:
Name, registered trade name or registered trademark and contract address of manufacturer as required pursuant Article 11(5):

Acciaieria Arvedi S.p.A - via Acquaviva,18 - 26100 Cremona (ITALIA)

5. Se opportuno, nome e indirizzo del mandatario il cui mandato copre i compiti cui all' articolo12, paragrafo 5:
Name and contact address of the authorised representative whose mandate covers the tasks specified in article12(5):

Non applicabile - Not applicable

6. Sistema o sistemi di valutazione e verifica della costanza di prestazione del prodotto da costruzione di cui all'allegato V alla EU 305-2011:
System pr systems of assessment and verification of constancy of performance of the construction product as set in EU-regulation 305-2011 annex V:

System 2+

7. Dichiarazione di prestazione relativa al prodotto da costruzione cherientra nell'ambito della norma armonizzata:
Declaration of performarice concerning construction product covered by a harmonised standard:

Ente di certificazione: **I.G.Q. viale Sarca, 223 - 20126 Milano (ITALIA)**
Certification Body

Numero del certificato FPC: **1608 CPR P054**

Number of FPC certificate

Ispezione iniziale dello stabilimento. Determinazione del prodotto tipo in base a prove di tipo (compreso campionamento). Sorveglianza, valutazione e verifica continua del controllo della produzione di fabbrica secondo l'allegato ZA della EN 10025-2005.
Performed the initial inspection of the manufacturing plant and factory production control and the continuous surveillance, assessment and evaluation of factory production control and issued the certificate of conformity of the factory production control in accordance with annexZA of EN 10025-2005.

8. Caso di dichiarazione di prestazione relativa a un prodotto da costruzione per il quale è stata rilasciata una valutazione tecnica europea:
Declaration of performance concerning construction product covered by European technical evaluation:

Non applicabile - Not applicable

9. Prestazione dichiarata:
Declared performance:

Caratteristiche essenziali Essential characteristics	Prestazioni Performance	Specifica tecnica armonizzata Harmonised technical specification
Tolleranza Dimensionali	EN 10051-2010	EN 10025-1:2005
Allungamento	EN 10025-2:2005 p. 7.3.1	
Carico di Snervamento o Rottura	EN 10025-2:2005 p. 7.3.1	
Resilienza	EN 10025-2:2005 p. 7.3.2	
Saldabilità	EN 10025-2:2005 p. 7.2.3 + 7.4.1	
Durabilità	EN 10025-2:2005 p. 7.2.1 + 7.4.3	

10. La prestazione del prodotto di cui ai punti 1 e 2 è conforme e alla prestazione dichiarata di cui al punto 9:
The performance of the product identified in point 1 and is in conformity with the declared performance in point 9.

Si rilascia la presente dichiarazione sotto la responsabilità esclusiva del fabbricante di cui al punto 4.
This declaration is issued under the sole responsability of manifactured identified in point 4.

A nome e per conto Acciaieria Arvedi S.p.A :
Signed for and on behalf of Acciaieria Arvedi S.p.A

Cremona, 31.07.2019

Fabio Baldrighi (Managing Direction)

MOD-QUA-16 Rev.0 del 20/09/2016

Pagina 3 di 3

Figura A.1: Certificato dell'acciaio

Bibliografia

Riferimenti bibliografici

Bonollo, F. *Appunti di Prodotti Metallurgici Innovativi e Multi-Funzionali*. AG Servizi, 2019.

F. Bonollo P. Ferro, G. Timelli. *Appunti di Materiali Metallici*. Libreria Progetto, 2016.

Group, ESI. *Sysweld 2014 Reference Manual*. ESI Group, 2014.

Serope Kalpakjian, Steve R. Schmidt. *Tecnologia Meccanica*. Pearson Prentice Hall, 2014.

Timelli, G. *Appunti di Materiali Metallici e Trattamenti Termici*. AG Servizi, 2017.