



DE Department of
Engineering
Ferrara

CONFIDENTIAL

Appunti

Metallurgia II

CONFIDENTIAL

DE

Department of Engeneering Ferrara

Via Saragat 1, 44122 Ferrara

<https://de.unife.it>

Università degli Studi di Ferrara

Via Ludovico Ariosto, 35 - 44121 Ferrara

<https://www.unife.it>

Revisioni

Revisione	Data	Autori	Descrizione
1.0	29.01.2021	XX YY	document created
1.1	06.03.2023	LN	Prima compilazione con modifiche
1.2	15.03.2023	LN	Completamento Capitolo 1

Università degli Studi di Ferrara

[XX] Dr. Name Surname - name.surname@xxx.com

[YY] Dr. Name Surname - name.surname@xxx.com

[LN] Lorenzo Nicolè - lorenzo.nicole@edu.unife.it

Indice

Indice	i
Elenco delle figure	iv
Elenco delle tabelle	v
Todo list	vi
I Introduzione	1
1 Classificazione e Designazione degli acciai	2
1.1 La normazione	2
1.1.1 Acciai non legati	3
1.1.1.1 Di Qualità	3
1.1.1.2 Speciali	3
1.1.2 Acciai inossidabili	4
1.1.3 Acciai legati	5
1.1.3.1 di Qualità	5
1.1.3.2 Speciali	5
1.2 La norma UNI EN 10027-1:2016	5
1.2.1 UNI EN 10027-1 gruppo 1:2016	5
1.2.2 UNI EN 10027-1 gruppo 2:2016	8
1.2.2.1 Sottocategoria 2.1	8
1.2.2.2 Sottocategoria 2.2	8
1.2.2.3 Sottocategoria 2.3	9
1.2.2.4 Sottocategoria 2.4	9
1.3 La norma UNI EN 10027-2	10
1.4 Cenni alla normativa AISI	12
1.4.1 Acciai al carbonio o basso legati	12
1.4.2 Acciai legati, ma soprattutto inox	12
1.5 Considerazioni generali	12
II Acciai da costruzione	14
2 Acciai per impieghi strutturali	15
2.1 UNI EN 10025-(3-6) Prodotti laminati a caldo	16
2.2 Acciai resistenti alla corrosione atmosferica	17
2.3 Acciai ad alta resistenza (HSS e AHSS)	18
2.3.1 Meccanismi di rinforzo	18
2.4 HSLA	20
2.4.1 Ferritico-Perlitici ad alta resistenza	21
2.4.2 Ferritico-Perlitici ad alta resistenza e alta tenacità	21

2.4.3	Acciai a basso tenore di C con struttura aciculare	24
2.4.4	Dual Phase	28
2.4.5	Acciai TRIP	29
2.4.6	Acciai TWIP	30
2.4.7	Q&P	30
3	Acciai Speciali da Costruzione	33
3.1	Acciai speciali da costruzione propriamente detti	33
3.1.1	Acciai da Bonifica	34
III	Acciai Inossidabili	35
3.2	Acciai inossidabili austenitici	36
3.2.1	Tattamenti termici applicabili	36
3.2.1.1	Trattamento di distensione	36
3.3	Acciai inossidabili ferritici	37
3.3.1	Trattamenti termici	37
3.3.1.1	Ricottura di ricristallizzazione	37
3.3.1.2	Acciai ferritici ELI	38
3.4	Acciai inossidabili Martensitici	38
3.4.1	Trattamenti termici	38
3.5	Acciai inossidabili PH	38
3.5.1	Trattamenti termici	39
3.5.2	Acciai PH Martensitici	40
3.5.3	Acciai PH Austenitici	40
3.5.4	Acciai PH Semi-Austenitici	41
3.5.5	Considerazioni conclusive	41
3.6	Acciai Inossidabili Duplex	42
3.6.1	Trattamento termico per i duplex	42
IV	Acciai per utensili	44
4	Acciai da utensile	45
4.1	Trattamenti termici	47
V	Ghise	49
5	Ghise	50
5.1	Il materiale	51
5.2	Fattori di influenza	52
5.2.1	Il carbonio equivalente	52
5.2.2	Solidificazione e raffreddamento	53
5.2.3	Inoculazione	53
5.3	Solidificazione e raffreddamento	54
5.4	Classificazione delle ghise	55
5.4.1	Classificazione della grafite	55
5.4.2	Classificazione della matrice	56
5.4.3	Classificazione complessiva	56
5.5	Ghise bianche	57
5.6	Ghise grigie	57
5.7	Ghise Sferoidali	58

5.7.1	Produzione della ghisa	58
5.7.2	La sferoidizzazione	58
5.7.3	Designazione ghise sferoidali	58
5.7.4	Trattamenti termici	59
5.8	Ghise malleabili	59
5.8.1	Trattamento di malleabilizzazione	60
5.8.2	Designazione ghise malleabili	60
5.9	Ghise legate	60
5.9.1	Designazione ghise legate	61
VI Leghe non ferrose		62
6 Alluminio e leghe per impieghi industriali		63
6.1	Caratteristiche meccaniche	64
6.2	Classificazione delle leghe di alluminio	64
6.2.1	Normative di riferimento	65
6.2.1.1	Normative europee	66
6.2.1.2	Normative americane	68
6.2.2	Normative sulla base dei TT	69
6.2.3	Principali alliganti	70
6.2.3.1	Sistema Al-Si	70
6.2.3.2	Sistema Al-Cu	71
6.3	Meccanismo di precipitazione	71
VII Appendici		73
A High Entropy Alloys		74
B Trattamenti termici		76
B.1	Filiera prodotto acciaio	76
C Considerazioni aggiuntive sulla UNI EN 10020		77
C.1	Tipologie di acciai non legati speciali	77
C.2	Tipologie di acciai legati di qualità	77
C.3	Tipologie di acciai legati speciali	78
D Considerazioni aggiuntive sugli acciai da costruzione		79
D.1	Acciai effervescenti e calmati	79
D.2	Considerazioni sugli HSLA	79
E Acronimi		80

Elenco delle figure

1.1	Suddivisione acciai in base alla normativa UNI EN 10020:2001	3
1.2	Designazione acciai tramite UNI EN 10027-2	11
1.3	Confronto designazioni	13
2.1	meccanismi di rinforzo in rapporto alla tenacità	19
2.2	Miglioramento tramite dimensione del grano	19
2.3	Variazioni dello snervamento con l'aggiunta di microleganti	21
2.4	Lavorazioni per acciai ferritico-perlitici ad alta resistenza e tenacità	23
2.5	Acciai Ferritico-Perlitici ad alta resistenza e tenacità	24
2.6	Confronto curve CCC tra acciaio Ferritico-Perlitico e a basso carbonio a struttura Aciculare	25
2.7	Rappresentazione della resistenza/duttilità degli acciai HSS e AHSS	26
2.8	Designazioni secondo Ultra-Light Steel Automotive Body - Advanced Vehicle Concept (ULSAB-AVC) a confronto con normative UNI EN	27
2.9	Esempio di processo termomeccanico con i relativi risultati	28
2.10	Microstruttura acciai Dual Phase (DP)	28
2.11	Gli acciai Transformation-Induced Plasticity (TRIP)	29
2.12	Processo produttivo degli acciai TRIP	30
2.13	Confronto in termini di deformazione-snervamento tra acciai TRIP e Twinning-Induced Plasticity (TWIP)	31
2.14	Metodo di realizzazione dei Quenching and Partitioning (QandP)	31
2.15	Acciai Advanced High Strength Steels (AHSS) di seconda generazione e la loro collocazione in caratteristiche meccaniche	32
3.1	Trattamento termico per gli acciai da bonifica	34
3.2	Caratteristiche meccaniche degli acciai inossidabili austenitici dopo trattamento di distensione	36

Elenco delle tabelle

1.1	Norme di carattere geneale	3
1.2	Prospetto I, norma UNI EN 10020:2001	4
1.3	Indicazioni simboli	6
1.4	Valori di resilienza	6
1.5	Sottogruppo 1.1 vecchia normativa	7
1.6	Sottogruppo 1.2 vecchia normativa	7
1.7	Sottocategoria 2.1	8
1.8	Sottocategoria 2.2	9
1.9	Fattori moltiplicativi elementi	9
1.10	Sottocategoria 2.3	9
1.11	Sottocategoria 2.4	10
1.12	Classificazione acciai su base chimica	10



Todo list

Figure: 3.3 (1) Aggiungere Metallografia AISI 442	37
■ 3.3 (2) Vedi la tabella della comparazione delle proprietà	37
■ 3.3 (3) acronimo	37
Figure: 3.3 (4) Aggiungere i grafici della sensibilizzazione	37
■ 3.4 (5) Aggiungere i tenori di carbonio	38
■ 3.4 (6) vedi slides per maggiore completezza	38
■ 3.5 (7) Aggiungere eventuali nomenclature europee	38
Figure: 3.5 (8) Aggiungere tabella per gli acciai PH	39
Figure: 3.5 (9) Grafico trattamento termico PH	39
Figure: 3.5 (10) Grafico ciclo termico PH Martensitici	40
Figure: 3.5 (11) Tabella caratteristiche meccaniche	40
Figure: 3.5 (12) Ciclo termico PH aust.	40
Figure: 3.5 (13) Tabella valori caratteristiche meccaniche	41
■ 3.5 (14) Vedi descrizione ciclo termico nelle slide	41
Figure: 3.5 (15) Ciclo termico PH semi-aust.	41
Figure: 3.5 (16) Valori caratteristiche meccaniche PH Semi-Aust.	41
■ 3.6 (17) Vedi la slide per gli impieghi	42
Figure: 3.6 (18) Composizione struttura.	42
Figure: 3.6 (19) Inserire tabelle nomenclature acciai duplex	42
■ 3.6 (20) Verificare le formule del PREN	42
Figure: 3.6 (21) Metallografie fenomeno pitting	42
Figure: 3.6 (22) Grafico curve di Bhain	42
■ 4.0 (23) Citazione delle proprietà più richieste	46
■ 4.0 (24) Riorganizzare La descrizione precedente per abbellarla	46
Figure: 4.0 (25) Tabella tipologie di carburi ottenibili	46
Figure: 4.0 (26) Diagramma resistenza carburi	46
■ 4.0 (27) Aggiungere anche gli altri elementi	47
Figure: 4.1 (28) Grafico trattamento termico acciai utensili	47
Figure: 4.1 (29) Trattamento termico di indurimento	47
■ 4.1 (30) Aggiungi lezione del 21/04/2023	48
Figure: 5.0 (31) Altoforno	50
Figure: 5.0 (32) Grafico fonderie di seconda fusione	50
Figure: 5.1 (33) Inserire grafico Fe-C	51
■ 5.1 (34) Aggiungere	51
■ 5.1 (35) Completare	51

Figure: 5.1 (36) Micrografie ghisa grigia, sferoidale	52
Figure: 5.2 (37) Diagramma di stato Fe-C-Si	52
5.2 (38) Aggiungere punti importanti del grafico Fe-C-Si	52
5.2 (39) Aggiungere gli elementi grafitizzanti e antografitizzanti	52
Figure: 5.2 (40) Grafico posizionamento delle ghise in funzione del C-Si	53
Figure: 5.2 (41) Grafico raffreddamento	53
5.2 (42) aggiungi slide considerazioni sul raffreddamento	53
5.2 (43) Porre come definizione o esempio per evidenziare	53
Figure: 5.2 (44) Nucleazione grafite + Strutture grafite	53
5.3 (45) Completa	54
Figure: 5.3 (46) Modalità accrescimento grafite	54
5.3 (47) Recuperare il materiale	54
5.3 (48) Fino a qua	54
Figure: 5.3 (49) Inizio nuclazione ferrite + microografie	54
Figure: 5.3 (50) Grafico distanza lamelle - durezza	55
Figure: 5.4 (51) Possibili forme grafite	55
Figure: 5.4 (52) Possibili distribuzioni grafite caso I	56
5.4 (53) Aggiungi eventuali esempi di codifica della grafite	56
5.4 (54) come si ottiene	56
5.4 (55) come si ottiene	56
5.4 (56) Da porre come definizione come fatto in precedenza	56
Figure: 5.4 (57) Classificazione generale ghisa	56
5.4 (58) Aggiungi gli esempi	56
Figure: 5.4 (59) Aggiungere nomenclatura numerica	56
Figure: 5.5 (60) Metallografie ghise bianche	57
5.6 (61) completa	57
Figure: 5.6 (62) Ghise grigie normate	57
Figure: 5.6 (63) metallografie ghise grigie	57
5.6 (64) Aggiungere trattamenti termici	58
5.7 (65) Aggiungere le sferoidali	58
5.7 (66) Aggiungere il necessario	58
5.7 (67) Aggiungere designazione ghise sferoidali secondo normative	58
Figure: 5.7 (68) Metallografia ADI + trattamento austempering	59
Figure: 5.7 (69) Grafico caratteristiche austempering	59
5.8 (70) Aggiungi	59
5.8 (71) per aggiungere dettagli vedi slides	60
5.8 (72) Aggiungere la designazione secondo normativa	60
Figure: 5.8 (73) Aggiungere tabelle caratteristiche meccaniche ghise malleabili	60
5.9 (74) Completa	60
5.9 (75) aggiungere le caratteristiche migliorative	60

Figure: 5.9 (76) Aggiungere designazioni ghise legate	61
Figure: 6.0 (77) Tabella di confronto della trave	63
Figure: 6.0 (78) Processo produttivo	64
Figure: 6.2 (79) Schema suddivisione leghe	64
Figure: 6.2 (80) Sistemi di leghe	65
6.2 (81)	
Riferimento	65
Figure: 6.2 (82) Suddivisione normative alluminio	65
Figure: 6.2 (83) Designazioni	65
6.2 (84) Aggiungere la classificazione delle famiglie della UNI EN 573-1	66
Figure: 6.2 (85) Designazione UNI EN 573-1	67
Figure: 6.2 (86) Designazione UNI EN 573-2	67
Figure: 6.2 (87) Designazione UNI EN 573-3	67
6.2 (88) Esempi di designazione	67
Figure: 6.2 (89) Designazione UNI EN 1780-1	67
Figure: 6.2 (90) Designazione UNI EN 1780-2	67
Figure: 6.2 (91) Designazione UNI EN 1706	68
Figure: 6.2 (92) Designazione fonderia americana	68
Figure: 6.2 (93) Tabella sì o no TT	69
6.2 (94) Aggiungi gli stati di incrudimento UNI EN 515	69
Figure: 6.2 (95) Confronto leghe alluminio	69
Figure: 6.2 (96) Anisotropia	69
Figure: 6.2 (97) Caratteristica a deformazione con leghe	69
Figure: 6.2 (98) Principali leganti	70
6.2 (99)	
Aggiungi	70
Figure: 6.2 (100) Grafico Al-Si	70
Figure: 6.2 (101) Confronto dendriti	71
Figure: 6.2 (102) Al-Cu	71
Figure: 6.3 (103) Meccanismo precipitazione	71
A.0 (104)	
ADD	74
Figure: A.0 (105) Papers production on HEA	74
Figure: A.0 (106) Mixture of cristal structure	74
Figure: A.0 (107) Specific strength on Elastic module	74

Parte I

Introduzione

CONFIDENTIAL

CAPITOLO 1

Classificazione e Designazione degli acciai

1.1 La normazione

Per cominciare, è utile osservare come gli enti di normazione descrivono gli acciai. tra l'altro sono tra i prodotti più normati presenti sul mercato industriale. Dapprima:

UNI sigla che indica una normativa realizzata dall'Ente nazionale di Unificazione. Ente che norma tutte le attività produttive sul mercato italiano. Inoltre è facente parte del **CEN**. Difatti applica sul suolo italiano tutte le normative date dallo stesso **CEN**. Non è ammessa la presenza di normative che siano in contrasto con quelle europee.

EN contraddistingue le norme sviluppate dal Comitato Europeo di Normazione (**CEN**). Le normative EN devono essere percepite da tutti gli stati membri dello spazio economico europeo. Ciò per garantire il libero scambio di prodotti al interno del mercato. Il EN è composto dai principali enti nazionali di normazione degli stati membri nello spazio economico europeo.

ISO rappresenta tutte le normative sviluppate dal International Organization for Standardization (**ISO**). Possono essere un riferimento applicabile per tutto il mondo. Una nazione può decidere se applicare le norma **ISO** indipendentemente da quanto fatto dal **CEN**.

Secondo le normative della **CEN** le normative hanno lo scopo di:

Stabilire le condizioni tecniche per lo scambio di prodotti e di servizi assicurando il continuo adeguamento allo sviluppo delle tecnologie e dei bisogni del mercato

con lo scopo di eliminare le barriere commerciali, almeno tra gli stati europei.

Una prima classificazione dei tipi di acciai perché esistono tante classi di materiale. Dunque si può pensare ad una divisione in base:

- composizione chimica;
- processo di fabbricazione;
- caratteristiche meccanico-fisiche e di impiego;
- costituenti strutturali;
- ecc...

Non a caso sono stati citati i precedenti aspetti, in fatti le normative vanno a coprire gli aspetti stessi, come mostrato nella tabella [1.1](#)

Secondo la norma UNI EN 10020:2001:

L'acciaio è un materiale il cui *tenore in massa di Ferro (Fe)* è maggiore di quello di ciascuno degli altri elementi ed il cui *tenore di Carbonio (C)* è generalmente minore del 2% e che contiene altri elementi. Un numero limitato di acciai al Cromo (Cr) può avere tenore di carbonio maggiore del 2%, ma tale valore del 2% è il tenore limite corrente che separa l'acciaio dalla ghisa.

Tabella 1.1: Norme di carattere geneale

UNI EN 10020:2001	Descrizione e classificazione dei tipi di acciaio
UNI EN 10027-1:2016	Sistemi di designazione degli acciai, <i>Designazione alfanumerica</i>
UNI EN 10027-2:2015	Sistemi di designazione degli acciai, <i>Designazione numerica</i>
UNI EN 10025-(1-6):2005	Prodotti laminati a caldo di acciai per impieghi strutturali
UNI EN 10079:2007	Descrizione dei prodotti di acciaio (forma, dimensioni, aspetto, stato superficiale)

Sempre la stessa norma definisce la classificazione principale degli acciai 1.1.

Dove:

- ■ è la suddivisione per composizione chimica;
- □ è la suddivisione in base alle caratteristiche meccanico-fisiche della suddivisione chimica.

L'appartenenza ad una classe si basa sulla composizione chimica di colata indicata sulla norma di prodotto, prendendo in considerazione il valore minimo. Vediamo ora come vengono suddivise le categorie in base alla norma.

Acciai non legati sono gli acciai per cui *Nessuno dei valori limite, rigorosamente fissati dalla norma (tabella 1.2), è raggiunto dai rispettivi tenori degli elementi in lega* (escluso il C).

Acciai inossidabili sono acciai contenenti *almeno il 10.5% di Cr e al massimo l'1.2% di C*.

Acciai legati sono acciai per i quali *almeno uno dei valori limite è raggiunto dai rispettivi tenori degli elementi in lega* (tabella 1.2) a patto che non siano già appartenenti agli inossidabili.

1.1.1 Acciai non legati

1.1.1.1 Di Qualità

Sono acciai per i quali, in genere, sussistono prescrizioni riguardanti caratteristiche specifiche, per esempio: tenacità, grossezza e/o formabilità. Non sono destinati a trattamenti termici (al più a ricottura e normalizzazione).

1.1.1.2 Speciali

Sono acciai che presentano, rispetto agli acciai non legati di qualità, una maggiore purezza in particolare nei confronti delle inclusioni non metalliche. In genere presentano risposta regolare ai Trattamenti Termici (TT), e nella maggior parte dei casi sono destinati a:

1. trattamento di bonifica,
2. trattamento di tempra superficiale.

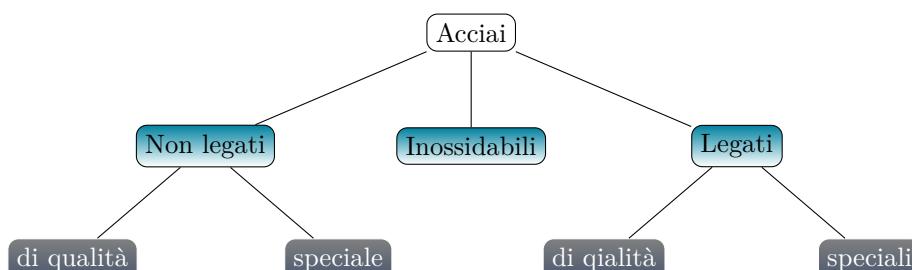
**Figura 1.1:** Suddivisione acciai in base alla normativa UNI EN 10020:2001

Tabella 1.2: Prospetto I, norma UNI EN 10020:2001

Elemento	Tenore in % in massa	
Al	Alluminio	0.30
B	Boro	0.0008
Bi	Bismuto	0.10
Co	Cobalto	0.30
Cr	Cromo	0.30
Cu	Rame	0.40
La	Lantanidi (singolarmente)	0.10
Mn	Manganese	1.65
Mo	Molibdeno	0.08
Nb	Niobio	0.06
Ni	Nichel	0.30
Pb	Piombo	0.40
Se	Selenio	0.10
Si	Silicio	0.60
Te	Tellurio	0.10
Ti	Titanio	0.05
V	Vanadio	0.10
W	Tungsteno	0.30
Zr	Zirconio	0.05
-	Altri	0.10

Fanno parte di tale classe gli acciai non legati che rispondono a una o più delle seguenti prescrizioni tutte quelle definizioni che rientrano in C.1.

1.1.2 Acciai inossidabili

Sono suddivise in base a due criteri:

1. tenore di Nichel:

- Ni < 2.5%
- Ni > 2.5%

2. caratteristiche particolari:

- resistenza alla corrosione;
- resistenza all'ossidazione a caldo;
- resistenza allo scorrimento.

1.1.3 Acciai legati

1.1.3.1 di Qualità

Sono acciai il cui utilizzo è simile agli acciai non legati di qualità, ma che contengono elementi in lega per rispondere ad alcune prescrizioni di impiego. Non sono, di regola, destinati a trattamento termico di bonifica o ad un trattamento di tempra superficiale. Ne fanno parte gli acciai definiti in C.2.

1.1.3.2 Speciali

Sono acciai diversi dagli inossidabili, che non rientrano tra le categorie definite per gli acciai legati di qualità caratterizzati da:

- regolazione precisa della composizione chimica;
- particolari condizioni di elaborazione e controllo del processo produttivo.

Ne fanno parte gli acciai descritti in C.3.

1.2 La norma UNI EN 10027-1:2016

La normativa ha lo scopo di designare univocamente gli acciai disponibili in commercio in base a due modalità: designazione alfanumerica (parte 1) e designazione numerica (parte 2). Inoltre specifica le modalità di nomenclatura degli acciai: specificando le modalità di ottenimento dei nomi per entrambe le parti¹. Inizieremo dalla prima parte ovvero quella alfanumerica.

1.2.1 UNI EN 10027-1 gruppo 1:2016

Nella prima parte della normativa vengono designati gli acciai in base al loro impiego e alle loro caratteristiche meccanico-fisiche. Alla figura 1.3 è rappresentata la modalità di nomenclatura alfanumerica.

Come si vede dalla tabella 1.3 i vari simboli occupano una posizione ben determinata e specifica. C'è da considerare una particolarità tra il simbolo d'impiego e il valore della caratteristica meccanico-fisica specificata per tale categoria.

In generale viene specificato il valore di snervamento minimo garantito: $R_{s,\min}$ [MPa].

Per Y Viene specificata la tensione minima di rottura: $R_{m,\min}$ [MPa]

Per M Viene indicata una proprietà magnetica (descritta dalla normativa).

Per R La durezza.

Per quanto riguarda le altre indicazioni, anche in questo caso dipende dal impiego del materiale. Viene riportato un esempio in tabella 1.4.

Esempio. 1.2.1: Descrizione acciaio

Se consideriamo come esempio l'acciaio S355J2, questo sarà:

S un acciaio per impieghi strutturali,

355 avrà valore minimo di snervamento pari a $R_{s,\min} = 355$ MPa,

J2 valore di resistenza minima a 27J ad una temperatura di -20°C .

¹Come nominare un acciaio non viene deciso dall'azienda che lo produce. Lo stesso ente ha il compito di nominare gli acciai.

Tabella 1.3: Indicazioni simboli

W Simbolo iniziale	X Simbolo Impiego	YYY Caratteristiche meccanico- fisiche	ZZ Altre indi- cazioni
G : Acciaio per getti	S Impieghi strutturali,	$R_{s,min}$ in [MPa]	Simboli addiziona- li divisi in due gruppi
PM : metallurgia delle polveri	P Impieghi sotto pressione, E Costruzioni meccaniche,	$R_{m,min}$ in [MPa] HBW_{min} (adimensionale)	
	D Formatura a freddo, B Cemento armato,		
	Y Cemento armato precom- presso,		
	R Acciaio per rotaie,		
	M Acciai magnetici,		
... ...			

Tabella 1.4: Valori di resilienza

J min 27J	K min 40J	Resilienza	
		L min 60J	Temperatura [°C]
JR	KR	LR	20
J0	K0	L0	0
J2	K2	L2	-20

Si ricorda che la necessità si aggiungere un valore di riferimento alla resilienza, come mostrato all'esempio 1.2.1, è motivato dal fatto che: il valore di resilienza dipende dalla temperatura di esercizio del materiale in quanto la bassa temperatura tende a cristallizzare il metallo rendendolo più fragile.

Tra le altre cose il metallo appena visto è uno di quei metalli facente parte della normativa UNI EN 10025-2 ovvero per gli acciai *prodotti laminati a caldo per impieghi strutturali*. Giusto per darne un accenno la normativa è divisa in sei parti:

1. Condizioni tecniche generali di fornitura
2. Condizioni tecniche di fornitura di acciai non legati per impieghi strutturali
3. Condizioni tecniche di fornitura di acciai per impieghi strutturali saldabili a grano fine allo stato normalizzato/normalizzato laminato
4. Condizioni tecniche di fornitura di acciai per impieghi strutturali saldabili a grano fine ottenuti mediante laminazione termomeccanica
5. Condizioni tecniche di fornitura di acciai per impieghi strutturali con resistenza migliorata alla corrosione atmosferica

6. Condizioni tecniche di fornitura per prodotti piani di acciai per impieghi strutturali ad alto limite di snervamento allo stato bonificato

La normativa precedente: UNI EU 27/77

Sebbene non più in vigore è utile visionare la vecchia normativa, in quanto molte aziende -anche al giorno d'oggi- utilizzano la vecchia nomenclatura. Nello specifico, il gruppo 1, considerato anche nella normativa in vigore, si suddivideva in ulteriori due gruppi:

Sottogruppo 1.1 Designazione per caratteristiche meccaniche, di cui non si garantiva la composizione chimica.

Sottogruppo 1.2 Designazione per tipo d'impiego.

Inoltre, la normativa stessa poneva tali prodotti come venduti allo stato grezzo: stato di lavorazione a caldo, senza trattamento termico.

Sottogruppo 1.1

Alla tabella 1.5 viene rappresentata la designazione degli acciai in base alla vecchia normativa. Le altre indicazioni, generalmente, contenevano il grado di insensibilità alla frattura fragile: indicata con le lettere dalla A alla D in ordine crescente di insensibilità; il simbolo dell'elemento chimico contenuto in bassi tenori; numeri da 1 a 3 che ne indicavano il grado qualitativo crescente.

Esempio. 1.2.2: Sottogruppo 1.1

- | | | |
|---|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Fe360 • FeE355 | <ul style="list-style-type: none"> • Fe410Pb • Fe410D | <ul style="list-style-type: none"> • FeG450 • Fe490-2 |
|---|---|---|

Sottogruppo 1.2

Alla tabella 1.6 è rappresentata la vecchia nomenclatura degli acciai secondo il loro impiego.

Tabella 1.5: Sottogruppo 1.1 vecchia normativa

Fe	Simbolo iniziale	Caratteristica meccanica	Altre indicazioni
	G per acciaio per getti	$R_{m,min}$ Caratteristica a rotura in MPa $R_{s,min}$ Caratteristica a snervamento in MPa solo preceduta da E	

Tabella 1.6: Sottogruppo 1.2 vecchia normativa

Fe	Lettera	Numero di due o più cifre
	Indice d'impiego	È una specifica relativa al prodotto e ne indica il grado di qualità

Esempio. 1.2.3: Sottogruppo 1.2

FeP03 era noto come acciaio in lamiera sottile per imbutiture (P) con grado di qualità 03

1.2.2 UNI EN 10027-1 gruppo 2:2016

Altre categorie di acciai, sempre classificandone il loro impiego sono:

1. Acciai non legati con tenore medio di Mn < 1%
2. Acciai non legati con tenore medio di Mn > 1%, acciai non legati per lavorazioni meccaniche ad alta velocità ("automatici"), acciai legati (no HS) con tenori in massa di ciascun elemento in lega < 5%
3. Acciai legati (No HS) il cui tenore in massa di almeno un elemento in lega sia > 5%
4. Acciai rapidi HS.

1.2.2.1 Sottocategoria 2.1

Sono acciai non legati con tenore in massa di Mn < 1%

Alla tabella 1.7 è riportato la designazione degli acciai per questa sottocategoria.

Esempio. 1.2.4: Sottocategoria 2.1

C10 acciaio da carbo-cementazione
C40, C80, C120
C35E

1.2.2.2 Sottocategoria 2.2

Acciai non legati con tenore medio di Mn > 1%, acciai non legati per lavorazioni meccaniche ad alta velocità ("automatici"), acciai legati (no HS) con tenori in massa di ciascun elemento in lega < 5%. Alla tabella 1.8 viene riportata la formula

I numeri relativi ai diversi elementi devono essere separati da trattini (non sempre vengono specificati tutti).

Tabella 1.7: Sottocategoria 2.1

C	%C × 100	Altre indicazioni
Se necessario GC se acciai per getti		E zolfo massimo stabilito R zolfo in un dato intervallo U Acciaio ottimizzato per utensili S Acciaio ottimizzato per molle

Tabella 1.8: Sottocategoria 2.2

$\%C \times 100$	Simboli elementi in lega	Concentrazione degli elementi in lega
Se necessario G per gli acciai per getti	In ordine decrescente di quantità	Moltiplicati per il rispettivo fattore (vedi tabella 1.9)

Tabella 1.9: Fattori moltiplicativi elementi

Elementi chimici	Fattore moltiplicativi
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4x
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10x
Ce, N, P, S	100x
B	1000x

Esempio. 1.2.5: Esempi di nomenclatura 2.2

35CrNiMo4-2-3	0.38%	Carbonio
	1%	Cr
	0.5%	Ni
	0.3%	Mo
34CrMo4	0.34%	Carbonio
	1%	Cr

1.2.2.3 Sottocategoria 2.3

Acciai legati (No HS) il cui tenore in massa di almeno un elemento in lega sia > 5%. Nomenclatura è rappresentata in tabella 1.10.

Esempio. 1.2.6: Esempi di nomenclatura 2.3

X5CrNi18-8	0.05%	Carbonio
	18%	Cr
	8%	Ni

1.2.2.4 Sottocategoria 2.4

Acciai rapidi (HS).

Tabella 1.10: Sottocategoria 2.3

X	$\%C \times 100$	Simboli elementi in lega	Concentrazione degli elementi in lega
Se necessario GX per acciai da getto o PMX per metallurgia delle polveri		In ordine decrescente di quantità	Senza fattori moltiplicativi

Tabella 1.11: Sottocategoria 2.4

HS	Concentrazione degli elementi in lega
Se necessario PMHS per metallurgia delle polveri	Nell'ordine: W, Mo, V, Co

Gli acciai super-rapidi sono caratterizzati da 4 numeri **in quello specifico ordine**: **W, Mo, V, Co**.

Gli acciai rapidi e semi-rapidi sono caratterizzati da 3 numeri **sempre nello specifico ordine**: **W, Mo, V**.

Esempio. 1.2.7: Esempi di nomenclatura 2.4

HS7-4-2-5	7%	Tungsteno
	4%	Molibdeno
	2%	Vanadio
	5%	Cobalto

1.3 La norma UNI EN 10027-2

Vediamo da subito la nomenclatura per tali tipi di acciai alla tabella 1.12.

Il numero del gruppo, nel caso degli acciai, è **1**. Altri numeri sono impiegati per altri tipi di metalli e leghe:

1. Acciai,
2. Metalli pesanti escluso l'acciaio (rame e leghe di rame)
3. Metalli leggeri (alluminio e leghe, Magnesio e leghe, ecc...)
4. ...
5. Ghise
6. fino a 9 materiali.

Alla figura 1.2 sono riportati i codici identificativi dei vari gruppi di acciai.

Esempio. 1.3.1: Esempi di designazione numerica

- 1.0037** acciaio non legato equivalente al S235JR
- 1.4306** acciaio inossidabile equivalente al X2CrNi19-11
- 1.4401** acciaio inossidabile equivalente al X4CrNiMo17-12-2

Tabella 1.12: Classificazione acciai su base chimica

N.	XX	YY(ZZ)
Numero di gruppo del materiale	Numero del gruppo dell'acciaio	Numero sequenziale in lega

Numeri di gruppo degli acciai - UNI EN 10027/2

Acciai non legati			Acciai legati								
Di base	Di qualità	Speciali	Di qualità	Speciali							
				Utensili	Diversi	Inox	Impieghi strutturali e costr. meccaniche				
00 90		10 Caratter. fisiche particolari		20 Cr	30	40 Ni<2,5%	50 Mn-Si-Cu	60 Cr-Ni Cr 2÷3%	70 Cr Cr-B	80 Cr-Si-Mo Cr-Si-Mn-Mo Cr-Si-Mo-V Cr-Si-Mn-Mo-V	
	01 91	11 $R_m < 500$ [N/mm ²]	C<0,5% Costruz.	21 Cr-Si Cr-Mn Cr-Mn-Si	31	41 Ni<2,5% Mo	51 Mn-Si Mn-Cr	61	71 Cr-Si Cr-Mn Cr-Mn-B Cr-Si-Mn	81 Cr-Si-V Cr-Mn-V Cr-Si-Mn-V	
	02 92	12 $R_m < 500$ [N/mm ²]	C>0,5% Costruz.	22 Cr-V Cr-V-Si Cr-V-Mn Cr-V-Mn-Si	32 Rapidi con Co	42	52 Mn-Cu Mn-V Si-V Mn-Si-V	62 Ni-Si Ni-Mn Ni-CU	72 Cr-Mo Mo<0,35% Cr-Mo-B	82 Cr-Mo-W Cr-Mo-W-V	
	03 93	13 Costruz mecc.	C<0,12% $R_m < 500$ [N/mm ²]	23 Cr-Mo Cr-Mo-V Mo-V	33 Rapidi senza Co	43 Ni>2,5%	53 Mn-Ti Si-Ti	63 Ni-Mo Ni-Mo-Mn Ni-Mo-Cu Ni-Mo-V Ni-Mn-V	73 Cr-Mo Mo>0,35%	83	
	04 94	14 C 0,12÷0,25% $R_m 400÷500$ [N/mm ²]		24 W Cr-W	34	44 Ni>2,5% Con Mo	54 Mo Nb-Ti-V W	64	74	84 Cr-Si-Ti Cr-Mn-Ti Cr-Si-Mn-Ti	
	05 95	15 C 0,25÷0,55% $R_m 500÷700$ [N/mm ²]		25 W-V Cr-W-V	35 Acciai per cuscinetti	45 Aggiunte speciali	55 B Mn-B Mn<1,65%	65 Cr-Ni-Mo Mo<0,4% Ni<2,%	75 Cr-V Cr<2,%	85 Acciai da nitrurazione	
	06 96	16 C>0,12% $R_m > 700$ [N/mm ²]		26 W a eccez. di 24, 25, 26	36 Magnetici senza Co	46 Ni Per alte temperat.	56 Ni	66 Cr-Ni-Mo Mo<0,4% Ni 2÷3,5%	76 Cr-V Cr>2,0%	86	
	07 97	17 Alto tenore di P o di S		27 Ni	37 Magnetici con Co	47 Refrattari Ni<2,5%	57 Cr-Ni	67 Cr-Ni-Mo Mo<4.% Ni 3,5÷5% o Mo>0,4%	77 Cr-Mo-V	87 Non trattabili ter- micamente presso l'utilizza- tore	
		18 Utensili	08 98	28 Altri	38 Caratter. fisiche particolari	48 Refrattari Ni>2,5%	58 Cr-Ni con Cr 1÷1,5%	68 Cr-Ni-V Cr-Ni-W Cr-Ni-V-W	78	88	
		19	09 99	29	39 Caratter. fisiche particolari, Ni	49 Resistenti ad alte tempera- ture	59 Cr-Ni con Cr 1,5÷2%	69 Cr-Ni a eccez. da 57 a 68	79 Cr-Mn-Mo Cr-Mn-Mo-V	89	

Figura 1.2: Designazione acciai tramite UNI EN 10027-2

Di seguito, alla figura 1.3, viene riportato un confronto tra le varie modalità di designazione tra le normative.

1.4 Cenni alla normativa AISI

La designazione americana degli acciai deriva dal lavoro congiunto della American Iron and Steel Institute ([AISI](#)) e della Society of Automotive Engineers ([SAE](#)). Vediamo di seguito il distinguo tra le varie categorie di acciai.

1.4.1 Acciai al carbonio o basso legati

Sistema numerico di 4 o 5 cifre: le prime due indicano la classe di appartenenza dell'acciaio. Le ultime due, o tre, indicano la $\%C \times 100$.

Esempio. 1.4.1: Esempio designazione [AISI](#)

10XX(X) acciai solo C

41XX(X) acciai al Cr-Mo

Può esserci una lettera di prefisso indicante il processo di fabbricaizone

1.4.2 Acciai legati, ma soprattutto inox

In questo caso si parla di una sigla a tre cifre con eventuale aggiunta delle lettere. La prima cifra indica la classe, le altre due indicano una lega specifica.

Esempio. 1.4.2: Esempi Norma AISI

2XX acciai austenitici Cr-Mn-Ni

3XX Inox austenitici Cr-Ni

4XX Inox martensitici o ferritici Cr

1.5 Considerazioni generali

la normativa UNI EN 10027 non è sempre esaustiva: possono esserci dei casi in cui alcuni acciai non possano essere rappresentati tramite una sola stringa alfanumerica. Si è osservato che diversi sono i punti di vista secondo i quali gli acciai possono essere classificati *e evidente che non è possibile istituire una classificazione degli acciai che tenga conto di tutti questi aspetti*.

Ai fini pratici è indispensabile riferirsi alle applicazioni, pertanto si preferisce classificare gli acciai in 5 grandi categorie, suddivise a loro volta in classi.

- **Acciai da costruzione di uso generale**: acciai destinati a sopportare in opera sollecitazioni statiche o dinamiche senza rompersi o deformarsi oltre a limiti determinati.
In genere sono descritti dalla [1.2.1](#).
- **Acciai speciali da costruzione**: acciai destinati ad applicazioni più impegnative, nelle quali esplano soprattutto la funzione di resistere a carichi statici e dinamici. In generale appartengono alle sottocategorie [1.2.2.1](#) e [1.2.2.2](#) alcuni particolari casi anche alla [1.2.2.3](#) perché nessun elemento in lega supera la soglia del 5% di tenore.

Alcune designazioni equivalenti per acciai da costruzione

EN 10027-1	EN10027-2	EU 27
S185	1.0035	Fe 320
S235JR	1.0037	Fe 360 B
S235J0	1.0114	Fe 360 C
S235J2G3	1.0116	Fe 360 D
S275JR	1.0044	Fe 430 B
S275J0	1.0143	Fe 430 C
S275J2G3	1.0144	Fe 430 D
S355JR	1.0045	Fe 510 B
S355J0	1.0553	Fe 510 C
S355J2G3	1.0570	Fe 510 D
E295	1.0050	Fe 490
E335	1.0060	Fe 590
E360	1.0070	Fe 690

Figura 1.3: Confronto designazioni

- **Acciai inossidabili**: acciai destinati a resistere a determinate condizioni lavorative in ambienti corrosivi. Appartengono alla [1.2.2.3](#).
- **Acciai da utensili** destinati alle lavorazioni di tutte le classi di materiali. Appartengono a diverse classi a seconda di quale sia la loro applicazione, dunque si trovano in: [1.2.2.2](#), [1.2.2.3](#) e [1.2.2.4](#)
- **Acciai per usi particolari**: acciai caratterizzati dal fatto che il loro impiego è determinato da alcune loro singolari proprietà. Ad esempio: acciai per impieghi a basse temperature, acciai refrattari, acciai con particolari proprietà elettriche o magnetiche ecc...

Parte II

Acciai da costruzione

CONFIDENTIAL

CAPITOLO 2

Acciai per impieghi strutturali

Tra gli acciai per impieghi strutturali, si possono trovare sicuramente gli acciai per uso comune e gli acciai per costruzioni speciali: ciò per via della grande varietà di prodotti che si possono produrre in questo ambito. Giusto per avere un'idea di massima: gli acciai per uso comune ricoprono circa l'80% della produzione per questa categoria. Parliamo di acciai che sono designati, in generale, tramite la lettera 'S' secondo la normativa [1.2](#).

In generale sono forniti come prodotti piani e lunghi. Possono uscire in diverse forme di finitura:

- allo stato di lavorazione a caldo;
- allo stato normalizzato o bonificato;
- ecc...

I prodotti sono normati dalla UNI EN 10149 che è la norma prodotto di riferimento.

Come accennato esiste una normativa sulla definizione dei prodotti in acciai, distinguendo tra

- Prodotti piani:
 - larghi piatti,
 - lamiere,
 - nastri,
 - lamiere profilate (nervate, ondate)
- Prodotti lunghi:
 - verghelle,
 - filo,
 - barre,
 - ecc...

La composizione chimica si riferisce all'analisi di colata, se non diversamente specificato dalla normativa. In generale sono descritte le wt.% massime dei vari elementi in lega, tra cui anche il carbonio, salvo specificarne diversa presenza se una piccola quantità di qualche elemento. La norma, di solito, specifica il raggiungimento di alcune proprietà meccaniche tra cui: valori minimi di R_s o R_m ed eventuali caratteristiche utili al fine della costruzione come la saldabilità. Quando è prevista zincatura per immissione a caldo di un acciaio, deve esserne garantita l'idoneità: in genere tutti gli acciai possono subire questo tipo di finitura superficiale. Però acciai adatti riescono a formare delle fasi di precipitato di zinco che garantiscono resistenza maggiorata alla corrosione ambientale. Altri, non particolarmente adatti a tale trattamento, tendono a formare delle fasi di precipitato molto irregolari e grossolane che limitano, o addirittura peggiorano, la resistenza alla corrosione.

Tipicamente, la zincabilità dipende dal contenuto in lega del Si. Allora si possono avere diverse situazioni:

$Si < 0.03\%$ si è in una situazione cautelativa, sicuramente si ha una buona zincatura.

$0.03\% < Si < 0.12\%$ È comunque zincabile, ma non ha le stesse caratteristiche di resistenza alla corrosione del primo caso. Si definiscono, dunque, delle classi di zincabilità.

$Si > 0.3\%$ La sequenza delle fasi di zincatura non è garantita, dunque anche la resistenza all'atmosfera non è garantita. Può migliorare la resistenza alla corrosione in maniera marginale.

Tra l'altro è opportuno ricordare che tale trattamento tende ad infragilire il materiale. Fenomeno esaltato dal invecchiamento.

Inoltre sono riportati all'appendice D.1 la definizione degli acciai calmati ed effervescenti.

Come già accennato per questa tipologia di acciai: spesso è richiesto il soddisfacimento del requisito di saldabilità. Viene definito un acciaio saldabile se:

2.0.1 Definizione (Saldabilità): Un acciaio può essere considerato saldabile se può essere sottoposto a tale processo costruttivo con le normali tecniche di cantiere senza necessità di trattamenti temici post-saldatura.

Inoltre, vale la pena ricordare che più un acciaio è temprabile, più questo sarà meno saldabile. Questo perché un acciaio fortemente temprabile forma più facilmente strutture rigide ma fragili. Dunque un processo di saldatura, dal punto di vista del materiale, può essere considerato come una tempra con raffreddamento in aria. In genere viene definito un parametro di carbonio equivalente detto CEV. Si considera, con opportune eccezioni, saldabile un acciaio con $CEV < 0.5$. Questo parametro non è risolutivo: qualsiasi acciaio si può saldare. Aumenta la probabilità di formare delle strutture fragili nella zona termicamente alterata ZTA. In questi casi bisogna ricorrere a tecniche di saldatura più avanzate.

2.1 UNI EN 10025-(3-6) Prodotti laminati a caldo

Riprendendo la normativa UNI EN 10025 già citata al capitolo 1.2. Si ricorda che tale normativa è dedicata a *prodotti laminati a caldo per impieghi strutturali* e che è divisa in sei parti.

1. Condizioni tecniche generali di fornitura
2. Condizioni tecniche di fornitura di acciai non legati per impieghi strutturali
3. Condizioni tecniche di fornitura di acciai per impieghi strutturali saldabili a grano fine allo stato normalizzato/normalizzato laminato
4. Condizioni tecniche di fornitura di acciai per impieghi strutturali saldabili a grano fine ottenuti mediante laminazione termomeccanica
5. Condizioni tecniche di fornitura di acciai per impieghi strutturali con resistenza migliorata alla corrosione atmosferica
6. Condizioni tecniche di fornitura per prodotti piani di acciai per impieghi strutturali ad alto limite di snervamento allo stato bonificato

Sono compresi nella normativa acciai di tipo **S** garantendone il valore minimo di snervamento garantito e l'indice di resilienza come indicato dalla 1.2. In più la norma definisce ulteriori sigle per indicare l'appartenenza di tali acciai ad una ben specifica parte della normativa:

+**AR** indica As Rolled ovvero acciaio grezzo da laminazione;

+**N** acciaio proveniente da laminazione normalizzata;

- +**M** acciaio proveniente da laminazione temomeccanica;
- +**W** acciaio a migliorata resistenza atmosferica;
- +**Q** acciaio ad alto valore di snervamento allo stato bonificato.

Esempio. 2.1.1: Esempio

Acciaio UNI EN 10025-2: S235J0C+N ovvero:

S acciaio per impieghi strutturali

235 resistenza allo snervamento minima garantita in MPa

J0 resilienza garantita maggiore di 27J ad una temperatura di 0°C

C acciaio adatto per la formatura a freddo

N acciaio allo stato normalizzato

La norma definisce anche quali siano le informazioni che devono essere cedute al committente:

- quantitativo da fornire;
- forma del prodotto e numero della norma per dimensioni e tolleranze;
- Dimensioni nominali e tolleranze dimensionali di forma;
- Designazione dell'acciaio;
- Tipi di documenti di controllo;
- Requisiti aggiuntivi di controllo e prova e tutte le operazioni richieste.

Esempio. 2.1.2: Esempi designazione della norma

- Acciaio UNI EN 10025-3 - S275N o S275NL
- Acciaio UNI EN 10025-4 - S420M o S420ML
- Acciaio UNI EN 10025-5 - S355J0W+N o S355J0WP+N
- Acciaio UNI EN 10025-6 - S460Q o S460QL o S460QL1

L'indice L indica valore di resilienza minima garantita più alta rispetto al solo parametro N a diverse temperature. Stesso discorso per i parametri M e ML Solo che la condizione finale di fornitura è diversa. Mentre per gli acciai che presentano il temine W o WP hanno dei tenori di Cr e Cu ben specificati dalla normativa. Quindi indicano una diversa composizione di lega.

2.2 Acciai resistenti alla corrosione atmosferica

Sono commercialmente definiti come acciai **Cor-Ten** che sta ad indicare:

Cor "Corrosion resistance"

Ten "Tensile strength"

Per aumentare la resistenza atmosferica contengono come elementi in lega: Cu, Cr, Ni e in caso tenori variabili di P. La composizione tipica potrebbe essere:

Esempio. 2.2.1: Composizione tipica CORTEN

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	V
0.15	1.10	0.80	0.50	0.70	0.30	0.05

In genere questi acciai vengono forniti allo stato di laminazione di normalizzazione o semplicemente laminato. Oppure sotto forma di barre, profilati e lamiere. Altre normative descrivono questi acciai come adatti per applicazioni architettoniche ed eventualmente adatti per applicazioni più sollecitate.

Sono acciai che generalmente sono saldabili, eventualmente il materiale di apporto che vengono usati anche per acciai Cr-Mn. Nel caso sia necessaria una certa finitura estetica (caso di applicazioni architettoniche) si usano elettrodi contenenti del Ni ($\approx 2 \div 3\%$) per ottenere la stessa finitura superficiale.

2.3 Acciai ad alta resistenza (HSS e AHSS)

Sono acciai che hanno un preciso scopo: garantire alte prestazioni meccaniche senza eccedere con elementi leganti per mantenere un costo del materiale alto. In particolare, le caratteristiche da ricercare in questo acciaio sono:

- Carico di rottura
- Carico di snervamento
- tenacità
- talvolta una migliorata resistenza alla corrosione atmosferica e alle atmosfere industriali (potenzialmente aggressive)

Lo sviluppo degli acciai *micro-legati* ha consentito alla realizzazione di dimensionamenti a minore quantità di materiale senza perdere di tenacità e duttilità ed altre caratteristiche meccaniche. Inoltre la micro-legatura ha tolto la necessità di eseguire dei trattamenti termici successivi. Che ovviamente si traduce per entrambi gli scopi in minori costi di produzione.

2.3.1 Meccanismi di rinforzo

Per raggiungere gli obiettivi indicati in precedenza, gli acciai ad alta resistenza presentano i così detti *Meccanismi di rinforzo*. Si vedranno ora i principali.

Rafforzamento per soluzione solida Si tende ad aumentare il tenore di carbonio, così il materiale diventa più duro. In più, si sostituiscono gli elementi sostituzionali: tali deformano il reticolo cristallino interagendo con le dislocazioni, di fatto bloccandole.

Incrudimento La semplice lavorazione a freddo porta il materiale ad incrudire, per cui risulta più duro. Ciò è dovuto all'aumento delle dislocazioni.

Rinforzo per precipitazione Vengono costituite, tramite opportuni processi produttivi, delle fasi solide sovrassature che pongono un ostacolo al movimento delle dislocazioni.

I metodi presentati in precedenza, sebbene migliorino la resistenza in generale, costituiscono un problema in termini di duttilità: Andando a bloccare le dislocazioni si ha effettivamente un materiale più duro, al contempo si perde di duttilità. Alla figura 2.1 sono riportati qualitativamente.

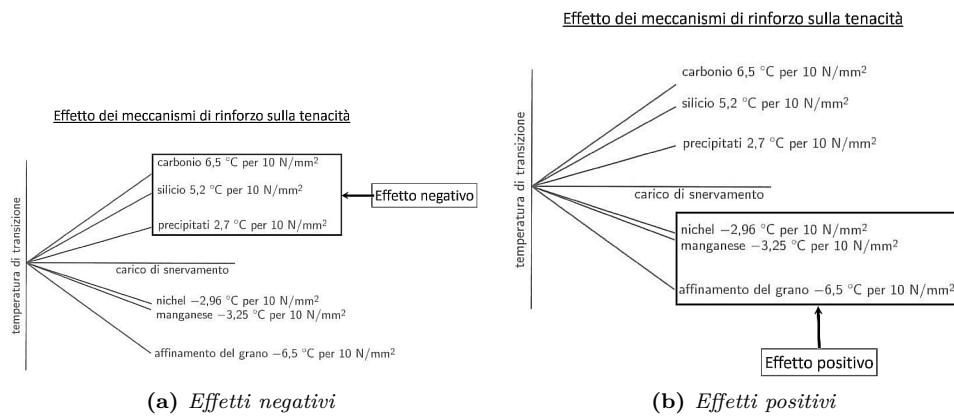


Figura 2.1: meccanismi di rinforzo in rapporto alla tenacità

Rafforzamento per affinamento del grano Nel caso di strutture cristalline CCC, come per acciai ferritico-perlitici per costruzione saldate, è l'unico meccanismo che incrementa entrambe le qualità: resistenza e tenacità. Allora valgono:

$$R_s = \sigma_0 + Kd^{-1/2} \quad (2.1)$$

$$I.T.T. = A - B \ln d^{-1/2} \quad (2.2)$$

Dalla (2.1) e (2.2) è evidente come le dimensioni dimensioni del grano siano fondamentali per controllare contemporaneamente la tensione di snervamento e la Input Transition Temperature. Nello specifico:

$$\searrow d \Rightarrow \nearrow R_s \text{ e } \searrow I.T.T. \quad (2.3)$$

Come si può controllare le dimensioni del grano ferritico?

In genere non è sempre possibile agire sulla velocità di raffreddamento, perché nella laminazione a caldo, il raffreddamento, viene eseguito in aria. Perciò dipende dallo spessore del laminato. Allora si può controllare la dimensione del grano austenitico durante la permanenza ad alta temperatura. Perché il

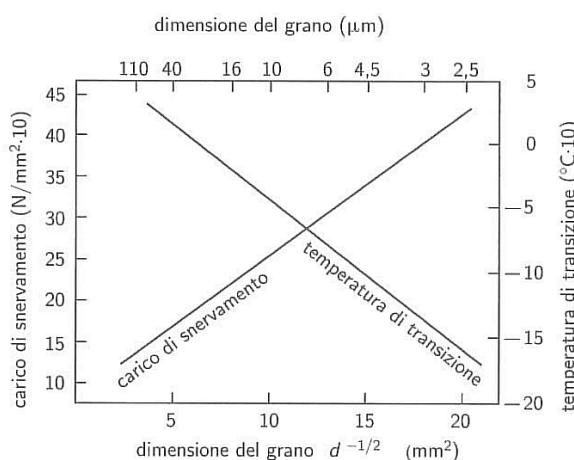


Figura 2.2: Miglioramento tramite dimensione del grano

grano ferritico nuclea a bordo del grano austenitico, quindi se si limitano le dimensioni dell'austenite se ne limita la nucleazione in ferrite, almeno dimensionalmente parlando. Inoltre si può ricorrere all'aggiunta in lega di microleganti che formano dei carburi i carbonitruri che "fissano" il grano austenitico impedendone la crescita.

Da queste considerazioni si sono sviluppati gli **HSLA** ovvero acciai ad alta resistenza ma basso legati.

2.4 HSLA

Gli High Strength Low Alloy (**HSLA**) sono acciai con un prezzo più vicino a quello degli acciai al carbonio per via del fatto che non contengono tenori di elementi in lega eccessivamente alti. Inoltre la loro produzione non è eccessivamente costosa per via dei sistemi di rinforzo che sono stati accennati in precedenza.

Generalmente ne esistono diverse categorie perché sono venduti in base alle loro caratteristiche meccaniche piuttosto che sulla composizione chimica:

- Acciai a migliorata resistenza alla corrosione atmosferica
- Acciai microlegati ferritico-perlitici
- Acciai con ferrite aciculare
- Acciai con morfologia controllata delle inclusioni



2.4.1 Ferritico-Perlitici ad alta resistenza

Sono considerati tra i primi **HSLA**.

Il loro sviluppo è stato possibile grazie all'introduzione della laminazione in controllo.

2.4.1 Definizione (Laminazione in controllo): Deformazione a caldo con controllo accurato delle temperature, in modo da bilanciare l'effetto dell'affinamento del grano per deformazione con quello della ricristallizzazione dovuta alle alte temperature.

L'evoluzione di questi saranno gli acciai ferritico-perlitici ad alta resistenza e tenacità.

Sono acciai che contengono V e Nb come elementi microalliganti. Per questi acciai le temperature di fine laminazione sono in genere superiori ai 900°C e il raffreddamento avviene in aria calma. Si ottiene, dunque, un acciaio con grano ferritico non in controllo ma rinforzato dai carburi dei microlegati.

Acciai al niobio interessa la precipitazione dei carburi NbC,

Acciai al vanadio-azoto interessa la precipitazione dei nitruri VN.

Dalla figura 2.3 si evidenzia come per acciai microlegati al Nb l'effetto del azoto sia indifferente. Già più marcato per gli acciai al V. Questo perché si formano i nitruri di vanadio. Da notare come a parità degli altri leganti, gli acciai che presentano microleganti ottengano una tensione di snervamento decisamente migliore. Si vuole ricordare che non sono state eseguite operazioni di affinamento del grano, si considera infatti una dimensione del grano pari a $d \approx 14 \div 16 \mu\text{m}$.

Ulteriore miglioramento delle caratteristiche di snervamento si raggiunge nel caso di aggiunta di 1%Cu + 1%Ni. Il rame è poco solubile col ferro al diminuire della temperatura. Se il materiale viene raffreddato molto rapidamente, il rame tende a rimanere in soluzione solida sovrassatura. Operando un rinvenimento a $\approx 550^\circ\text{C}$ si ha la precipitazione della fase e con ulteriore rafforzamento per precipitazione. Rafforzamento inizialmente possibile solo per lamiere.

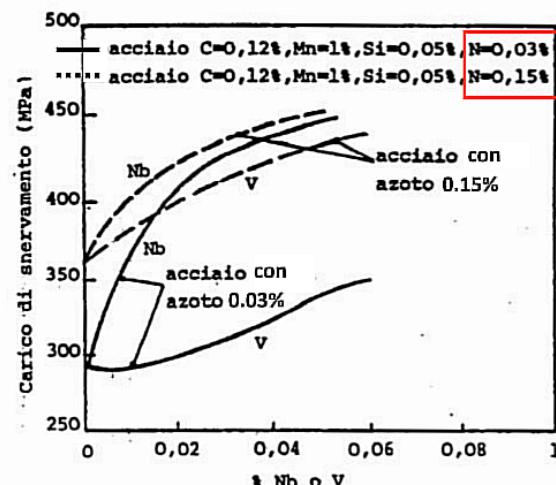


Figura 2.3: Variazioni dello snervamento con l'aggiunta di microleganti

2.4.2 Ferritico-Perlitici

ad alta resistenza e alta tenacità

Sono comunque acciai microlegati con cui si procede con **Affinamento del grano**, controllato tramite controllo della dimensione del grano austenitico di partenza. Grazie a questo processo si ha un miglioramento della tenacità. Dopodiché si hanno due possibili vie per migliorare anche la resistenza:

1. **Normalizzazione**, in genere più adatta per lamiere con spessore $> 25\text{mm}$;
2. **Laminazione controllata** per lamiere di spessore $< 25\text{mm}$.

Normalizzazione

per lamiere di spessore $> 25\text{mm}$ In questo caso si segue un procedimento del tipo proposto alla figura 2.4a. I dettagli delle operazioni post laminazione a caldo saranno:

2.4.2 Definizione: $T_{\text{finale di laminazione}} > 900 \div 1000^{\circ}\text{C}$

L'austenite non diventa sovrassatura degli elementi microlegati. Dunque non si ha precipitazione di carburi per difficoltà nella nucleazione. Abbassando la temperatura l'austenite cristallizza quando il grano non è in controllo. Si andrà a generare un grano ferritico non particolarmente fine però rinforzato dai precipitati. In generale si avrà **una resistenza non particolarmente alta e tenacità scadente**.

2.4.3 Definizione: $T_{\text{finale di laminazione}} = 880 \div 900^{\circ}\text{C}$

I carburi precipitano mentre l'austenite tende a ricristallizzare, dunque ne controllano la crescita. I precipitati devono essere molto fini e dispersi, altrimenti infragiliscono la struttura. Si genererà un grano ferritico con $d \approx 5 \div 6 \mu\text{m}$ con contributo di $R_s = 390 \div 450 \text{ MPa}$. Aggiungendo il contributo dato dai precipitati si arriva a $R_s = 550 \text{ MPa}$. Ottenendo **resistenza e tenacità più alte**

Laminazione controllata

Anche in questo caso si possono realizzare due tipi di lavorazione come si vede dalla figura 2.4b. Nello specifico: si evidenziano due diverse tipologie di acciaio:

Primo tipo Come già illustrato dalla figura 2.4b, i carburi presenti nella soluzione vengono mandati completamente in soluzione. Per cui il materiale viene lavorato in laminazione ad una temperatura di $\approx 1250^{\circ}\text{C}$. Allora il processo, illustrato alla figura 2.5a diventa:

I Laminazione Dal materiale caldo si susseguono una serie di passate tanto da portare il laminando ad una dimensione 5 volte più piccola di quella di partenza. Si ha la ricristallizzazione dell'austenite.

Attesa Si lascia raffreddare il materiale fino a $\approx 900^{\circ}\text{C}$

II Laminazione Si effettua una seconda laminazione ad una temperatura controllata tra $900^{\circ}\text{C} \div 750^{\circ}\text{C}$ dove si riduce lo spessore fino all' 80%. Si ha precipitazione dei carburi mentre il grano austenitico si allunga senza ricristallizzare.

Fine lavorazione Continuando il raffreddamento (in aria calma), si ha un'alta velocità di nucleazione di ferrite ad alto rapporto superficie/volume.

Ulteriori considerazioni per questo tipo di acciai. Confrontando con il caso della realizzazione di acciai ferritico-perlitici ad alta resistenza e tenacità tramite normalizzazione: in quel caso viene limitata la crescita del grano austenitico equiassiso. Nel caso della laminazione controllata: si ricerca un grano austenitico a forma più favorevole per la nucleazione ad alta velocità della ferrite.

Secondo tipo per questa tipologia, i carburi non vengono mandati completamente in soluzione. Dunque:

- I carbonitruri non si disiolgono completamente alla temperatura di austenitizzazione.
- Siccome si sta lavorando a temperatura più bassa, si avrà un'austenite satura a temperatura più bassa: dunque si ha un minor grado di sovrassaturazione dei microleganti.
- La ricristallizzazione risulterà impedita solamente nelle ultime passate di laminazione
- Il grano austenitico risulta controllato in forma mista tra volume e forma.

Dunque si ottiene un acciaio con diverso rapporto tenacità/resistenza. Si può aumentare ulteriormente la resistenza meccanica tramite incrudimento in lavorazione a temperatura controllata di circa 600°C andando a formare una tessitura simile a quella della laminazione a freddo con conseguente anisotropia (circa il 5 \div 10%).

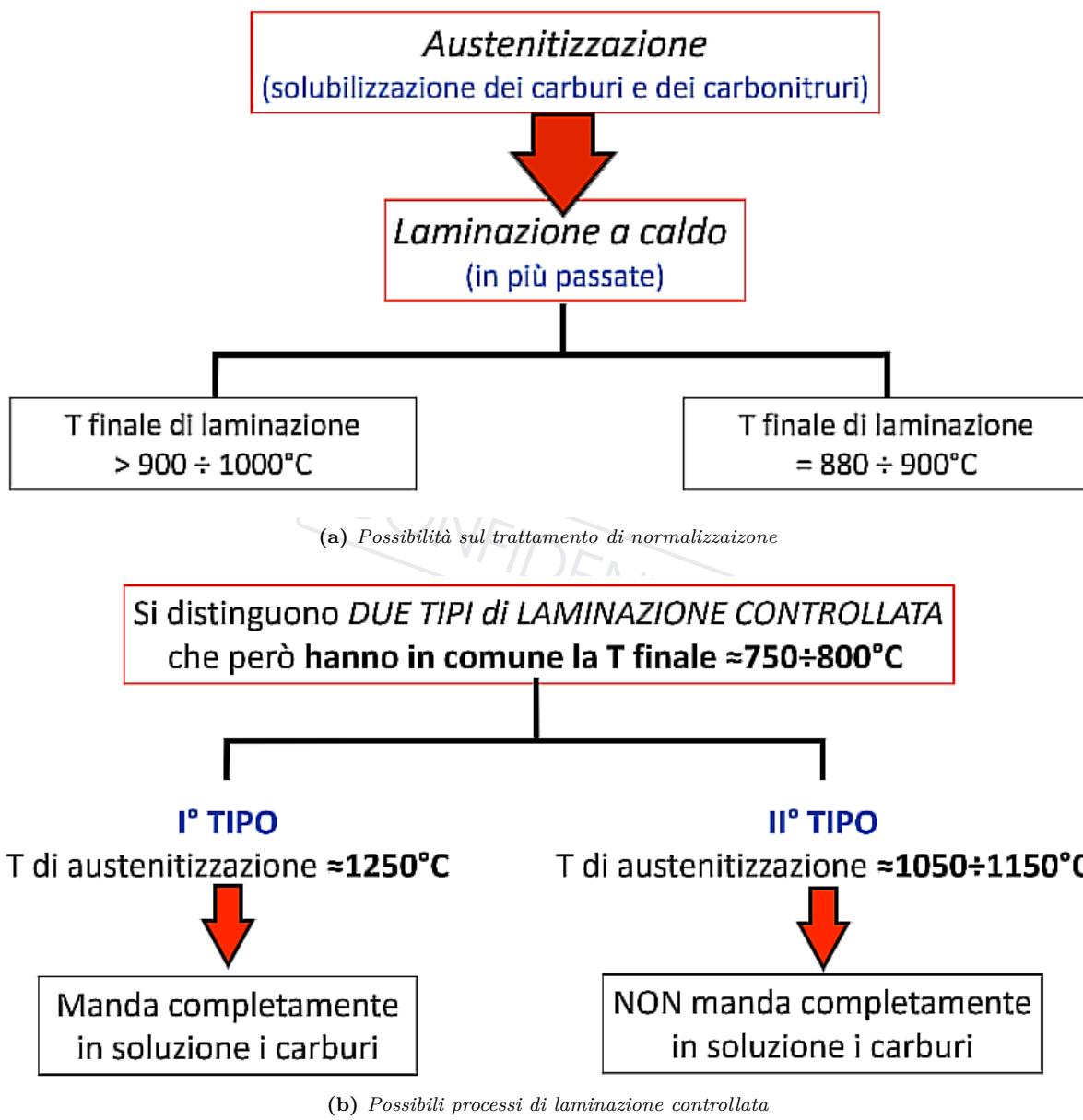
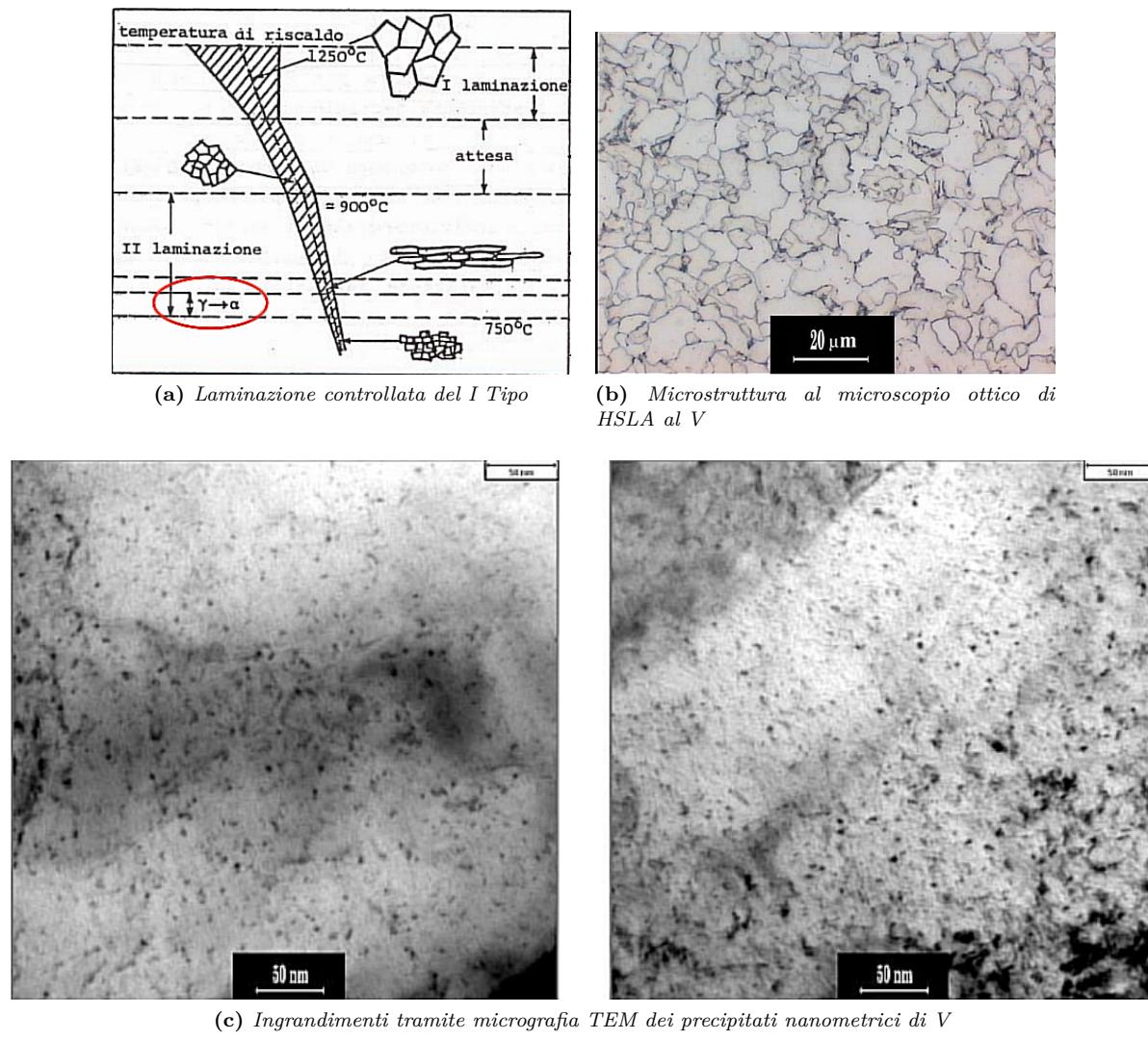


Figura 2.4: Lavorazioni per acciai ferritico-perlitici ad alta resistenza e tenacità

(c) Ingrandimenti tramite micrografia TEM dei precipitati nanometrici di V **Figura 2.5:** Acciai Ferritico-Perlitici ad alta resistenza e tenacità

2.4.3 Acciai a basso tenore di C con struttura aciculare

Con questa classe di acciai si è superato il valore di resistenza $R_s \approx 500 \div 600 \text{ MPa}$ senza ricorrere ad acciai da bonifica. Andando ad evolvere ulteriormente le classi di acciai viste in precedenza. In particolare questi acciai possiedono:

- Alta tenacità
- Buona saldabilità

Caratteristiche donate dal fatto di una laminazione a caldo senza trattamenti termici che dona alta tenacità e resistenza. Il tenore C è limitato, per cui hanno una buona saldabilità. La struttura è quasi completamente *bainitica* (detta anche ferrite aciculare). Gli sviluppi si possono osservare dalle curve CCC, mostrate in figura 2.6. Si osserva come l'aggiunta di Mo e B modifichino le curve. Andando a preferire una specifica struttura. Infatti quei due elementi leganti aumentano considerevolmente la temprabilità del acciaio ottenendo proprietà meccaniche molto interessanti come: $R = 890 \text{ MPa}$, $R_s = 620 \text{ MPa}$, $A = 24\%$ con scarsa tenacità. Ciò è dovuto alla presenza del B, che tende a segregare a

bordo grano austenitico disattivando i centri di nucleazione di ferrite e perlite. Inducendo **frattura intergranulare**.

Si ha la necessità di sostituire il B con altri elementi meno problematici.

Successivi miglioramenti a questi acciai sono stati:

1. Sostituendo il B con il Nb (tenendo un tenore inferiore al 0.02%)
 - Si hanno dei precipitati di NbC lungo i piani paralleli all'interno dei grani durante la trasformazione da austenite a ferrite;
 - impedisce la crescita equiassica dei nuclei di ferrite.
2. Si possono ottenere delle resistenze più alte allo stato grezzo di laminazione a caldo sostituendo la Mn al Mo.
 - Si favorisce la formazione di bainiti inferiori;
 - $R_s \approx 620 \div 790 \text{ MPa}$;
 - ci sono difficoltà operative ne produrre acciai con $\text{Mn} > 2\%$.
3. Si può ottenere bainite anche con una tempra in linea all'uscita del laminatoio mantenendo una velocità di raffreddamento $V_{\text{raff}} = 100^\circ\text{C/s}$
4. Migliorando le tecniche di produzione con limitazione spinta del tenore di zolfo e modifica della forma delle inclusioni.

Gli acciai High Strength Steels (**HSS**) sono acciai con $300 \text{ MPa} < R_m < 700 \text{ MPa}$ che includono gli acciai rinforzati per incrudimento, soluzione solida, precipitazione e affinamento del grano tra cui Interstitial Free High Strength (**IF-HS**), Isotrophic Steels (**IS**), Bake Hardens (**BH**), Alto tenore di Carburi di Manganese (**CMn**) e **HSLA**.

Mentre gli **AHSS** di prima generazione sono acciai con $R_m > 500 \text{ MPa}$ e costituiti in generale da una microstruttura complessa formata da più fasi (ferrite, martensite, bainite e austenite residua)

- Acciai rinforzati per trasformazioni strutturali (**DP**, **TRIP**, Martensitic Steel (**MS**));

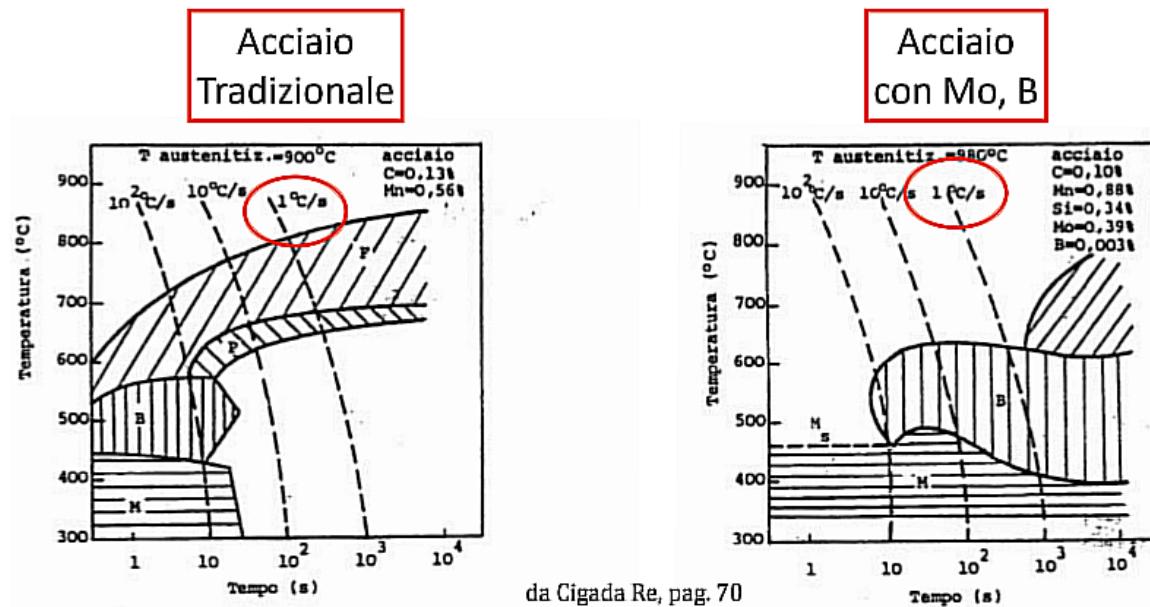


Figura 2.6: Confronto curve CCC tra acciaio Ferritico-Perlitico e a basso carbonio a struttura Aciculare

- Acciai con rafforzamento misto: affinamento del grano, precipitazione e trasformazioni strutturali (Complex Phase (**CP**)).

La nomenclatura di questi acciai può essere rappresentata tramite la classica designazione CEI EN, però non è raro trovarli secondo la nomenclatura della **ULSAB-AVC**. La nomenclatura prevede:

2.4.4 Definizione (Nomenclatura ULSAB-AVC):

$$\text{XXXX aaa/bbb} \quad (2.4)$$

Dove:

XXXX indica il tipo di acciaio

aaa indica R_s minimo garantito in MPa

bbb indica R_m minimo garantito in MPa

Sebbene gli acciai visti in questo capitolo già riescano ad avere degli ottimi risultati in termini di resistenza meccanica, senza compromettere troppo la duttilità del materiale, ulteriori sviluppi di questi acciai sono in fase di studio portando la così detta II generazione di acciai **AHSS**. L'obiettivo è sempre quello di realizzare degli acciai a basso costo (basso leganti) che possano essere realizzati in processi di fonderia non eccessivamente complicati. In modo tale da permettere la realizzazione di acciai ad alta resistenza e tenacità a basso costo di produzione.

Ora verranno presentati alcuni tra gli **AHSS** più avanzati presenti sul mercato come i **DP**, **TRIP**, **TWIP** e **QandP**.

Come si possono realizzare degli acciai che contengano più fasi nella soluzione solida?

Il procedimento viene chiamato **processo termomeccanico** un esempio è riportato alla figura 2.9. Si tratta di processi di produzione tramite cottura intercritica e inter-critica continua. Ovvero, il tutto parte sulla base delle curve Time Temperature Transformation (**TTT**). Per cui si realizza un raffreddamento controllato in modo da portare l'acciaio in una specifica fase ferrosa. Da lì, controllando il raffreddamento si possono ottenere delle soluzioni solide a diversa concentrazione di fasi diverse in base alla permanenza, in una delle zone di trasformazione di fase.

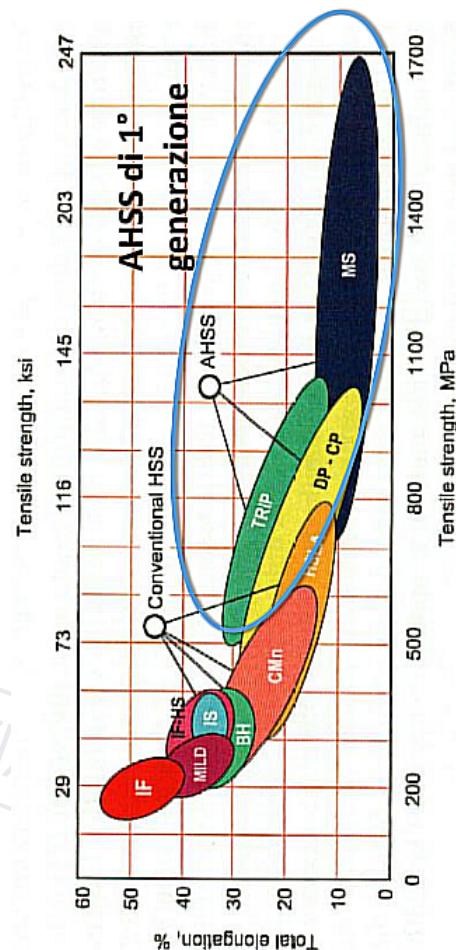


Figura 2.7: Rappresentazione della resistenza/duttilità degli acciai HSS e AHSS

Euronorms				
HSLA 260	HC260LA (+ZE) /HX260LAD (+Z, +ZF, +ZA)			
HSLA 300	HC300LA (+ZE) /HX300LAD (+Z, +ZF, +ZA)			
HSLA 340	HC340LA (+ZE) /HX340LAD (+Z, +ZF, +ZA)			
HSLA 380	HC380LA (+ZE) /HX380LAD (+Z, +ZF, +ZA)			
HSLA 420	HC420LA (+ZE) /HX420LAD (+Z, +ZF, +ZA)			
YS (MPa) UTS (MPa) $e_t (\%)$ $L_o = 80 \text{ mm}$ $th < 3 \text{ mm}$				
HSLA 260	260 - 320	350 - 410	≥ 28	
HSLA 300	300 - 360	390 - 450	≥ 26	
HSLA 340	340 - 400	420 - 490	≥ 23	
HSLA 380	380 - 450	460 - 530	≥ 20	
HSLA 420	420 - 520	470 - 590	≥ 17	
■ Hot rolled				
■ Cold rolled				
(a) Designazione acciai HSS cold rolled				
Euronorms				
HSLA 320	S315MC/HX340LAD (+Z)			
HSLA 360	S355MC/HX380LAD (+Z)			
HSLA 420	S420MC/HX420LAD (+Z)			
HSLA 460	S460MC/HX460LAD (+Z)			
HSLA 500	S500MC/HX500LAD (+Z)			
HSLA 550	S550MC			
YS (MPa) UTS (MPa) $e_t (\%)$ $E_t (\%)$ $L_o = 80 \text{ mm}$ $th < 3 \text{ mm}$ $L_o = 5,65 \sqrt{S_o} \text{ (mm)}$ $th \geq 3 \text{ mm}$				
HSLA 320	325 - 385	415 - 470	≥ 24	≥ 28
HSLA 360	360 - 435	450 - 520	≥ 21	≥ 25
HSLA 420	420 - 500	490 - 570	≥ 20	≥ 23
HSLA 460	460 - 550	550 - 650	≥ 17	≥ 21
HSLA 500	500 - 590	570 - 670	≥ 15	≥ 19
HSLA 550	550 - 650	650 - 730	≥ 15	≥ 18
■ Hot rolled				
■ Cold rolled				
(b) Designazione acciai HSS hot rolled				
Euronorms				
FF 280 DP	HCT500X (+Z)			
Dual Phase 450	HCT450X (+ZE, +Z, +ZF)			
Dual Phase 500	HCT490X (+ZE, +Z)			
Dual Phase 600	HCT590X (+ZE, +Z, +ZF, +ZM)			
Dual Phase 780 Y450	HCT780X (+ZE, +Z, +ZF)			
Dual Phase 780 LCE Y450	HCT780X (+ZE)			
Dual Phase 780 Y500				
Dual Phase 780 LCE Y500				
Dual Phase 980 LCE Y600	HCT980X (+ZE, +Z, +ZF)			
Dual Phase 980 LCE Y660				
Dual Phase 980 Y700	HCT980XG (+ZE)			
Dual Phase 980 LCE Y700	HCT980XG (+ZE, +Z, +ZF)			
Dual Phase 1180	HCT1180G2 (+ZE)			
■ Dual Phase 600				
■ Dual Phase 780				
(c) Designazione acciai Dual Phase				

Figura 2.8: Designazioni secondo ULSAB-AVC a confronto con normative UNI EN

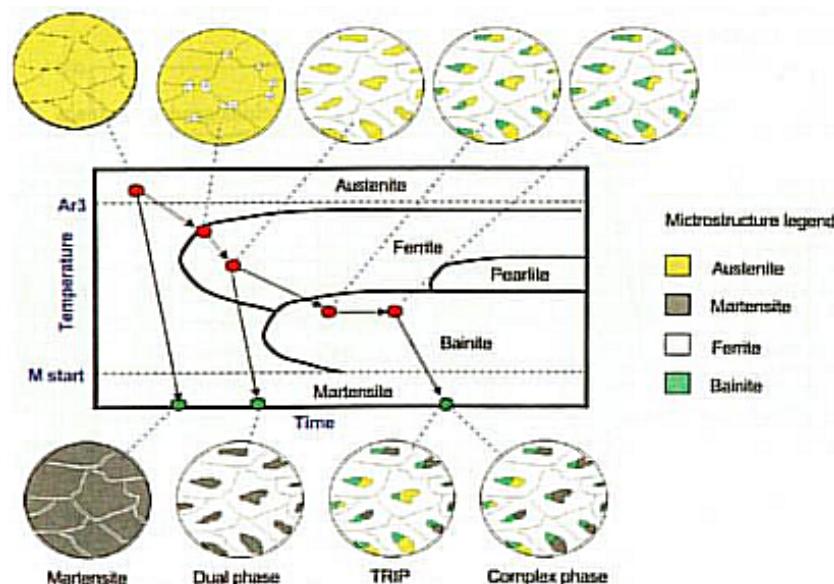


Figura 2.9: Esempio di processo termomeccanico con i relativi risultati

2.4.4 Dual Phase

Gli acciai Dual Phase (DP) sono caratterizzati da una lega abbastanza povera.

2.4.5 Definizione (Dual Phase):

C $0.06 \div 0.15\%$	Cr, Mo $\leq 0.4\%$	V $\leq 0.6\%$	Nb $\leq 0.04\%$
---------------------------	--------------------------	---------------------	-----------------------

Le caratteristiche salienti per questo tipo di acciaio sono ad esempio: la presenza di snervamento continuo, con un basso rapporto $R_s/R_m = 0.60 \div 0.65$ (considerando che in genere per un comune HSLA è $= 0.7 \div 0.8$). I prodotti ottenibili presentano una variegata possibilità di tensioni di snervamento con $R_s = 500 \div 1200 \text{ MPa}$ anche se quelli più utilizzati sono i DP600. Hanno un buon comportamento a deformazione che si presenta molto uniforme. Anche la resistenza a fatica è molto valida. Come anticipato: la lega è molto povera quindi il costo di produzione non è eccessivo. In genere vengono impiegati per: parti resistenti delle carrozzerie e costruzioni metalliche generiche.

In generale per gli acciai DP600, in figura 2.10, si realizzano con una percentuale di ferrite attorno al $60 \div 90\%$ che risulta molto povera di carbonio $< 0.02\%$. Mentre la martensite è più ricca di carbonio

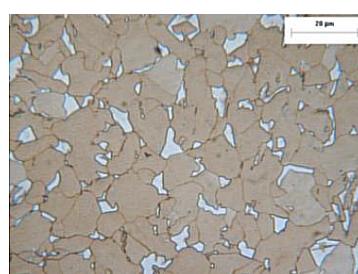


Figura 2.10: Microstruttura acciai DP

rispetto all'acciaio di partenza. Se ne ottiene:

1. Una struttura profondamente stampabile, grazie alla ferrite;
2. Con elevate caratteristiche meccaniche per via della martensite.

Per ottenere questo tipo di acciaio viene eseguita una **ricottura continua intercritica**:

1. Dopo la laminazione l'acciaio viene portato a temperatura tra A_1 e A_3 .
2. viene mantenuto a tale temperatura (in zona intercritica $\alpha + \gamma$) per la trasformazione da austenite a ferrite fino al 80%.
3. Approfittando di un campo di non trasformazione tra ferrite e perlite e la bainite, si effettua l'avvolgimento in coils senza incontrare la trasformazione bainitica.

Siccome resta la percentuale di austenite $\approx 20\%$, quella verrà trasformata in:

Bainite circa il 2 \div 5%;

Martensite- α' circa il 18 \div 15%.

2.4.5 Acciai TRIP

Prevedono anche una quota parte di austenite residua (tra il 5 \div 20% di residuo), viene sfruttata per l'effetto **TRIP** in figura 2.11b. Deformando plasticamente l'austenite che diventa martensite, viene promossa tramite la deformazione del materiale. Dopo la deformazione diventa più resistente. Dunque si aumenta la formabilità del materiale. Se si lascia dell'austenite residua, può essere che un forte impatto vada a trasformare la restante austenite in martensite. Portando il materiale a resistere all'impatto.

2.4.6 Definizione (Acciai TRIP):	Tipica lega per gli acciai TRIP:
$C = 0.2\%$, $Mn = 1.8\%$, $Si = 1.6\%$	+Si e Al per stabilizzare l'austenite + Ti e V per aumentare la resistenza

L'ottenimento degli acciai **TRIP** non è troppo diverso da quello dei **DP** visti in precedenza, cambia la zona di permanenza durante il raffreddamento come si vede in figura 2.12.

Sebbene le caratteristiche meccaniche siano eccezionali, questi acciai presentano dei limiti tipo:

- Hanno elevati valori di elementi in lega;

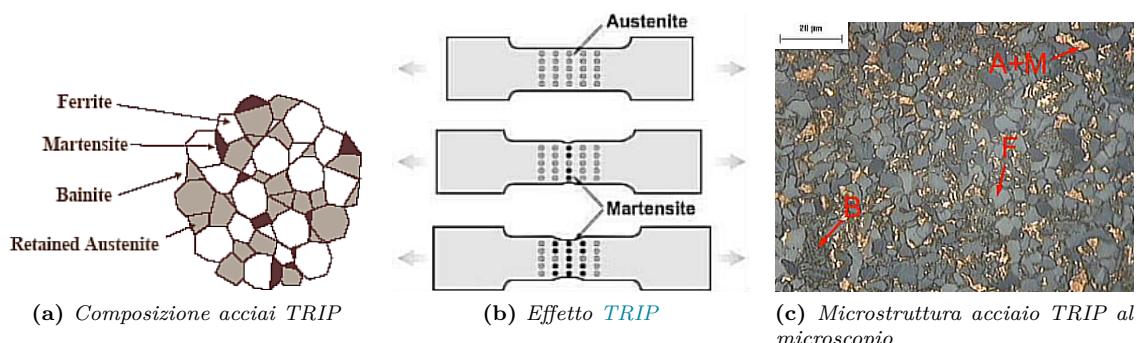


Figura 2.11: Gli acciai TRIP

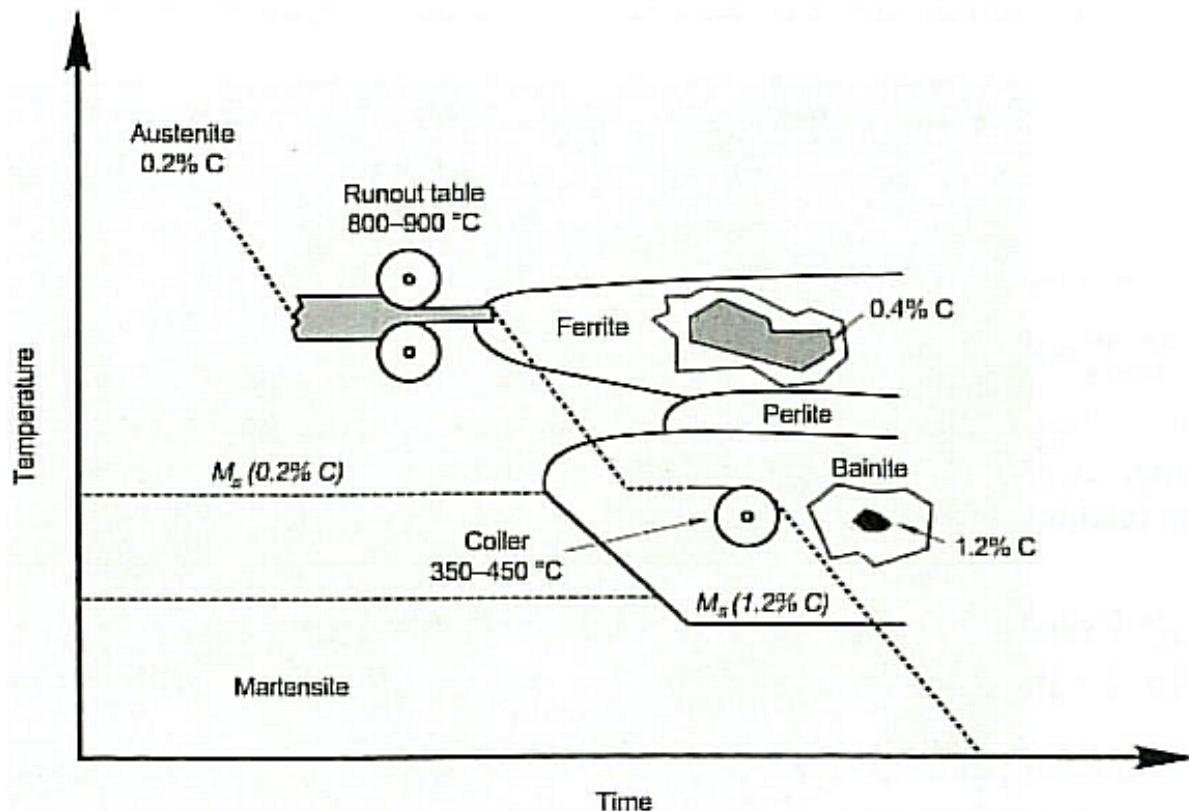


Figura 2.12: Processo produttivo degli acciai TRIP

- Le operazioni di saldatura sono rese difficili dagli alti tenori di Mn-Si o Mn-Al che chiedono altrettanto elevati tenori di C ($\approx 0.15 \div 0.25\%$). Quindi rendendo le operazioni di saldatura abbastanza problematiche.
- A causa degli elementi in lega, possono incorrere delle situazioni di ossidazione durante le laminazioni e la zincatura a caldo non è incoraggiata.
- Se la stabilità dell'austenite è modesta, possono verificarsi delle trasformazioni in martensite per via della bassa temperatura ambientale.

2.4.6 Acciai TWIP

A differenza dei loro predecessori, presentano un comportamento allo snervamento particolare: Mentre gli acciai TRIP, se sottoposti a sollecitazione, trasformano i residui di austenite in martensite irridendosi. Gli acciai TWIP resistono alla tensione fino a quasi un 90% di deformazione. Ciò li rende particolarmente interessanti in quanto posseggono delle caratteristiche meccaniche molto promettenti, senza trascurare la tenacità. Il problema di questi acciai deriva dal fatto che posseggono una lega particolarmente ricca. Dunque non sono esattamente a buon mercato.

2.4.7 Q&P

Sono acciai realizzati tramite un innovativo metodo di trattamento termomeccanico. Di base sono acciai TRIP in cui viene controllata la diffusione del carbonio dalla martensite all'austenite residua.

Trasferimento di carbonio dalla martensite all'austenite. Il carbonio in eccesso non deve formare dei carburi, ma deve trasferirsi nell'austenite. Perché quando si torna a raffreddare, l'austenite viene

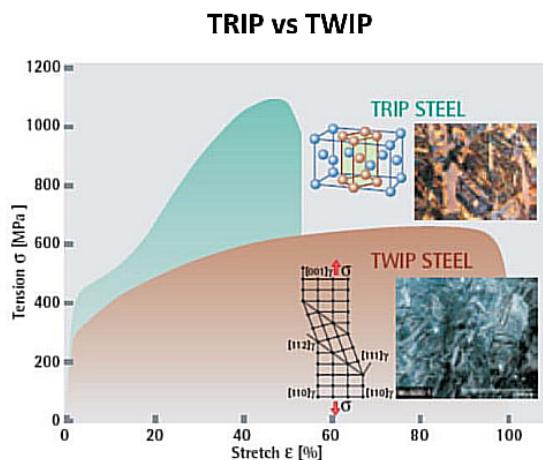


Figure 2: The stress-strain diagram clearly shows the differing characters of TRIP and TWIP steel. TRIP steel can resist high stresses without deforming. TWIP steel deforms with low stresses, but does not break until strain reaches around 90 percent.

Figura 2.13: Confronto in termini di deformazione-snervamento tra acciai TRIP e TWIP

stabilizzata abbassandone la temperatura M_f . In questo caso invece di avere un'austenite che si trasformerà in martensite, deve rimanere tale e quale per garantire più deformabilità, mantenendo una buona durezza.

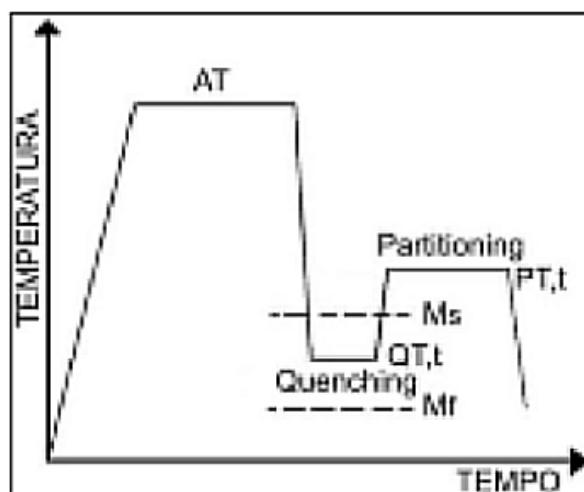


Figura 2.14: Metodo di realizzazione dei QandP

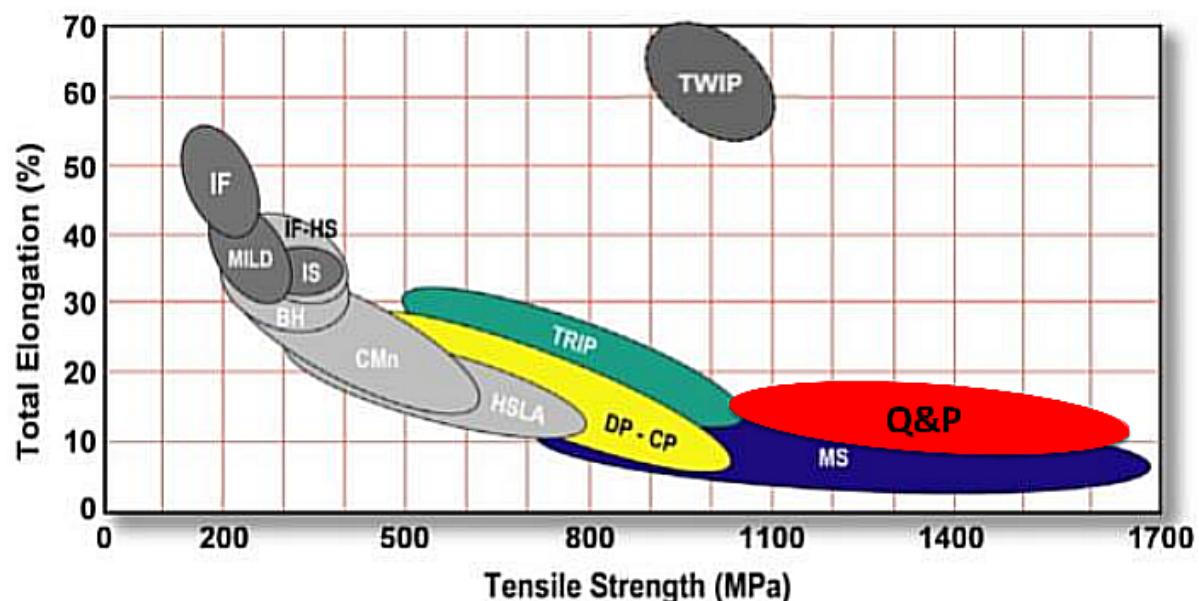


Figura 2.15: Acciai AHSS di seconda generazione e la loro collocazione in caratteristiche meccaniche

CAPITOLO 3

Acciai Speciali da Costruzione

Sono acciai che vengono caratterizzati tramite la composizione chimica infatti questi acciai sono spesso trattati con successivi trattamenti termici prima di essere messi in opera.

In generale vengono classificati tra:

- Acciai da costruzione propriamente detti;
- Acciai inossidabili;
- Acciai da utensili.

3.1 Acciai speciali da costruzione propriamente detti

Sono acciai calmati che spesso vengono legati con diversi elementi che donano particolari capacità tipo: temprabilità, tenacità, buon compromesso tra tenacità e resistenza meccanica, resistenza all'usura e altre... Come accennato prima spesso vengono applicati dopo aver subito un trattamento termico (tempra + rinvenimento). In genere son impiegati per applicazioni che devono resistere a elevate sollecitazioni dinamiche e statiche.

Questi vengono ulteriormente suddivisi secondo l'impiego.

- Acciai da bonifica,
- Acciai da cementazione,
- Acciai da nitrurazione,
- Acciai per molle,
- Acciai per cuscinetti,
- Acciai "automatici",
- Altri (acciai da bulloneria)...

In generale sulle schede tecniche degli acciai si trovano degli intervalli con dei valori nominali di composizione chimica. Alcuni riferimenti si posso trovare nelle varie normative tipo la UNI EN 10027 ed eventuali normative prodotto aggiuntive. Inoltre, viene accompagnato con la lista dei trattamenti termici che il materiale ha subito ed eventuali caratteristiche meccaniche che si sono raggiunte.

Le motivazioni dietro a questa non precisa specificità della composizione del materiale è dovuta al fatto che ci sono diverse variabili che incorrono per il raggiungimento degli obiettivi meccanici. Dunque è difficile effettivamente stimare la composizione chimica.



Figura 3.1: Trattamento termico per gli acciai da bonifica

3.1.1 Acciai da Bonifica

Gli acciai da bonifica sono acciai che subiscono un trattamento termico tipo quello in figura 3.1.

Gli acciai da bonifica sono adatti, in relazione alla loro composizione chimica, per sopportare sforzi, urti e vibrazioni, infatti di solito si realizzano:

- Alberi motore,
- assi,
- pignoni,
- bielle,
- rotismi,
- ecc...

Infatti sono parti della macchina che devono possedere delle buone resistenze a carichi elevati ed alta tenacità.

Parte III

Acciai Inossidabili

CONFIDENTIAL

3.2 Acciai inossidabili austenitici

3.2.1 Tattamenti termici applicabili

Durante un'eventuale saldatura, il processo di raffreddamento non è controllato per cui non si è sicuri se il processo di stabilizzazione sia ancora valido. Perciò è meglio optare per degli acciai low carbon. Per gli acciai austenitici la sensibilizzazione avviene ad una certa distanza dal cordone di saldatura. Per quelli feritici invece si avvicina al cordone per via delle caratteristiche dell'acciaio.

3.2.1.1 Trattamento di distensione

Si riscalda l'acciaio ad una temperatura inferiore alla temperatura di inizio sensibilizzazione. Tenendo il processo per circa $30\text{min} \div 2\text{h}$. Successivo raffreddamento in aria calma. Si fa per eliminare le tensioni interne generate per qualsiasi motivo. Ciò riduce il pericolo della *tensocorrosione*. Il processo si esegue solo in caso in cui si presume che ci sia tale motivo di corrosione.

Gli acciai inox austenitici non hanno particolari caratteristiche meccaniche. Risultano però molto deformabili e hanno una buona capacità di incrudimento. È possibile che si vada a generare l'effetto **TRIP** (visto in precedenza). Per via del fatto che essendo deformato a freddo, c'è la tendenza che l'austenite venga trasformata in martensite (Sotto la temperatura M_d ovvero quella temperatura che permette la trasformazione di austenite in martensite a fronte di una deformazione).

Gli acciai austenitici hanno una buona resistenza al Creep ovvero uno sforzo ad alta temperatura a carico costante.

Riassumendo:

Gli acciai inossidabili austenitici hanno un buon comportamento a bassa temperatura in quanto non presentano la transizione duttile- fragile. Ad alta temperatura bisogna stare attenti alle temperature critiche di sensibilizzazione. Possono resistere bene alla corrosione in ambienti aggressivi. Sono molto utilizzati in quei campi dove la sicurezza è di fondamentale importanza.

I super-austenitici vengono chiamati così perché hanno valori di PREN > 40.

Tabella 2.38 VALORI MEDI INDICATIVI DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE DEGLI ACCIAI INOSSIDABILI AUSTENITICI SOLUBILIZZATI

<i>Tipo</i>	<i>Durezza</i>		<i>Prova di trazione</i>			<i>Resilienza</i>	
	<i>Brinell</i>	<i>Rockwell B</i>	$R_{P0.2}$ N/mm ²	R N/mm ²	<i>A</i> %	<i>Z</i> %	<i>KV</i> J min
302	160	82	280	650	45	60	125
304	150	80	250	600	55	65	141
304 L	140	75	220	550	55	70	157
305	150	80	260	620	55	60	141
309	160	82	320	650	45	60	125
310	180	85	350	650	45	60	110
316	150	80	260	620	55	70	125
316 L	140	75	240	550	55	70	141
321	160	80	250	600	50	55	125
347	160	80	260	630	40	55	118

Figura 3.2: Caratteristiche meccaniche degli acciai inossidabili austenitici dopo trattamento di distensione

3.3 Acciai inossidabili ferritici

Sono ancora acciai monofasici. Secondo l'[AISI](#) sono designati come 4XX. Non è completamente indicativa della struttura in quanto ci sono sia i ferritici che i martenitici con la stessa nomenclatura.

La tipica lega dei ferritici prevede leghe: Fe-C-Cr. Dunque si scelgono questi acciai quando si vuole optare per una scelta più economica. Hanno struttura ferritica a tutte le temperature. Fanno eccezione gli acciai detti *semiferritici* che se scaldati e portati in austenitizzazione e raffreddati velocemente formano della martenite. In genere non sono adatti ai trattamenti termici. E sottoporli a tali trattamenti compromette la resistenza a corrosione. Sono suscettibili al rinforzo per incrudimento, comunque meno di quanto fanno gli austenitici. Un acciaio ferritico di riferimento è l'[AISI](#) 430.

Missing
figure

3.3 (1) Aggiungere Metallografia AISI 442

3.3 (2) Vedi la tabella della comparazione delle proprietà

Possibile formazione della fase σ che contiene molto cromo andando ad infragilire la struttura e sensibilizza alla corrosione intergranulare.

3.3.1 Trattamenti termici

Non si vanno a migliorare le caratteristiche meccaniche come per gli austenitici. Piuttosto vengono tamponate delle situazioni in cui gli acciai potrebbero essere più sensibili.

3.3.1.1 Ricottura di ricristallizzazione

Si effettua per ricristallizzare un materiale che precedentemente ha subito una deformazione plastica. Non si deve mai superare la temperatura critica dei 850°C per cui il grano ferritico tenderebbe a ingrossare troppo. Siccome stiamo effettuando una ricristallizzazione non è detto che si possa effettuare una successiva deformazione (soprattutto se il pezzo è già stato formato). Si preferisce abbondare col raffreddamento, di solito fatto in acqua. Perché si può incorrere in fenomeni di infragilimento.

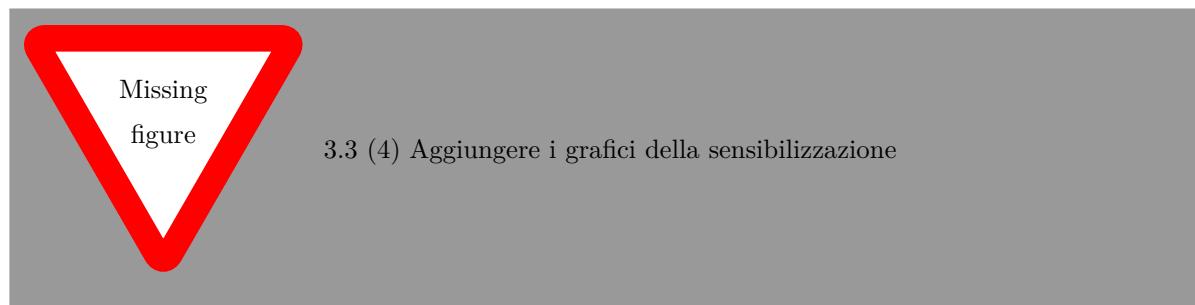
Infragilimento a 457°C Si ha una decomposizione della fase α . Da lì inizia a formarsi, per via dell'alta percentuale di cromo, da cui si forma sia fase α che α' . Dove la prima è molto ricca di Fe, l'altra più ricca di Cr. Se ne modificano le caratteristiche meccaniche e aumenta la TTDF. È un problema reversibile, si può scaldata nuovamente il materiale per poi raffreddarlo più velocemente.

Infragilimento per fase σ È reversibile, in maniera simile a quanto visto prima. Bisogna stare attenti alla temperatura di riscaldamento che deve essere $\approx 800^{\circ}\text{C}$.

Ciò pone questi acciai in situazioni di sensibilizzazione che può verificarsi a $T > 950^{\circ}\text{C}$. Perciò bisogna porre particolare attenzione alle saldature.

La motivazione è ancora in fase di studio. Perciò non è completamente chiara.

3.3 (3) acronimo



Si potizza che: a causa della non omogeneità della matrice del materiale, si vadano a formare delle isole austenitiche interne al grano ferritico. Allora possono formarsi dei carburi di ferro che precipitano, risultando più sensibili alla corrosione. Non esiste un processo di stabilizzazione del materiale, perché il processo di sensibilizzazione non è strettamente legato alla precipitazione di carburi di cromo. Perciò non è così efficace.

3.3.1.2 Acciai ferritici ELI

Si tratta di leghe Fe-Cr-Mo a bassissimi tenori di C e N. Presentano alta resistenza alla tensocorrosione.

3.4 Acciai inossidabili Martensitici

Si applicano per quelle applicazioni in cui si vuole una buona resistenza alla corrosione (ben maggiore dei CORTEN) ma non si vuole rinunciare alle caratteristiche meccaniche. Sono scuscettibili ai trattamenti termici di indurimento in quanto presentano i punti critici A₁ e A₃. Dopo la tempra presentano una struttura martensitica o martensitica con carburi. Per cui si raggiungono durezze molto elevate $\approx 45\text{HRC} \div 65\text{HRC}$.

Non sono facili da saldare in quanto i tenori di carbonio sono parecchio elevati.

Una designazione tipica di riferimento è l'AISI 410.

3.4 (5) Aggiungere i tenori di carbonio

3.4.1 Trattamenti termici

3.4 (6) vedi slides per maggiore completezza

Hanno elevata temprabilità e vengono in genere temprati in olio e in aria, detti anche autotempranti (la scelta dipende dagli spessori).

3.5 Acciai inossidabili PH

Acciai non più monofasici, andando ad interrogare gli acciai duplex. Precipitation Hardening (PH). Sono stati sviluppati per richieste dell'industria aeronautica e bellica. Hanno elevate caratteristiche meccaniche al contempo elevate caratteristiche alla corrosione. Tali caratteristiche si sono ottenute grazie al processo di indurimento per precipitazione. Spesso vengono nominati tramite il nome commerciale piuttosto della designazione normativa. Secondo l'AISI sono la serie 6XX. Come riferimento al AISI 630.

Si nota, dalla nomenclatura europea, che i tenori di carbonio è molto molto basso 0.01% per alcune formulazioni. Questa caratteristica non è troppo distante dagli acciai austenitici. Ciò impone che le caratteristiche meccaniche vengano demandate ai (molti) elementi in lega tipo Cu, Ti, Al. Si demanda alla precipitazione di altre soluzioni. Ad esempio spesso si hanno precipitazioni tipo: Ni₃X dove X è un altro elemento in lega. Si può avere la presenza di precipitati di carburi o nitrocarburi. In modo

3.5 (7) Aggiungere eventuali nomenclature europee

da formulare precipitazioni fini e disperse si possono incrementare la resistenza meccanica dell'acciaio come già visto anche per gli **HSLA**.

Vengono suddivisi in tre classi:

Martensitici come riferimento si prende il 17-4 PH che corrisponde al AISI 630. Tra l'altro è l'acciaio più diffuso per questa tipologia di acciai

Semi-austenitici come riferimento si può considerare il 17-7 PH che equivale all'AISI 631. Vengono forniti allo stato austenitico. Dopo tutto il processo di produzione e trattamento termico finale si ha una matrice non più austenitica ma martensitica. Da qui il nome semi-austenitico.

Austenitici Hanno più alto contenuto di P, per cui viene evidenziato nella sigla omettendo la H: 17-10 P mentre non ha una corrispondenza perfetta nella nomenclatura **AISI**.

La nomenclatura indica nelle prime cifre la percentuale del tenore di Cr, nelle seconde la percentuale di Ni. Tra l'altro il tenore di Ni abbassa i punti M_s e M_f si abbassano per cui si favorisce una matrice austenitica piuttosto di quella martensitica. Inoltre grazie alla presenza in lega di particolari elementi si sfrutta un'indurimento misto tra precipitazione di carburi (anche se il carbonio è molto poco) e altre precipitazioni. Si ricorda che affinché sia efficace la precipitazione, i precipitati devono essere piccoli e dispersi. Altrimenti si infrange la struttura peggiorando la situazione.

Missing
figure

3.5 (8) Aggiungere tabella per gli acciai PH

3.5.1 Trattamenti termici

Per gli acciai **PH** subiscono un trattamento termico che è comune anche agli acciai

- acciai Maraging, acciai martensitici induriti tramite precipitazione.
- leghe di alluminio
- Superlegghe

Missing
figure

3.5 (9) Grafico trattamento termico PH

Il processo è il seguente

1. Solubilizzazione tra i 750 ÷ 1050°C
2. Tempra

3. Invecchiamento.

Si ottiene un'indurimento per precipitazione dovuto a precipitazione della matrice di composti intermetallici, carburi, nitruri o fasi contenenti Cu o altri elementi.

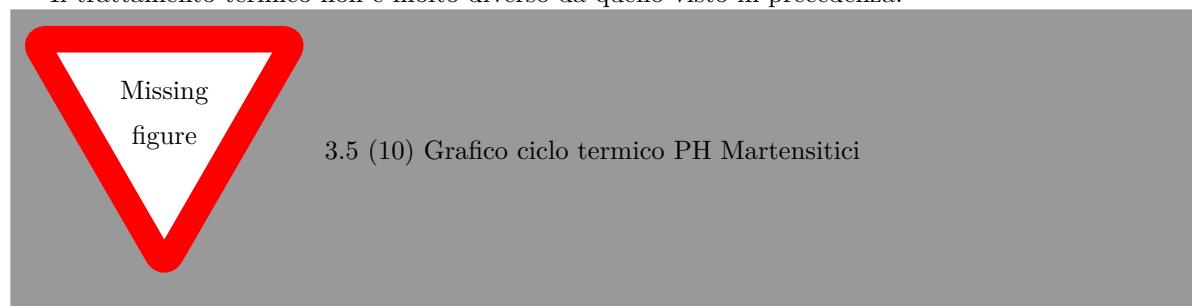
Ora vediamo come cambia il processo di produzione per le varie classi di **PH**.

3.5.2 Acciai PH Martensitici

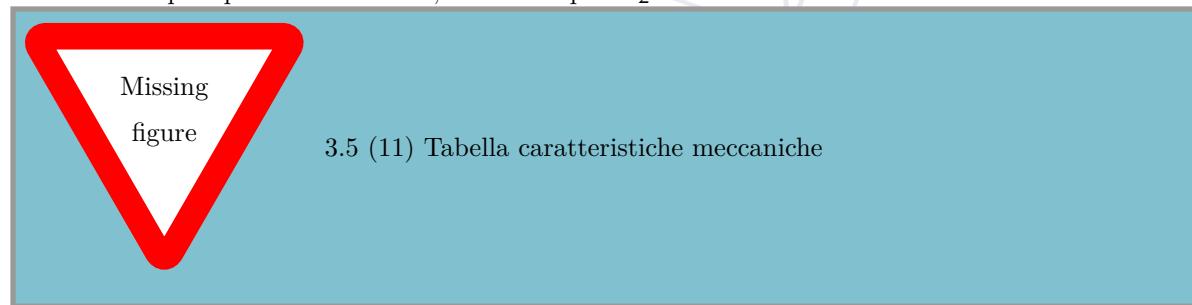
Sono i più impiegati e vengono forniti già allo stato martensitico. Contengono una buona dose di Cu $\approx 4\%$ e spesso presentano anche del Nb per realizzare dei carburi di niobio. M_f è maggiore della temperatura ambiente dunque si ha una matrice martensitica dopo rapido raffreddamento.

Combinano elevata resistenza meccanica e buona resistenza alla corrosione. Hanno un costo decisamente elevati. Le applicazioni sono molteplici grazie alla loro diffusione: sono stati sviluppati per l'ambito militare e aerospaziale. Ora si trovano in componentistica per automobili, ingranaggi e sensoristica. Vengono sfruttati anche per la manifattura additiva.

Il trattamento termico non è molto diverso da quello visto in precedenza.

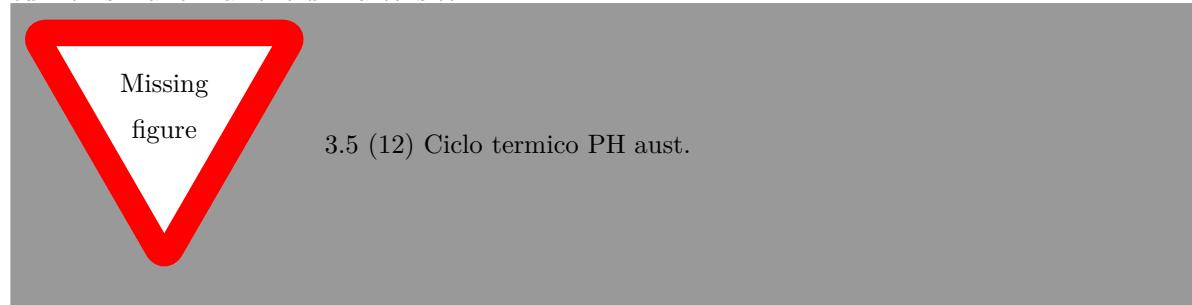


Si realizza una solubilizzazione a 1050°C e tempra. presentano una martensite duttile per il basso tenore di carbonio $\approx 0.05 \div 0.07\%$. Dopo l'invecchiamento con $T = 480 \div 620^{\circ}\text{C}$. La matrice risulta rinforzata da precipitati nanometrici, anche di tipo Ni_2X e fasi CFC ricche di Cu nel caso del 17-4 PH



3.5.3 Acciai PH Austenitici

Bisogna ricordare che in questo caso M_s e M_f sono sotto la temperatura ambiente (di molto). Per cui non si ha formazione di martensite.

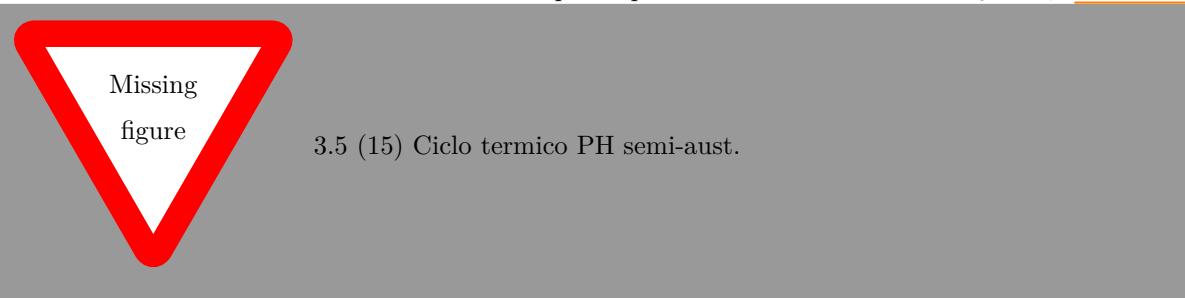


A temperatura ambiente post tempra, vengono effettuate le lavorazione a freddo per guadagnare resistenza meccanica e poi effettuare l'invecchiamento. Resta una buona riserva plastica anche dopo l'invecchiamento per via della struttura austenitica.

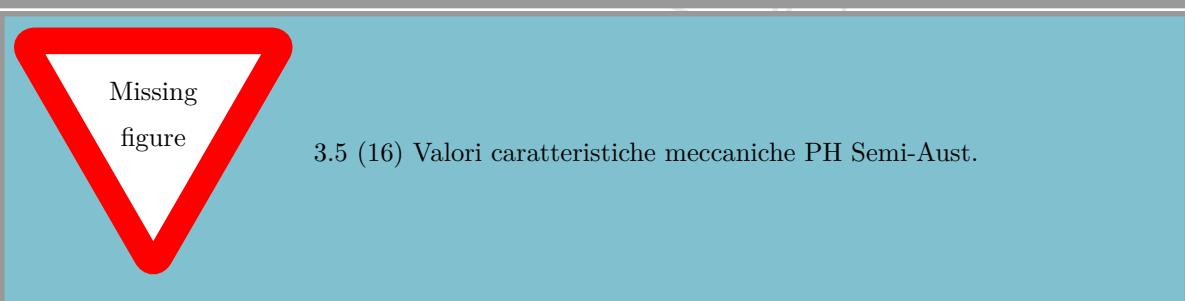


3.5.4 Acciai PH Semi-Austenitici

M_f è sotto temperatura ambiente, perciò sarà necessario un rappareddamento sotto temperatura ambiente. Per favorire il passaggio da austenite a martensite (Passaggio di condizionamento) per trasformare l'austenite in martensite. Grazie a questo processo si riesce ad alzare M_s e M_f .



3.5 (14)
Vedi de-
scrizione
ciclo ter-
mico nel-
le slide



3.5.5 Considerazioni conclusive

Con questi acciai si riescono a raggiungere delle ottime caratteristiche meccaniche, anche superiori agli inossidabili martensitici; ottenendo delle resistenze alla corrosione confrontabili con gli inossidabili austenitici.

Presentano una buona saldabilità! ad eccezione per gli acciai P, perché il fosforo tende a generare fasi basso-fondenti, rischiando di generare delle cricche a caldo.

Il trattamento di invecchiamento non provoca distorsioni quindi si hanno dei costi maggiori degli inossidabili. Viene compensato dai più ampi limiti d'impiego dell'acciaio.

3.6 Acciai Inossidabili Duplex

Da non confondere con gli acciai **DP** che presentano una combinazione tra ferrite e martensite (più eventuale bainite residua). In questo caso si parla di acciai che propongono metà struttura austenitica e metà in fase ferritica.

Tale composizione è ottenuta tramite il bilanciamento della lega Cr-Ni-Mo.

Sono acciai con costo medio-alto. Vengono impiegati in ambienti in cui



3.6 (18) Composizione struttura.

3.6 (17)
Vedi la slide per gli impieghi.

Vengono sfruttati per l'ambiente chimico-petrochimico e strutture off-shore. Sono saldabili e presentano una buona resistenza meccanica e alla corrosione. Non presentano ossidazione ad alta temperatura. Possono essere suscettibili all'ingrassamento a 475°C.



3.6 (19) Inserire tabelle nomenclature acciai duplex

Il prefisso "super" indica un valore di Pitting Resistance Equivalent Number (**PREN**) > 40%. Indice che questi materiali sono particolarmente resistenti ad attacchi corrosivi.

$$\text{PRE}_N = \% \text{Cr} + 3.3\% \text{Mo} + 30\% \text{Ni} \quad (3.1)$$



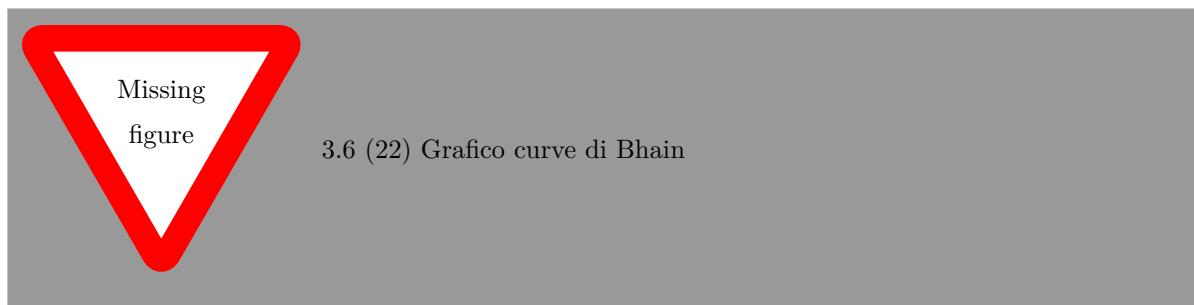
3.6 (21) Metallografie fenomeno pitting

3.6 (20)
Verificare le formule del PREN

Il pitting tende a formarsi sulla ferrite che non sull'austenite.

3.6.1 Trattamento termico per i duplex

Dal diagramma in figura, si può stimare quanta parte di fase δ e γ . La frazione delle due dipende dagli elementi in lega e dalla temperatura di raffreddamento. Di solito gli acciai duplex vengono **solubilizzati** tra i $1000 \div 1100^\circ\text{C}$. Viene seguito da una raffreddamento rapido per bloccare l'evoluzione delle due fasi. In più si vogliono evitare i fenomeni di ingrassamento e sensibilizzazione del materiale.



Attenzione al **PREN**: quello è un indice sulla base della composizione chimica del materiale. Se la microstruttura ha generato delle fasi infragilenti o sensibilizzanti, sicuramente il comportamento del materiale non è quello dato dalla sola composizione chimica.

CONFIDENTIAL

Parte IV

Acciai per utensili

CONFIDENTIAL

CAPITOLO 4

Acciai da utensile

Sono utilizzati per la lavorazione o la generazione della forma dei materiali metallici e non. Le lavorazioni a cui devono adempiere possono essere:

- Asportazione di materiale
- Deformazione plastica a caldo
- Deformazione plastica a freddo

Le principali proprietà spesso contrastanti fra le quali trovare un compromesso sono;

- durezza,
- resistenza all'usura e all'abrasione,
- mancanza di fragilità

Spesso per gli acciai da utensili si stimano in base alla loro durata: tanto più riesce a mantenere le sue caratteristiche, meglio è. In molti casi non viene specificata un parametro definito. Si cerca di farli durare il più possibile donandogli determinate caratteristiche gli permettono di sopportare una maggiore usura a fronte della lavorazione per cui sono studiati.

Quanti tipi di acciai per utensili esistono?

Ne esistono di molteplici formazioni, leghe ecc...in base alle necessità della lavorazione. Alcuni sono più adatti per la lavorazione a freddo, alcuni mantengono una durezza residua ad alta temperatura (temperatura di flash) nel tempo, alta resistenza all'abrasione, ecc...Caso per caso si hanno esigenze diverse per cui si sono sviluppati acciai corrispondenti. Tipo:

Acciai a basso C per esempio il C40U, è un acciaio a basso tenore di carbonio ottimizzato per la realizzazione da utensili.

Acciai debolmente legati Anche in questo caso ottimizzati in base alla lavorazione che devono eseguire

Acciai fortemente legati Si parla di un tenore di elementi leganti che arriva fino al 30%.

Di particolare importanza diventano i trattamenti termici, in base a questi uno stesso acciaio può ottenere proprietà diverse. Per esempio, gli acciai rapidi sono acciai che possono lavorare altri acciai, ottimizzati per lavorare ad alta velocità.

Di particolare importanza per questi acciai è sicuramente la purezza e la sequenza delle fasi di produzione dell'acciaio.

Il rendimento dell'utensile dipende particolarmente da:

1. Appropriata progettazione dell'utensile,
2. Accuratezza nella produzione dell'utensile,
3. Selezione accurata dell'acciaio più adatto allo scopo,

4. Corretta esecuzione del trattamento termico più appropriato.

4.0 (23) Citazione delle proprietà più richieste

La durezza dell'utensile deve essere maggiore del materiale da lavorare. Non è sempre vero, o meglio va adattato alla lavorazione. In genere si sceglie una differenza di durezza tra i due acciai di circa un centinaio di Viskers. La resistenza all'usura è un discorso complesso, indicativamente dipende dall'affinità tra i due materiali. Se i due metalli lo sono, l'utensile tenderà a durare meno. La resistenza a fatica viene suddivisa tra:

Resistenza a fatica meccanica in cui per ovviare a tale problema si agisce più sulla conformazione dell'utensile piuttosto del materiale.

Resistenza a fatica termica Dovuto ai cicli di produzione, ad esempio in presso-fusione dell'alluminio, in cui ne risente la finitura superficiale. Vale anche nel caso di utensili per asportazione. Prevalentemente è più problematica questa fatica perché gli utensili vengono più compressi che non trazionati.

Anche per questi acciai valgono le classiche relazioni tra durezza-duttilità e tenacità. La temprabilità non è da sottovalutare sempre in termini di garantire delle caratteristiche meccaniche non indifferenti per questi acciai. Attenzione all'aggiunta "compulsiva" di elementi di lega per aumentare la temprabilità. Di solito si abbassa la condutività termica: si rischia di andare a formare delle cricche a caldo sia in salita di temperatura che in spegnimento. Per cui è necessario controllare il mezzo di spegnimento. Ingrossando il grano si elimina una delle poche strategie per tenere duttile l'acciaio. Gli elementi in lega tendono ad irrigidire molto l'acciaio perdendo di tenacità. Per cui ingrossare troppo i grani per surriscaldamento non è cosa buona.

Negli acciai da utensili gli elementi in lega possono essere divisi in 2 gruppi:

Elementi che formano carburi Cr, Mo, W, V, Ti

Elementi che non formano carburi Si, Ni, Mn, Co

I vari elementi non vengono mai usati da soli ma agiscono in maniera sinergica. Molti degli elementi possono avere circa lo stesso effetto: la scelta tra i vari può essere fatto su prove sperimentali o su base al costo della lega.

I carburi che si formano sia sostituendo il Fe nella cementite che tramite carburi particolari tipo: MC , M_2C , M_3C , M_6C , M_7C_3 ... Tutti questi carburi sono più duri della cementite:

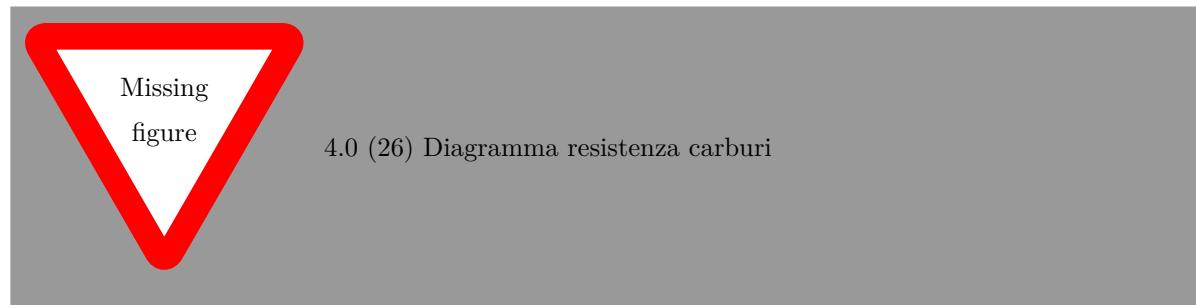
- aumentano la durezza e la resistenza all'usura
- rallentano l'addolcimento durante il rinfrescamento, fondamentale per gli acciai per utensili per lavorazioni a caldo
- I carburi hanno una minore velocità di coalescenza inferiore rispetto alla cementite.

Per avere la massima precipitazione fine e dispersa di carburi è necessaria la massima dissoluzione del carbonio nell'austenite.

Missing
figure

4.0 (25) Tabella tipologie di carburi ottenibili

4.0 (24)
Riorganizza
La de-
scrizione
preceden-
te per
abbellirla



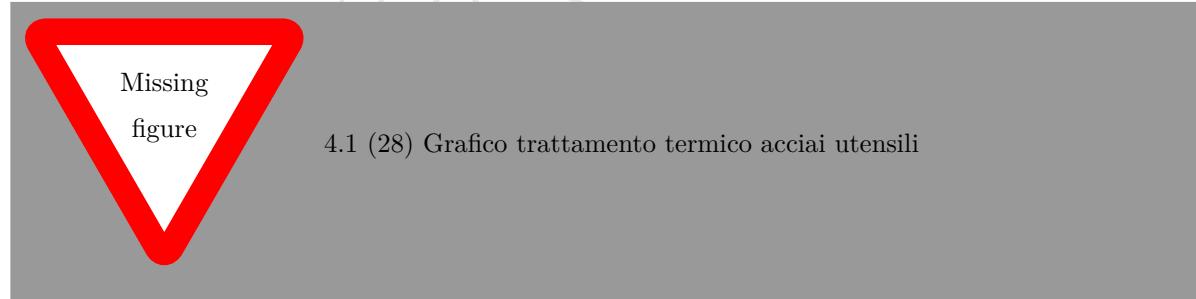
Ai carburi è richiesto di avere un periodo di coalescenza il più lungo possibile.

Gli acciai da utensili possono presentare il **Picco di durezza secondaria** ovvero un picco di durezza, alle volte superiore, per via delle alte capacità di resistenza al rinvenimento. Ciò è dovuto grazie alla precipitazione di alcuni carburi che avendo una velocità di diffusione modesta, che avviene solamente per temperature alte, allora si ha la precipitazione dei carburi proprio a quelle temperature in cui rinviene: per cui aumenta la durezza generale dell'acciaio.

Per gli elementi che non formano carburi In particolare il Co non forma mai carburi solidi. In più, rallenta la velocità di rinvenimento rallentando anche tutte quelle trasformazioni che avvengono durante il rinvenimento. Riduce però la temprabilità.

4.1 Trattamenti termici

Vediamo il tipico trattamento termico per gli acciai da utensili potrebbe essere:

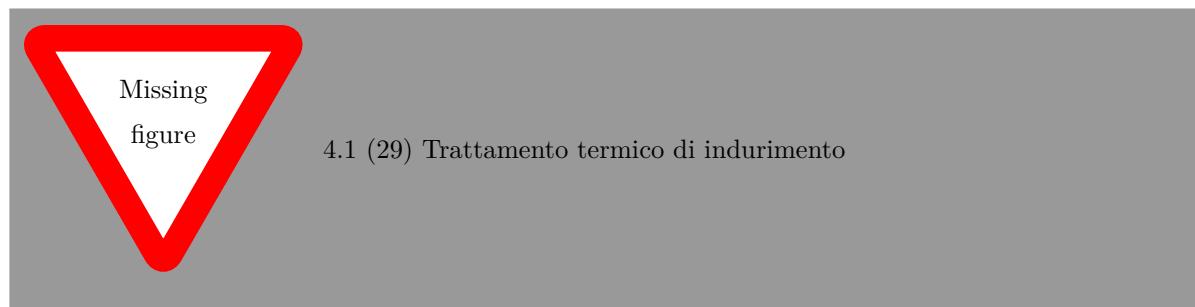


Ipotizzando di utilizzare un acciaio particolarmente legato. Si parte dalla colata di una lingotto o lingottino¹ e lo si raffredda al interno dello stampo. In fase di prima solidificazione si potrebbero ottenere strutture dendritica che presenta una maglia inter-dendritica caratterizzata dalla presenza di carburi. I carburi in prima solidificazione sono i residui della fase di prima solidificazione. Saranno, dunque, generati direttamente dal liquido: detti anche *primari*. Per sciogliere i carburi bisogna riportare il materiale ad una temperatura prossima a quella di fusione del materiale. Però non si vuole arrivare a quel punto perché se si manda l'acciaio vicino alla fusione si rischia di *bruciare l'acciaio*. A quello stato conviene rifondere tutto. La maglia non la si vuole. Si ha una zona del materiale che è particolarmente dura riducendo la tenacità. Allora si cerca di rompere la struttura dendritica e la maglia di carburi. Il processo di deformazione plastica a caldo viene detto **impastamento**. Inoltre si vuole evitare un incolonnamento dei carburi: altrimenti si avrebbe un materiale decisamente anisotropo. Segue una fase di ricottura, a temperatura più bassa della temperatura di lavorazione a caldo. Segue un raffreddamento controllato lente. Si va a fare la formatura dell'utensile. In fine si esegue una sorta di distensione per rilassare il materiale. Dopo può seguire il trattamento termico per la specifica caratteristica ricercata.

Il trattamento termico successivo prevede tre fasi:

¹Si utilizzano dei piccoli stampi di colata perché alto legaggio corrisponde ad una bassa condittività termica. Quindi per evitare che il materiale si fratturi durante il raffreddamento allora si preferisce realizzare dei lingotti molto piccoli

4.0 (27)
Aggiungere
anche
gli altri
elementi



1. Austenitizzazione,
2. Tempra,
3. Rinvenimento doppio o addirittura triplo.

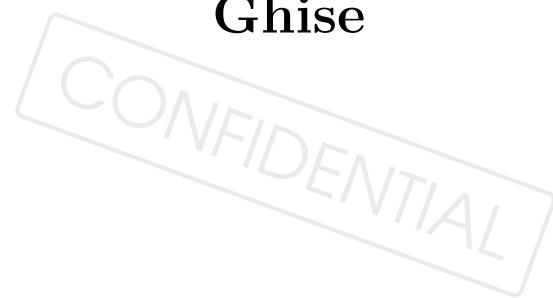
Il trattamento di indurimento viene eseguito post distensione perché data la bassa conduttività termica, se si scalda il materiale mentre presenta delle tensioni residue per via delle lavorazioni a freddo si rischia di creare delle fratture del materiale.

4.1 (30) Aggiungi lezione del 21/04/2023

CONFIDENTIAL

Parte V

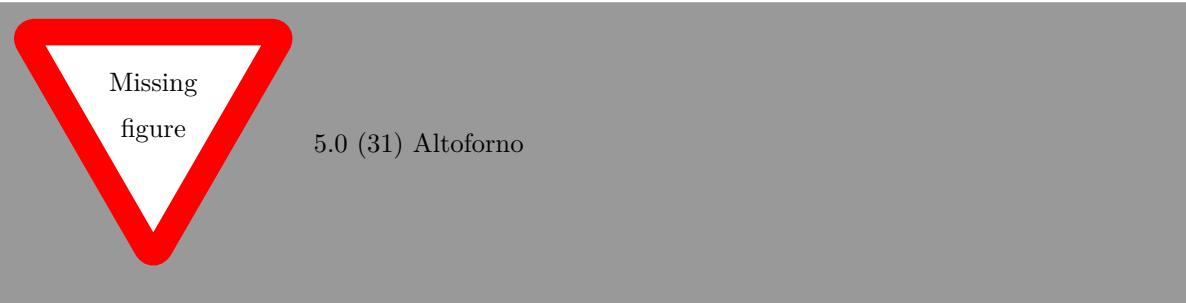
Ghise



CAPITOLO 5

Ghise

Le ghise sono dei prodotti ferrosi, contenenti un alto tenore di carbonio. Cioè conferisce proprietà completamente diverse dagli acciai, permettendo di raggiungere lo stato liquido a temperature più basse $\approx 1200^{\circ}\text{C}$. Sono particolarmente adatte alla lavorazione per colata. Interessano tutti i settori ingegneristici. Si considera una ghisa con tenore di carbonio $2.5\% \leq \% \text{C} \leq 4.5\%$. È anche notevolmente superiore al massimo di solubilità dell'austenite alla temperatura eutettica. Data l'elevata fragilità, non sono in genere lavorabili per deformazione plastica né a caldo né a freddo. Possiedono delle proprietà che possono essere variate in larga misura in relazione alla lega, in funzione del controllo della produzione ed eventuale trattamento termico.



Dall'altoforno si ottengono sempre delle ghise in prima colata a partire da:

- Minerale di ferro
- Coke metallurgico
- Vari fondenti

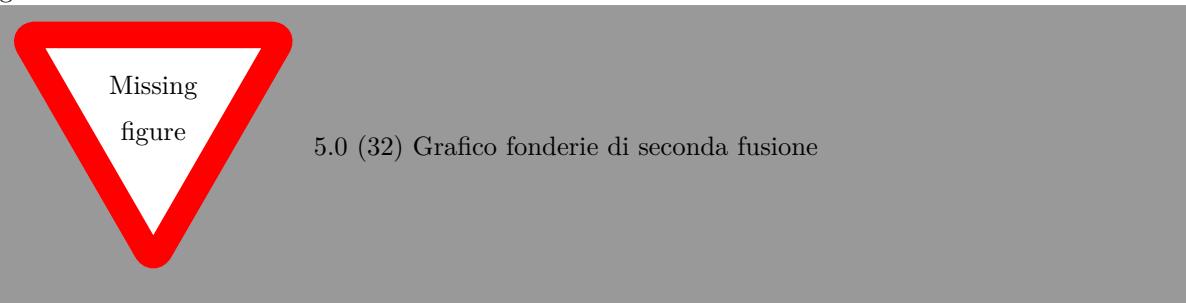
Si hanno diverse trasformazioni nel tino del forno si ottengono;

Ghisa che verrà successivamente:

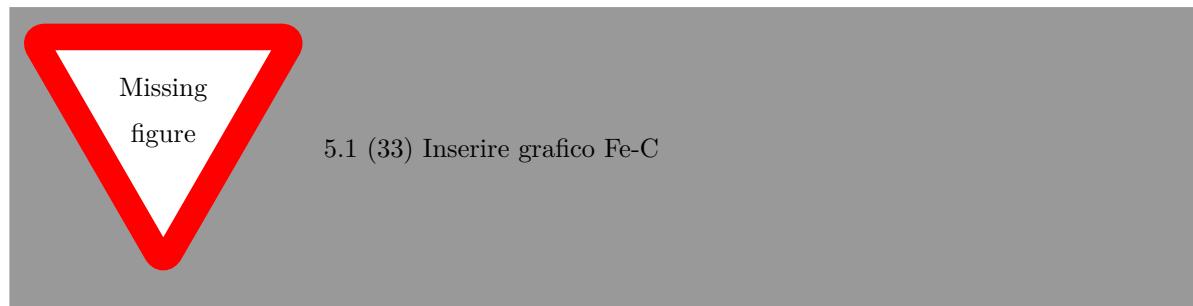
- Produzione di acciaio, in ciclo integrato
- Realizzazione dei getti in ghisa

Scorie che vengono utilizzate per la realizzazione di altri materiali.

Dopo il processo in altoforno dove si ottiene la prima ghisa, si passano ad altri processi che permettono di ottenere dei prodotti più elaborati. Quasi la totalità di getti viene ottenuta tramite prodotta tramite ghise di seconda fusione.



5.1 Il materiale



Il carbonio è presente sia come cementite sia come grafite, il che porta ad avere differenze microstrutturali e di proprietà.

Cementite

Grafite

5.1 (34)
Aggiungere

Come si possono classificare le ghise?

1. In base allo stato in cui è presente il carbonio
 - Ghise bianche: solo Fe_3C
 - Ghise grafitiche: presenza anche di carbonio grafitico
2. Se grafitiche in base alla forma della grafite: lamellare, nodulare, sferoidale, vermiculare.
3. In base alle proprietà: es. EN GJS 500-7 dove viene indicato il tipo di ghisa, il carico di rottura ed eventualmente l'allungamento percentuale a rottura.

Ghisa bianca Il carbonio si presenta in forma Fe_3C ; durante la solidificazione e il raffreddamento segue il diagramma di stato metastabile Fe-C.

Ghisa grigia lamellare Sarà presente del carbonio libero sotto forma di lamelle (grafite lamellare): la maggior parte del carbonio (tutto in senso ingegneristico) precipita durante la solidificazione sotto forma di lamelle di grafite.

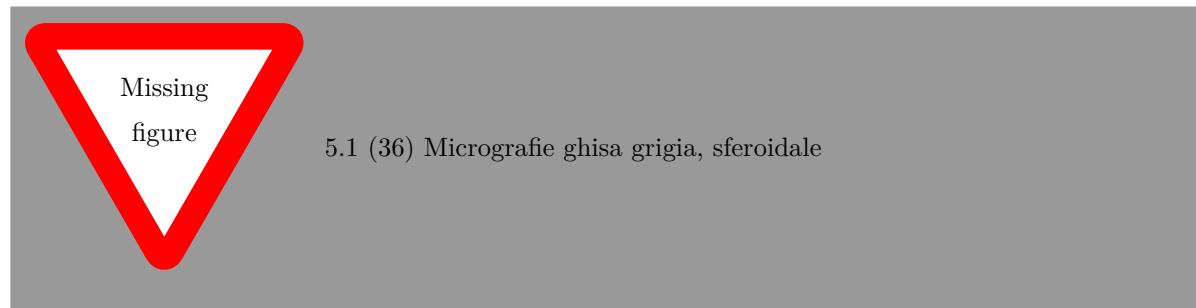
Ghisa grigia sferoidale Il carbonio è largamente non combinato, si presenta sotto forma di sferoidi regolari di grafiti. Gli sferoidi si ottengono per opportuno trattamento del fuso grazie ad aggiunte di elementi come Ce

Ghise malleabili sono quasi in disuso, sostituite dalle sferoidali. Il carbonio si presenta quasi tutto sotto forma di particelle di geometria tondeggiante ed irregolare. Questa morfologia è ottenuta mediante TT delle ghise bianche con lo scopo di conferire duttilità.

Ghise conchigliate o temprate sono delle ghise grigie, per il fatto che non vengono colate in stampo in terra ma in uno stampo metallico, la velocità di raffreddamento è molto più elevata per via del più alto scambio termico con lo stampo. Si favorisce il raffreddamento secondo il grafico metastabile. La pelle del colato sarà prevalentemente a fase cementite. Il cuore del materiale si hanno gradienti di raffreddamento più tranquilli, infatti si ottiene della comune ghisa grigia.

Ghise legate Si utilizzano dei leganti per modificare la struttura durante il raffreddamento. Si va a stabilizzare una determinata fase a temperatura ambiente.

5.1 (35)
Completere

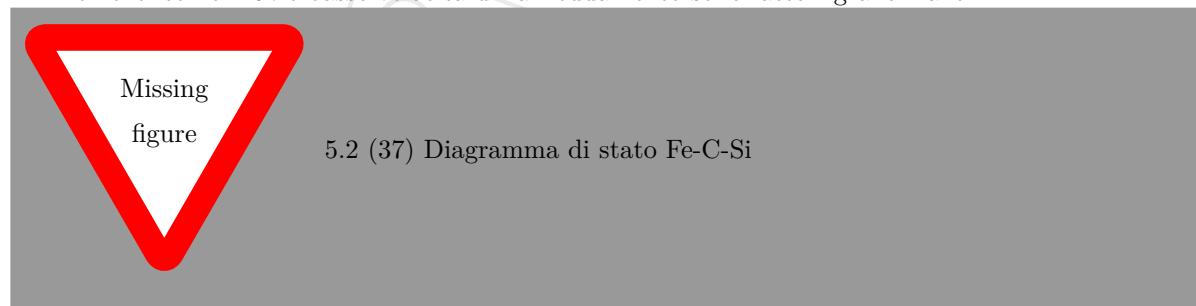


5.2 Fattori di influenza

I fattori che influenzano il modo di presentarsi del carbonio nelle ghise:

- Composizione chimica;
- Eventuale trattamento della ghisa fusa, detto inoculazione;
- Velocità di raffreddamento;
- Eventuale TT.

Elementi come il Si e basse velocità di raffreddamento sono fattori grafitizzanti.



Aggiungere, per esempio il 2% di Si permette di traslare tutto il grafico Fe-C verso sinistra. Di conseguenza sposta la percentuale di carbonio che da la composizione eutettoidica e alza l'eutettoido. Questo permette anche di aumentare il divario tra struttura eutettica stabile e metastabile. Per cui durante il raffreddamento il materiale ha la tendenza a formare più grafite. A questo proposito si è sviluppato un parametro di carbonio equivalente che tiene in considerazione di questo effetto del silicio che viene usato per considerare una ghisa ipoeutettica, ipereutettica ecc...

Ne corso di un generico raffreddamento si potrebbe raggiungere l'eutettico metastabile solo con un sottoraffreddamento molto più rapido di quello stabile. Quindi si ha un effetto grafitizzante. Al contrario il Cr ha un effetto **antografitizzante**.

Se si mantiene costante uguale a 1 il rapporto tra silicio e cromo si ha un intervallo di eutettico stabile e metastabile costante decrescente. Il fosforo è vero che è un elemento grafitizzante ma permette di abbassare di molto la temperatura di solidificazione: aumentando la colabilità della lega.

5.2.1 Il carbonio equivalente

Senza silicio la composizione dell'eutettico è pari al 4.3% di C. All'aumentare del tenore di silicio diminuisce il tenore di carbonio dell'eutettico

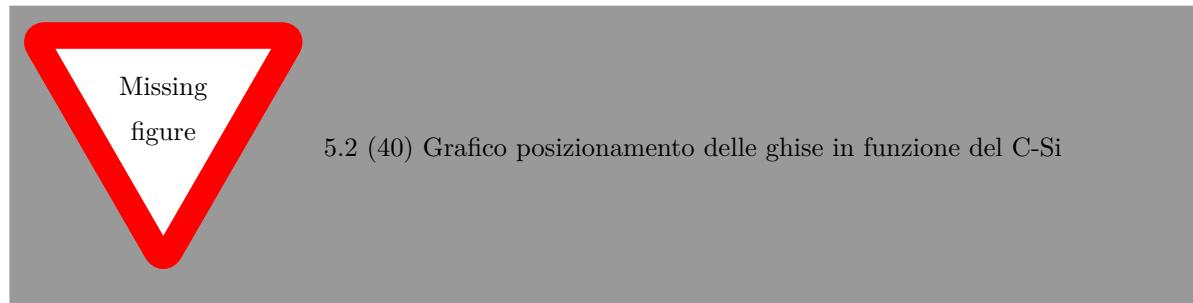
$$CE = \%C + \frac{\%Si}{3} \quad (5.1)$$

5.2 (38)
Aggiungere punti importanti del grafico Fe-C-Si

5.2 (39)
Aggiungere gli elementi grafitizzanti e antografitizzanti

Per esempio per ogni 1% di Si, la composizione eutettica viene ridotta di 0.3% di C come si può vedere dalla (5.1). Quindi quando $CE = 4.3\%$ allora la lega è eutettica. Ghise con uguale CE possono essere ottenute con diversi rapporti di C e Si. Ne caso di composizione ad alto tenore di fosforo, essendo anche lui un elemento grafitico, si aggiunge nella considerazione del CE come nell'equazione (5.2).

$$CE = \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{3} \quad (5.2)$$



5.2.2 Solidificazione e raffreddamento

Considerando una ghisa ipoeutettoidica, $CE \lesssim 4.0\%$ valutiamo il raffreddamento presentato al grafico

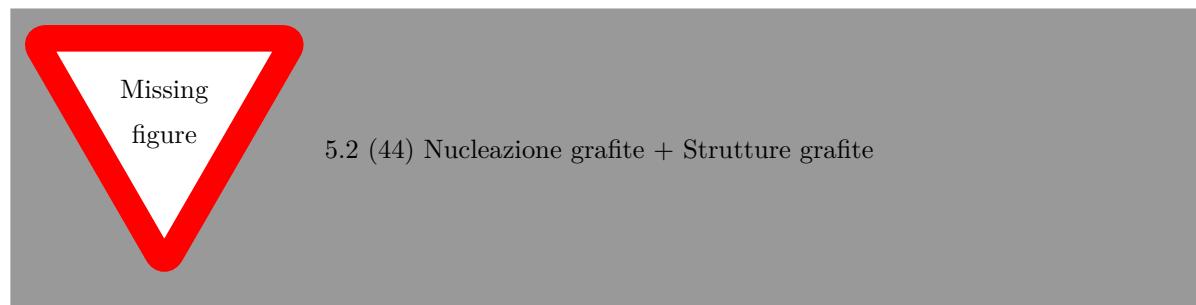


5.2 (42) aggiungi slide considerazioni sul raffreddamento

5.2.3 Inoculazione

Ha il compito di controllare il numero di celle eutetiche e le modalità di solidificazione (stabile-metastabile) privilegiando la fase grafitica. Gli inoculati vengono utilizzati in presenza di elevati sottraffreddamenti tali da provocare la formazione di cementite o alterare la distribuzione della grafite. Gli inoculanti sono delle ferroleghe $Fe - Si + Ca + Ba + Al + Sr + Zr$ Questi formano dei composti che servono da nuclei eterogenei per la formazione della grafite. Vengono versati in siviera di colata, in percentuali dello $0.3 \div 1\%$ (in più si ritarda l'inoculazione prima della colata, maggiore è l'effetto). Bisogna considerare un tempo di "evanescenza" altrimenti le ferroleghe si disolvono nella composizione del liquido di tutta la ghisa vanificando il tentativo di inoculare.

5.2 (43)
Porre
come de-
finizione
o esempio
per evi-
denziare.



la grafite risulta molto suscettibile allo sfaldamento per via delle modalità di interconnessione sei vari strati di grafene: i vari strati sono legati tramite forze di Van Der Waals. Per cui i legami sono deboli ed è molto facile romperli.

Volendo osservare il cambio di fase specifico per ogni struttura che la ghisa a raggiungere, partiamo dall'austenite.

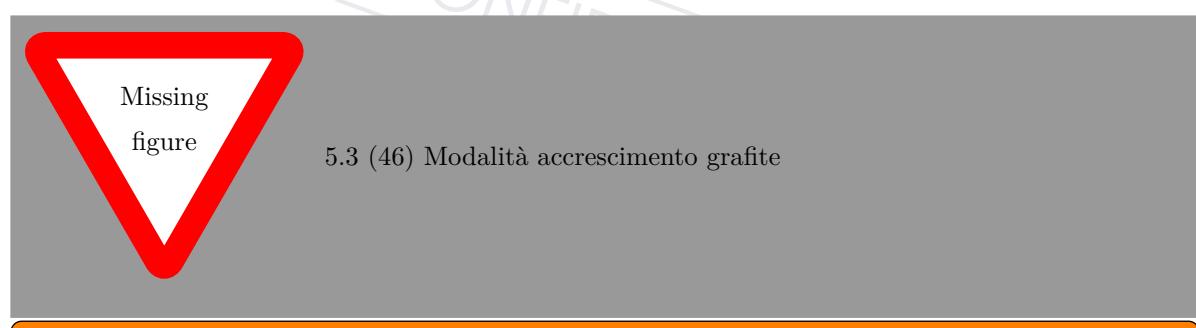
5.3 Solidificazione e raffreddamento

Si ha una prima formazione di dendriti di austenite primaria per via del sottoraffreddamento rispetto a T_L .

Ci sono molte teorie sulla nucleazione e sull'accrescimento dell'eutettico $\gamma - C$. Una delle teorie più accreditate si basa sul concetto delle *celle eutettiche*:

- Nuclei di grafite si formano nel liquido e nel liquido impoverito

5.3 (45)
Completa



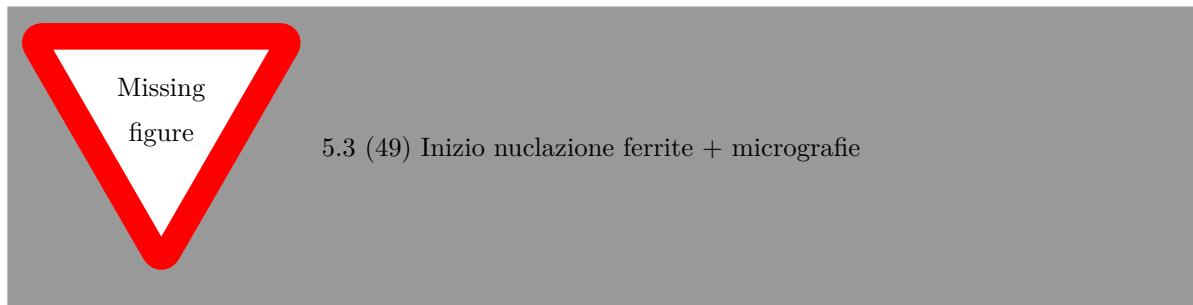
5.3 (47) Recuperare il materiale

Siccome il carbonio dovrebbe attraversare una fase γ per passare dal liquido al nucleo di grafite.

La grafite vermicolare si ottiene tramite tentativo di inoculazione sferoidale riuscito male o non completamente. Per cui il risultato è un vermicello invece della sfera attesa. Non è sempre una cosa negativa: alcune ghise vermicolari vengono tutt'ora usate per componentistica di pompe oleodinamiche a pressione. Viene anche chiamata ghisa compatta.

Dopo il completamento della solidificazione dell'eutettico, ci si ritrova con un materiale contenente austenite e grafite. Raffreddando ulteriormente tra la temperatura eutettica e eutettoidica si ha espulsione del carbonio dall'austenite che andrà accumulato nelle vicinanze della grafite già solidificata. Si forma allora della ferrite nelle prossimità dei nuclei grafitici nel caso in cui la lega sia fortemente grafitizzante. Se invece la ghisa è in condizioni antigrafitizanti tende a nucleare cementite.

5.3 (48)
Fino a
qua



Gli elementi in lega hanno una notevole influenza anche nel promuovere le diverse strutture al raffreddamento dopo solidificazione:

Promotori ferrite Si, Al,

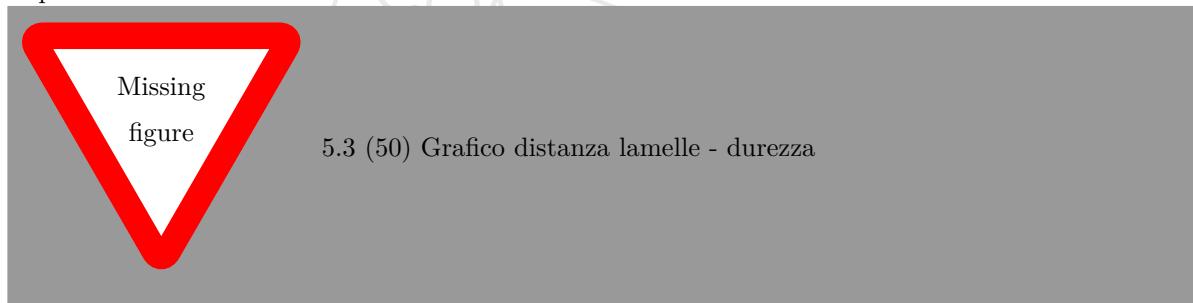
Promotori perlite Sn, Mn, Cr, Ni, Sb, Cu,

Affinatori perlite Ni, Mo, V,

Effetti sinergici tra i vari elementi in lega

Gli elementi in lega non vanno aggiunti singolarmente ma vanno soppesati tra loro per ottenere, giostrandosi tra la forcetta degli elementi in lega permessi dalla normativa, specifiche caratteristiche meccaniche richieste dal cliente.

Tale spaziatura è influenzata dalle condizioni di raffreddamento del getto. La distanza λ tra le lamelle di perlite ha effetto sulla durezza.



5.4 Classificazione delle ghise

5.4.1 Classificazione della grafite

La grafite viene classificata di:

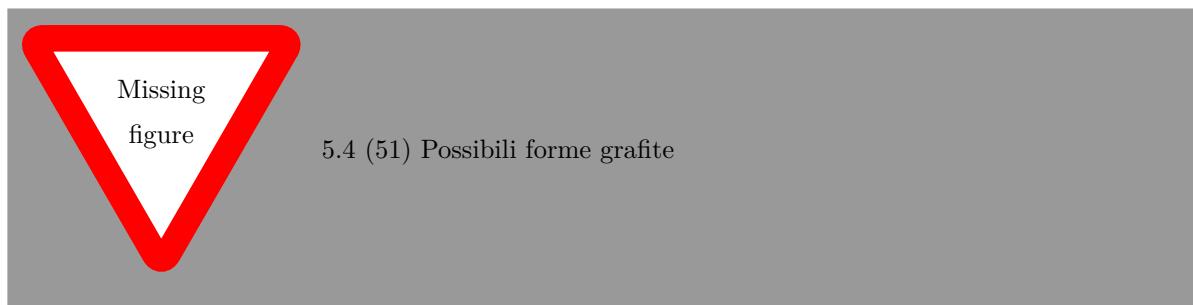
Forma lamelle, sferoidi, compatta;

Distribuzione uniforme, interdendritica, a rosette, ...

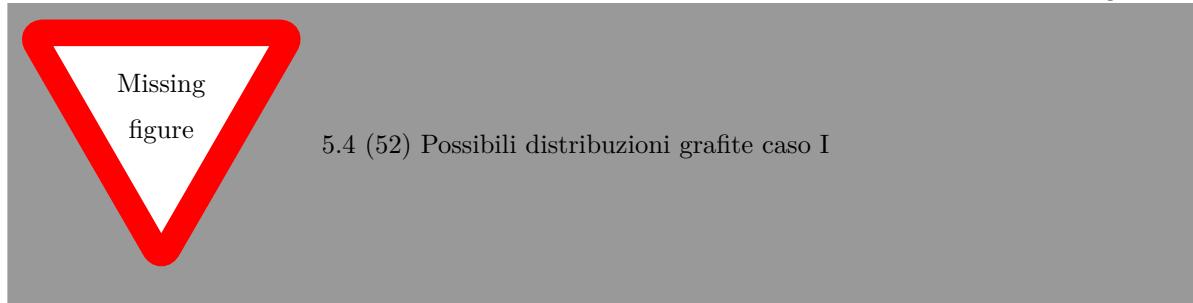
Dimensioni da 1mm a 0.015mm

La classificazione viene normata da ASTM A247 (1967), UNI 3775 (1973), UNI EN ISO 945-1:2018. La classificazione può essere fatta sia ad occhio con piccoli ingrandimenti, sia attraverso degli opportuni misuratori digitali che restituiscono i vari parametri secondo normativa.

La classificazione è in numeri romani che identificano le varie casistiche. Vanno da I a VI in base alla forma.



Per la distribuzione, nel solo caso I, si utilizzano delle lettere da A a E come mostrato in figura.



Per quanto riguarda dimensione si usa una cifra da 1 ÷ 8. Si valutano le dimensioni della lamella o dello sferoidi. Per gli sferoidi si misurano i diametri per quanto possibile, mentre per le lamelle si misura una specie di corda.

5.4.2 Classificazione della matrice

Le possibili matrici possono essere:

Martensitica

Austenite

5.4.3 Classificazione complessiva

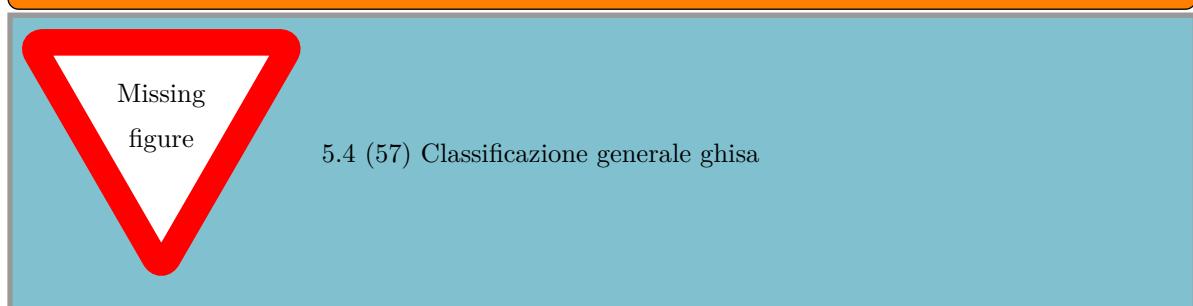
la normativa di riferimento è la UNI EN 1560:2011

5.4 (56) Da porre come definizione come fatto in precedenza

5.4 (53)
Aggiungi
eventuali
esempi di
codifica
della gra-
fite

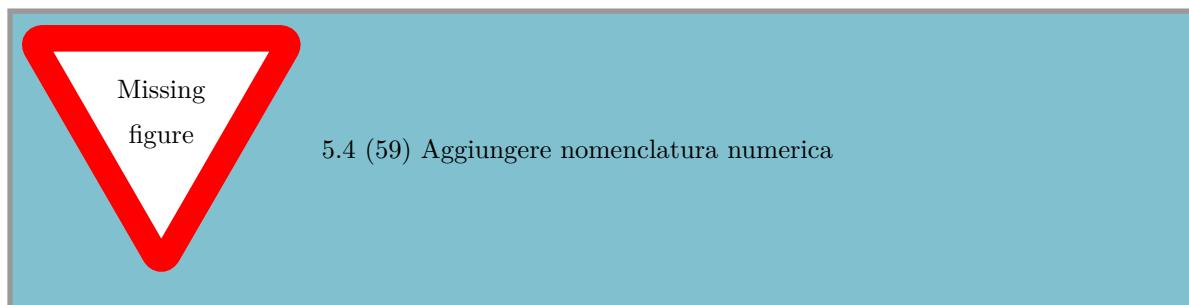
5.4 (54)
come si
ottiene

5.4 (55)
come si
ottiene



Qui di seguito portati alcuni degli esempi Esiste anche una designazione numerica in forma 5.XXXX

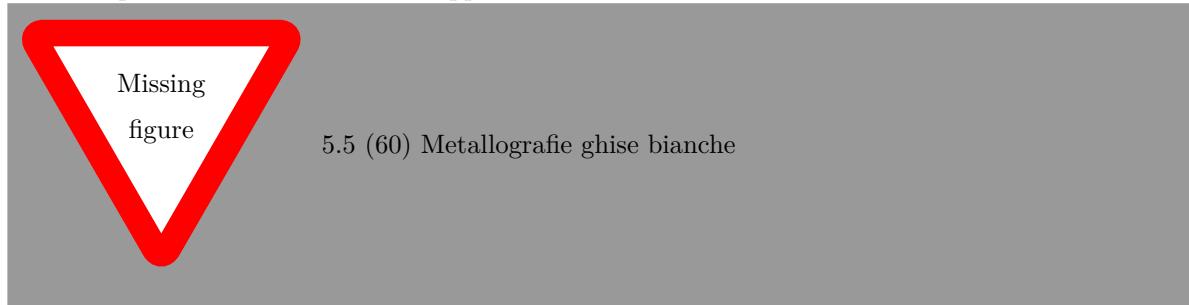
5.4 (58)
Aggiungi
gli esem-
pi



5.4 (59) Aggiungere nomenclatura numerica

5.5 Ghise bianche

Hanno impiego non particolarmente interessante dal punto di vista ingegneristico per via del fatto che tutto il carbonio è recluso nella cementite, per cui queste ghise vengono usate soprattutto per applicazioni lavoranti in compressione. Eventualmente vengono prodotte per ottenere le ghise malleabili. Anche se pure le ultime sono ormai soppiantate.

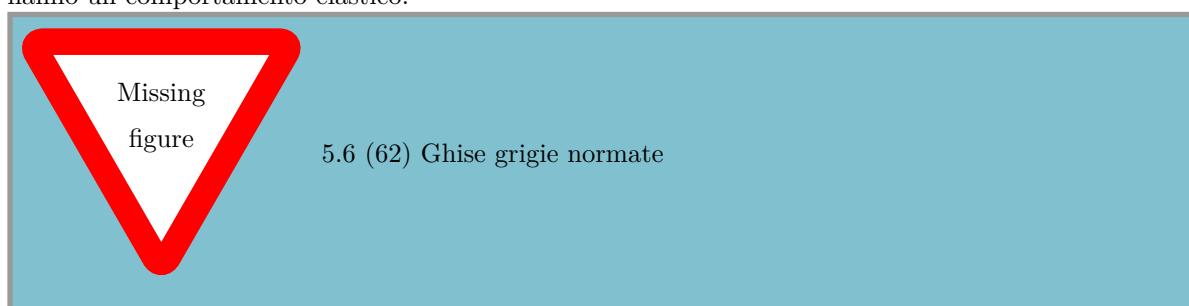


5.5 (60) Metallografie ghise bianche

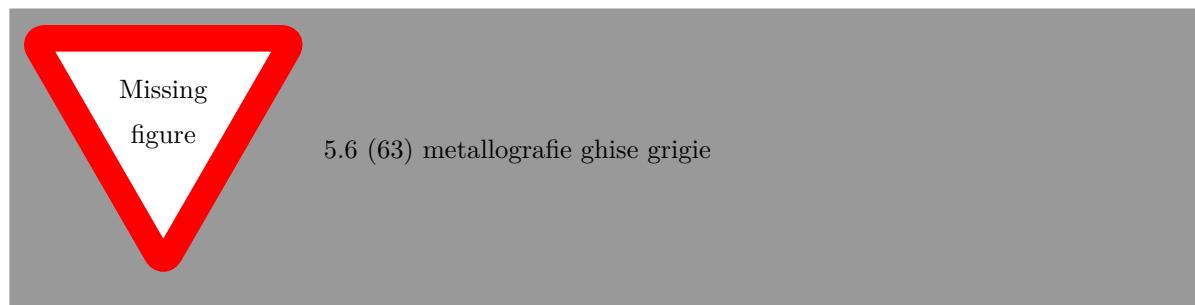
5.6 Ghise grigie

Sono tra i materiali ferrosi più utilizzati, soprattutto tra le ghise. Il loro nome è dato dalla colorazione grigiastra assunta dalla loro superficie di frattura. La loro struttura

Sono identificate tramite EN + GJL + 100 dove le cifre rappresentano il valore di tensione a rottura del materiale. Non viene specificato l'eventuale allungamento elastico per via del fatto che raramente hanno un comportamento elastico.

5.6 (61)
completa

5.6 (62) Ghise grigie normate



Nella vecchia normativa si sfruttava una notazione più tecnica tipo G25 o G00¹. La sterlite è una struttura eutettoidica ternaria particolarmente carica di fosforo. ha una struttura simile alla ledeburite per via delle macchie a leopardo presenti nella struttura.

Proprietà meccaniche. Risulta pure difficile definire un modulo elastico per via delle bassissime deformazioni. Tant'è che il modulo elastico viene calcolato matematicamente e non attraverso snervamento.

5.6 (64) Aggiungere trattamenti termici

5.7 Ghise Sferoidali

5.7 (65) Aggiungere le sferoidali

Cerio non è un vero e proprio neutralizzante per neutralizzare elementi di lega che tenderebbero a formare grafite in forma lamellare invece di sferoidale. Durante la solidificazione la grafite precipita sotto forma di sferoidi o noduli più o meno regolari. Date le caratteristiche può sostituire acciai da costruzione con tutti i vantaggi portati dalle ghise.

5.7.1 Produzione della ghisa

Per la produzione delle ghise si effettua un processo simile alla deossidazione vista per la calmatura degli acciai, in questo caso si parla di desolforazione perché è un elemento favorente la grafite lamellare piuttosto della sferoidale.

5.7.2 La sferoidizzazione

Come si fa in fonderia:

- In siviera: siviera aperta, siviera coperta, wire feeder² In siviera aperta bisogna prevedere che si perde tanto magnesio per via della sua alta reattività con l'ossigeno.
- flow through
- In-mold Si predispongono delle camere dove mettere le leghe Fe – Si e gli altri agenti dove il colato potrà fonderli per poi andare a riempire tutto lo stampo mescolandosi con essi. Non si presentano gli stessi problemi di evanescenza rispetto ai precedenti.

5.7 (66) Aggiungere
giungere
il necessa-
rio

5.7.3 Designazione ghise sferoidali

5.7 (67) Aggiungere designazione ghise sferoidali secondo normative

Si osserva come il ventaglio di tensioni di rottura sia abbastanza ampio, raggiungendo anche dei valori di rottura piuttosto considerevoli. Non sono da scartare come materiale.

¹Non era garantita alcuna proprietà meccanica

²Risulta la tecnica più usata in industria per via dell'automatismo e semplicità del controllo.

5.7.4 Trattamenti termici

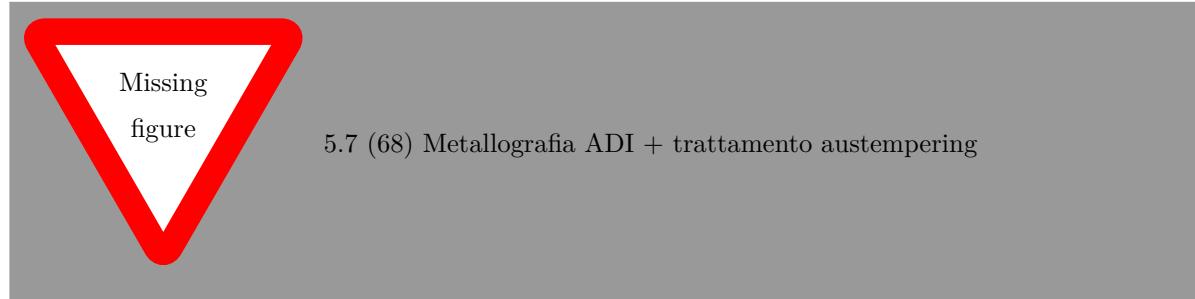
Anche in queste ghise sono possibili alcuni trattamenti termici.

Ricottura completa

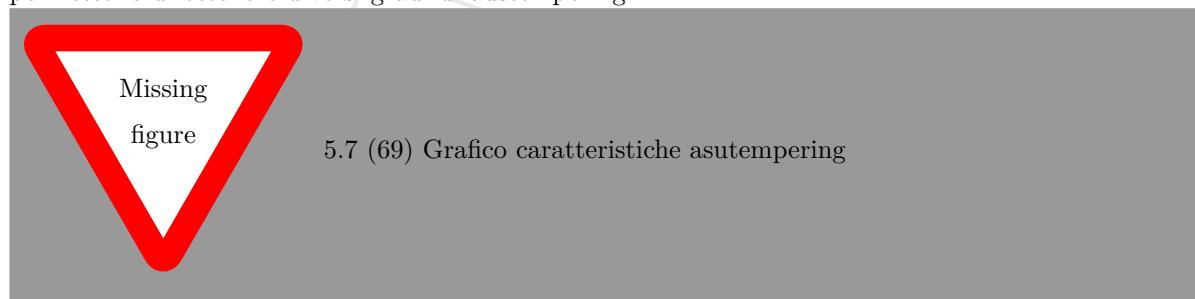
Normalizzazione

Tempra + rinvenimento

Le ghise Austempered Ductile Iron (**ADI**) sono ghise sferoidali innovative sottoposte al trattamento di Austempering interrotto: processo per cui si forma una matrice austenitica con presenza di ferrite aciculare.



La scelta delle temperature di austenitizzazione e permanenza nel controllo della temperatura permettono di ottenere diversi gradi di austempering.



Si nota dai grafici che questa opportunità può essere quasi sostitutiva per un acciaio già di buone caratteristiche.

5.8 Ghise malleabili

Vengono ottenute per trattamento termico dalle ghise bianche. Tra l'altro sfruttano quasi la totalità delle ghise bianche prodotte per realizzare queste.

Sono state le prime ad essere messe a punto per ottenere getti con dotti di duttilità a freddo. A differenza delle ghise sferoidali la duttilità si ottiene per **TT** detto di *malleabilizzazione*.

Ghise malleabili a cuore bianco Sviluppate in Europa nel XVIII secolo

Ghise malleabili a cuore nero Sviluppate in America nel XIX secolo.

La differenza tra le due è la notevole

La base della produzione è la metastabilità della cementite che ad alte temperature:



Questa reazione può condurre alla conversione totale della cementite della ghisa bianca in noduli di grafite: sferoidi non a superficie regolare. Questa decomposizione del carburo di ferro a grafite e austenite è favorita da:

5.8 (70)
Aggiungi

- composizione chimica del getto
- temperatura di trattamento
- velocità di riscaldamento

Si nota la presenza di Si. Il concetto è che i tenori sono limitati rispetto al caso delle ghise grigie.

5.8.1 Trattamento di malleabilizzazione

Si parte da una ghisa bianca a matrice perlitica con restate struttura di cementite ed eventualmente ledeburite. Si scalda fino a $\approx 900^{\circ}\text{C}$. Durante il mantenimento della lega a quella temperatura si ha la decomposizione della cementite in austenite e noduli di grafite. Da qui si segue un raffreddamento rapido a circa 750°C . Segue un raffreddamento lento attraverso il punto critico A_1 si incentivano le condizione grafitizzanti. Ne risulta che si ingrossano i noduli di grafite. Si ottiene alla fine una matrice ferritica coi noduli di grafite ingrossati e non regolari.

E se volessi una matrice diversa? tipo perlitica?

Si può fare, basta seguire uno di questi tre metodi:

1. Aggiungere elementi come Mn, Mo, Cr che stabilizzano i carburi.
2. Eseguendo un raffreddamento veloce attraverso la linea eutettoidica
3. Tramite TT addizionale che prevede riscaldamento sopra la linea eutettoidica e successivo raffreddamento più rapido.

5.8 (71)
per aggiungere dettagli vedi slides

5.8.2 Designazione ghise malleabili

5.8 (72) Aggiungere la designazione secondo normativa

Missing
figure

5.8 (73) Aggiungere tabelle caratteristiche meccaniche ghise malleabili

5.9 Ghise legate

Si aggiungono degli elementi in lega per esaltare certe proprietà fisiche meccaniche. Gli obiettivi sono:

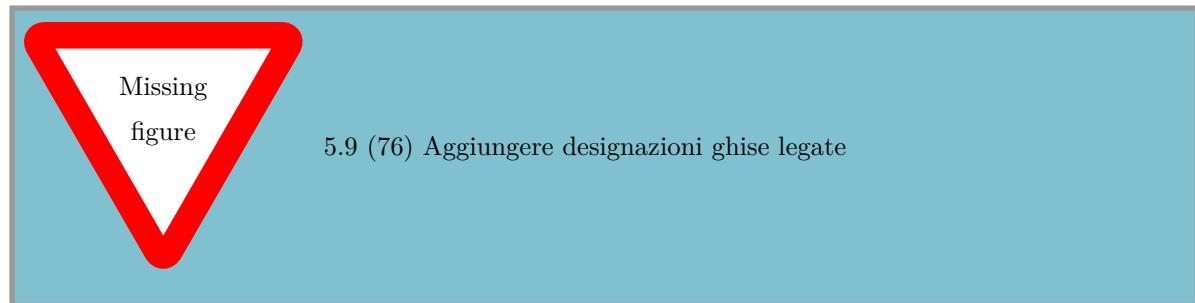
- resistenza alla corrosione in ambienti diversi,
- _____

Tra le ghise legate si hanno le ghise che hanno matrici particolarmente austenitica. Non è necessario che lo siano completamente si possono aver anche matrici austenitico-martensitico.

5.9 (75) aggiungere le caratteristiche migliorative

5.9 (74)
Completa

5.9.1 Designazione ghise legate



CONFIDENTIAL

Parte VI

Leghe non ferrose

CONFIDENTIAL

CAPITOLO 6

Allumino e leghe per impieghi industriali

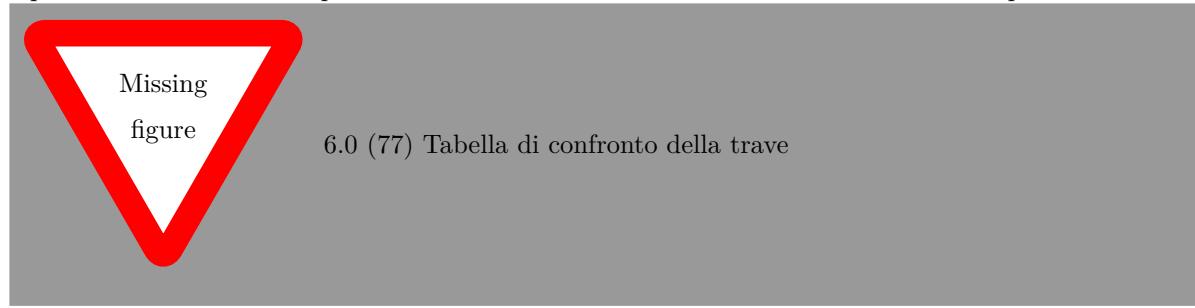
Si parla di leghe leggere per via del fatto che a sostituzione del ferro si hanno Allumino, Magnesio, Titanio.

Si tratta dell'unico, tra i materiali non ferrosi, a insidiare il ruolo di leadership dell'acciaio tra i materiali per impieghi industriali.

In teoria l'alluminio è più presente sulla crosta terrestre del ferro, ma la sua scoperta ed impiego si ha solamente nel 1800. Solo nel 1836 si è messo a punto il processo produttivo, tutt'oggi utilizzato, Hall-Heroult per realizzare il processo per ottenere l'alluminio dall'ossido. Ciò è dovuto al fatto che le temperature per ottenere l'alluminio sono decisamente molto alte. Per cui si è preferito una specie di elettrolisi per ottenere il materiale. La sua diffusione ha uno sviluppo per via delle sue caratteristiche fisiche e meccaniche ma anche per le proprietà estetiche.

Il suo impiego è per il 40% nel mondo della mobilità. Poi trova impieghi nel mondo costruttivo ed edilizio. Nel packaging, stampi, e normali materiali di consumo.

L'alluminio non può cambiare struttura allotropica. Per cui non è suscettibile a cambi di fase tramite trattamenti termici a differenza del ferro. Dunque si hanno delle potenzialità limitate da questo punto di vista. Ha una temperatura di fusione particolarmente basso per cui qualsiasi processo di fonderia può essere utilizzato con l'alluminio. In particolare per quelle tipologie di alluminio da fonderia. Ovviamente ciò implica che non si possono utilizzare a temperature particolarmente alte. Le leghe di alluminio lavorano bene fino al massimo 200°C. La densità risulta quasi un terzo di quella del ferro: a parità di volume si ha un terzo del peso. La condutività termica è decisamente molto elevata. Assieme alla condutività elettrica, minore di quella del rame, ma pesando molto meno per via della minore densità, viene impiegato per la trasmissione di potenza elettrica sulle principali linee elettriche. Parlando del modulo elastico, si passa da un modulo elastico del ferro di 210MPa ai soli 70MPa dell'alluminio. Si può migliorare tale situazione attraverso opportuni trattamenti della lega. Anche il carico di rottura è particolarmente basso rispetto al ferro. Il tutto viene bilanciato dalla densità molto più bassa.



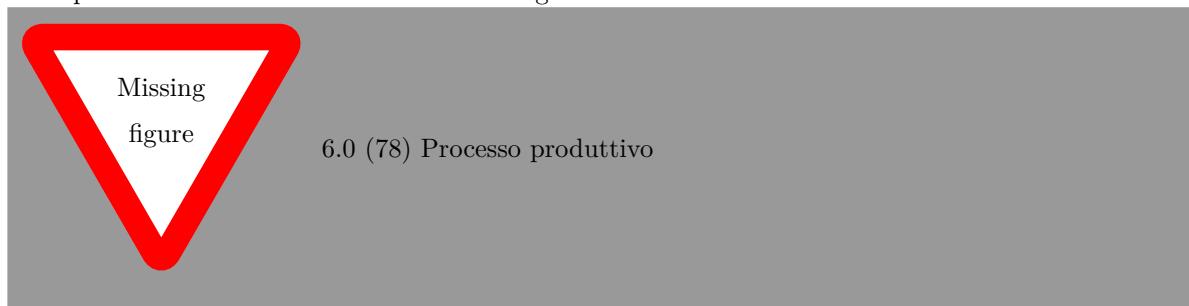
Per quanto il modulo elastico rappresenta un problema non indifferente. Si può ovviare il problema grazie alla flessibilità tecnologica dell'alluminio.

Ha un'eccellente duttilità per via dei cristalli realizzati a struttura cubica a facce centrata. Ha una buona lavorabilità, anche se dipende da eventuali TT successivi. Ha una buona resistenza alla corrosione atmosferica. Ciò dovuto al sottile strato di ossido che fa da protettivo. Eventualmente ci sono trattamenti

superficiali per aumentare ulteriormente la resistenza. Risulta saldabile grazie alle tecniche moderne di saldatura.

La produzione L'alluminio primario, ovvero il materiale ottenuto dal minerale, ha necessitato della messa a punto della tecnica di estrazione. Dalla Bauxite si ottiene l'allumina, tramite processo Bayer (Al_2O_3) da cui si ottiene l'alluminio per via chimica col processo Hall-Heroult. In fine si può legare l'alluminio per ottenere le leghe primarie. Alternativamente, si possono realizzare delle leghe secondarie da riciclo accurato di lege a fine ciclo vita. Per dovere di cronaca si stima che il processo di riutilizzo delle leghe secondarie si usa solamente il 10% dell'energia utilizzata per generare leghe di alluminio primarie. Tutto dovuto al processo di ottenimento dell'alluminio che è particolarmente energivoro. Oltre tutto il rapporto di ottenimento del materiale sta da 4kg di Bauxite si ottengono 2kg di allumina da cui si ottengono 1kg di alluminio.

Il processo di Hall-Heroult è illustrato alla figura



Il processo di elettrolisi provoca la generazione di gas di scarico (CO_2 e CO) e precipitati di alluminio fuso. Il tutto eseguito ad una temperatura di 950°C

Il problema del riutilizzo delle leghe secondarie è dovuto alle impurezze che vengono fuse assieme. Grazie alle ricerche è possibile che le leghe secondarie ottengono quasi gli stessi traguardi dell'alluminio primario. In più il fabbisogno di alluminio è molto più alto di quello che si può ottenere col solo recupero dell'alluminio secondario.

6.1 Caratteristiche meccaniche

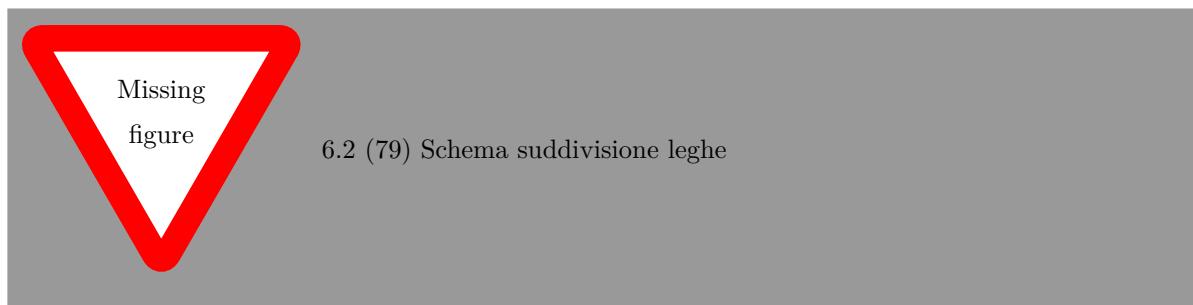
L'alluminio puro presenta una scarsa resistenza meccanica e una bassa durezza. Se necessito di particolari caratteristiche devo per forza legarlo per elevare alcune caratteristiche. Risulta decisamente vantaggiosa nel caso si parli di resistenza meccanica specifica detta:

$$\frac{\text{Stress}}{\text{Density}} \quad (6.1)$$

Se si vogliono aumentare le caratteristiche meccaniche bisogna legare l'alluminio. Si parte dalle leghe madri da cui poi si ottengono altre caratteristiche per ulteriori trattamenti. Aggiungendo alle leghe madri gli elementi correttivi, che agiscono su particolari aspetti caratteristici.

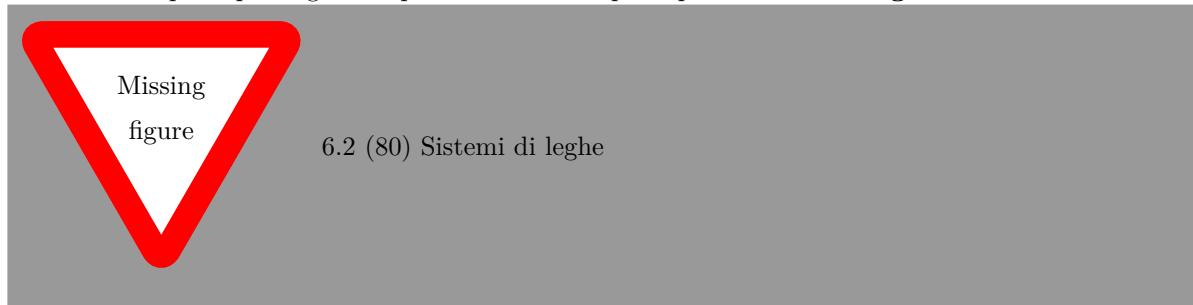
6.2 Classificazione delle leghe di alluminio

Si differenziano principalmente tra leghe da fonderia e leghe da deformazione plastica. La differenza non è solamente in termini di normativa ma soprattutto per la quantità di elementi in lega.



Dalle leghe da fonderia si può suddividere in **as casted** o da **TT**. Per le leghe da deformazione plastica si può incontrare la casistica dell'incrudimento per deformazione plastica, oppure la strada del **TT**. Resta il problema che l'incrudimento a freddo può portare anisotropia nel materiale. Tutti i processi di deformazione possono essere eseguiti a freddo, principalmente, ma anche a caldo.

In base ai principali leganti si possono definire i principali **sistemi di leghe**

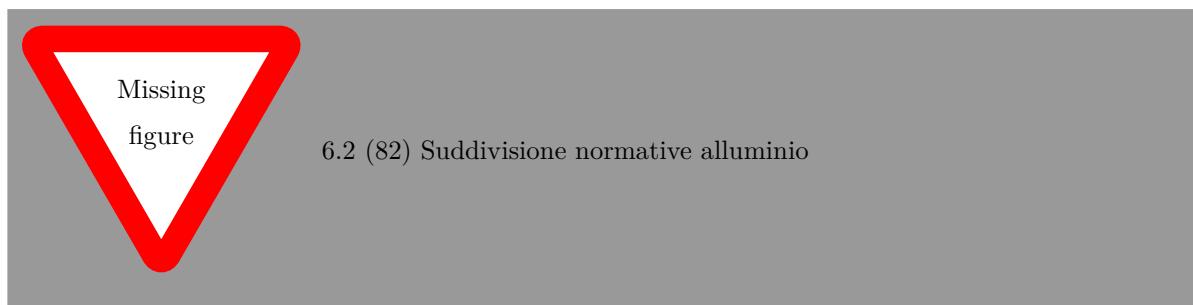


Alcuni sistemi di leghe sono più adatti per **TT** e incrudimento a freddo ; altri non sono così suscettibili a miglioramenti dovuti a **TT**. Si nota che il Mg è un elemento molto importante per le leghe di alluminio. Tra l'altro vale anche il viceversa, si vedrà al capitolo dedicato. Il magnesio vede un utilizzo al 30% di leghe di magnesio, un'ulteriore 30% per le leghe di alluminio e la restante per la realizzazione di ghise sferoidali, viste al capitolo 5 a pagina 50.

6.2 (81)
Riferimento

6.2.1 Normative di riferimento

Le principali normative suddividono le leghe di alluminio per le leghe adatte per le leghe da deformazione plastica (**UNI EN 573**) e per le leghe adatte alla fonderia (**UNI EN 1780**, **UNI EN 1706**).



Anche per le leghe di alluminio adatte alla deformazione plastica esiste una designazione numerica e una a simboli chimici.



Le normative AA prevedono solamente designazione numerica. Mentre le normative UNI prevedono entrambe le classificazioni. In riferimento ad entrambe, c'è una corrispondenza 1:1 per entrambe perché UNI ha assorbito le designazioni di AA.

Per le leghe da fonderia cambia tutto.

6.2.1.1 Normative europee

6.2.1 Definizione (Normative alluminio europee): Verranno indicate le varie normative:

	Def. Plastica	Fonderia
Designazione numerica	<i>UNI EN 573 - 1 sistema di designazione numerica</i>	<i>UNI EN 1780 - 1 sistema di designazione numerica</i>
	<i>EN AW-XXXX</i>	<i>EN AY-XXXXX</i>
	A alluminio	A alluminio
	W wrought	Y può essere B se è pane di alluminio, C se è getto di alluminio (ottenuto tramite fusione di leghe AB), M se è lega madre da cui partire per ottenere le altre famiglie di leghe.
	XXXX Indice della specifica famiglia	
	Lettere Agg. Variazioni nazionali sulla lega	XXXXX Indice della specifica famiglia di leghe.

Parte 2:

	Def. Plastica	Fonderia
Designazione chimica	<i>UNI EN 573 - 2 sistema di designazione su composizione chimica</i>	<i>UNI EN 1780 - 2 sistema di designazione su composizione chimica</i>
	viene consigliato l'utilizzo facoltativo di questa modalità di designazione	Come per il caso delle deformazioni plastiche.

Parte 3:

	Def. Plastica	Fonderia
Designazione chimica e utilizzo	<i>UNI EN 573 - 3 composizione chimica e prodotti</i>	<i>UNI EN 1706 composizione chimica e caratteristiche meccaniche dei getti</i>

6.2 (84) Aggiungere la classificazione delle famiglie della UNI EN 573-1



6.2 (85) Designazione UNI EN 573-1



6.2 (86) Designazione UNI EN 573-2



6.2 (87) Designazione UNI EN 573-3

6.2 (88) Esempi di designazione

In confronto con la normativa americana c'è un rapporto 1:1, per cui c'è una corrispondenza esatta tra i due metodi di designazione. Basta anteporre la signa AA.



6.2 (89) Designazione UNI EN 1780-1



Si nota che nella famiglia delle leghe da fonderia a base di silicio è molto variegata. Questo perché il silicio è un elemento fortemente colabilizzante: migliora la colabilità del fuso.

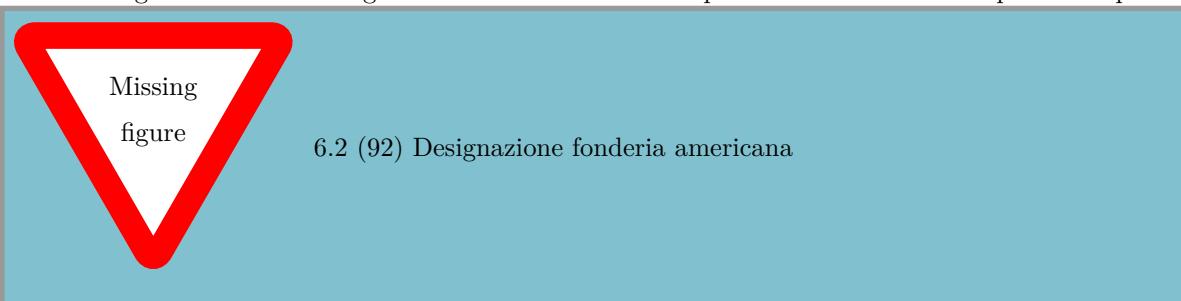


La norma specifica i limiti di composizione chimica delle leghe di alluminio per getti e le proprietà meccaniche delle provette colate a parte. Si trova:

- Definizione dei principali processi di fonderia
- Abbreviazioni utilizzate per designare i principali processi di fonderia
- Designazione degli stati metallurgici delle leghe da fonderia
- Indicazione sulla designazione che deve apparire a disegno.

6.2.1.2 Normative americane

Per le leghe da fonderia vengono utilizzati dei codici completamente differenti da quelle europee.



EN AB-42100 [A1 Si7Mg0.3] → A356.0 La lettera davanti può essere

- A Tenore limite di ferro $\lesssim 0.15\%$
- B Tenore limite di ferro $\lesssim A$
- C Tenore limite di ferro $\lesssim B$

6.2.2 Normative sulla base dei TT

In tabella vengono riportati quale siano le famiglie trattabili termicamente oppure no.



Missing
figure

6.2 (93) Tabella sì o no TT

In genere vale che se una lega non è trattabile termicamente allora è trattabile per incrudimento. Tutte sono trattabili per soluzione solida. In generale tutte le leghe sono trattabili per incrudimento. Certo è che se si vuole ottimizzare le proprietà con un TT andare ad incrudire non è la strada migliore e il costo dei trattamenti rischia di superare i benefici dati dall'acquisto di quella specifica lega.

6.2 (94) Aggiungi gli stati di incrudimento UNI EN 515



Missing
figure

6.2 (95) Confronto leghe alluminio

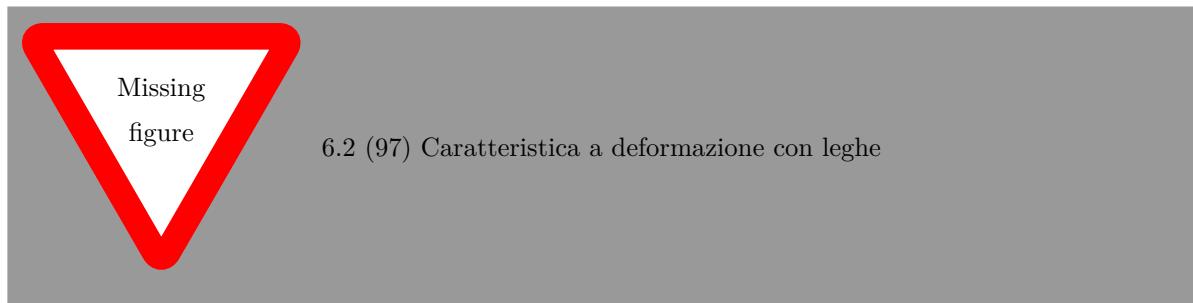
Eseguire deformazioni plastiche a freddo significa anche generare una variazione della morfologia dei grani.



Missing
figure

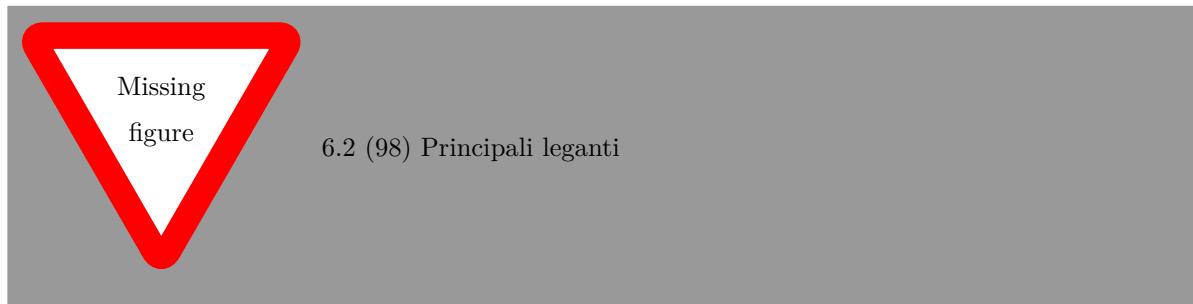
6.2 (96) Anisotropia

Si può pensare di effettuare delle ricotture di ricristallizzazione per permettere di rimuovere gli effetti di anisotropia. La temperatura dipende fortemente dal livello di incrudimento imposto. La percentuale di incrudimento e presenza di elementi in lega è determinante per migliorare la resistenza allo stato ricotto. e di eventualmente esaltare il miglioramento delle proprietà con la deformazione plastica a freddo.



in generale vale che le leghe da deformazione plastica sono maggiormente alligate rispetto a quelle da fonderia.

6.2.3 Principali alliganti



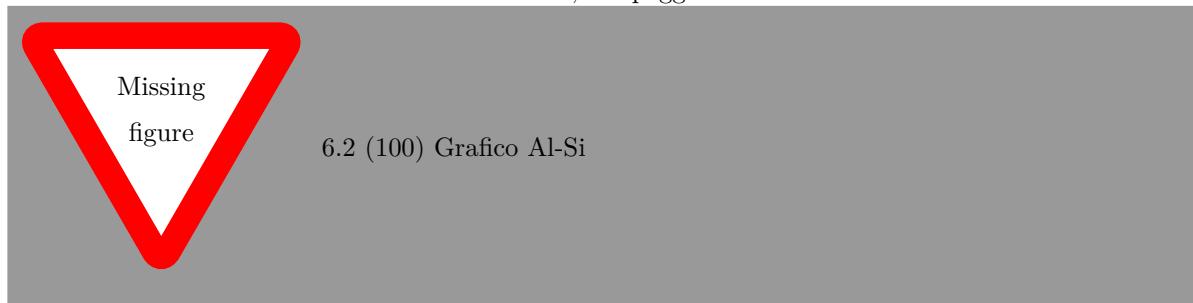
Le leghe 2XXX e 7XXX sono leghe da trattamento termico e sono tra le più utilizzate in ambito aeronautico. Queste sono a base primaria di zinco e rame. Altre leghe a base di

Tutti gli elementi visti in precedenza sono solubili in alluminio. Dopo bisogna vedere se l'elemento in lega sia sufficiente per aumentare le caratteristiche. E soprattutto se quello che effettivamente è in lega sia sufficiente.

6.2 (99)
Aggiungi

6.2.3.1 Sistema Al-Si

Si tratta del sistema più utilizzato soprattutto nelle leghe da fonderia perché aumenta particolarmente la fluidità del materiale. Abbassa di molto il punto di fusione e il coefficiente di dilatazione termica. Migliora la resistenza alla corrosione. Nelle leghe ipereutettiche i cristalli di Si nella struttura incrementano la durezza e la resistenza ad usura, ma peggiora la lavorabilità all'utensile.



Si osserva che per tenori di Si attorno al 12% si ha un massimo di fluidità della lega: infatti le leghe da presso-colata hanno una composizione di quel tipo. In più, il Si riduce di molto la contrazione volumetrica a raffreddamento. Le leghe più utilizzate sono leghe ipoeutettiche ovvero: %Si < 12.2%. In una lega ipoeutettica si forma della fase α a morfologia dendritica una fase Al+Si eutettica. Particolarmente interessante è il parametro geometrico delle dendriti

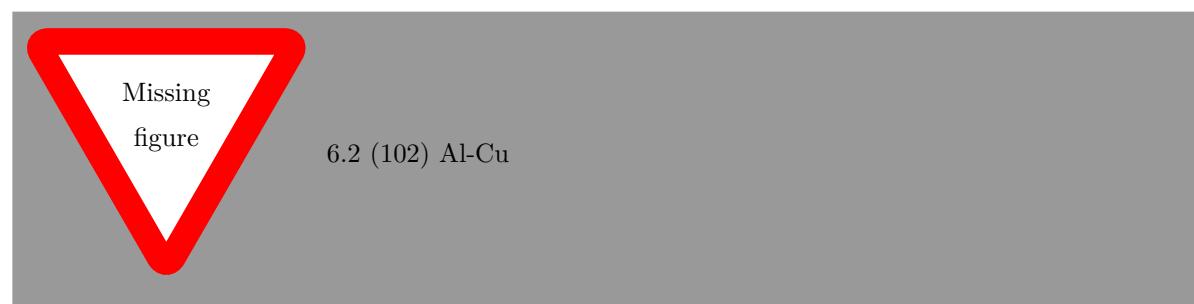
$$SDAS = kt_s^n \quad (6.2)$$

Se SDAS ↘ Le proprietà meccaniche migliorano. Non si evidenziano particolari dipendenze con le distanze tra i bracci primari delle dendriti.



6.2.3.2 Sistema Al-Cu

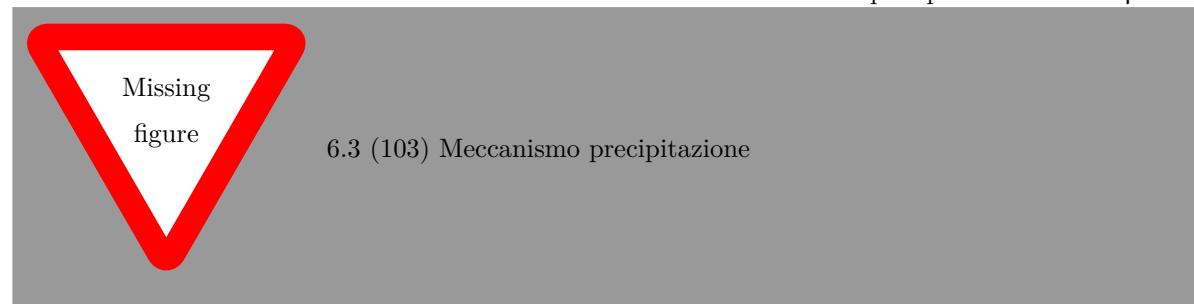
Sono delle leghe molto importanti per via del fatto che da loro sono stati scoperti i TT sull'alluminio.



Soltamente, aoltre al classico alluminio α si forma un composto detto θ definito come CuAl_2 . Possono essere trattate termicamente per via della precipitazione delle seconde fasi. Da cui se ne ottiene un miglioramento del comportamento meccanico. Se ne migliora la lavorabilità. Diminuisce la colabilità, in fatti sono poco utilizzate come leghe da fonderia. Aumenta la sensibilità alla formazione di cricche a caldo. Diminuisce la resistenza alla corrosione.

6.3 Meccanismo di precipitazione

Sotto la curva di massima solubilità del rame si ha la struttura α con precipitazione di fase β



la fase β sarà generalmente grossolana a bordo grano e incoerente con la matrice. Ovvero presenta un reticolo diverso da quello della matrice e non c'è continuità tra i piani atomici della matrice e del precipitato. Una situazione di questo tipo è assolutamente non rinforzante per il materiale. Una prima idea per migliorare la situazione può essere tentare una tempra: si porta tutto in soluzione e si effettua un rapido raffreddamento. Il problema è che istantaneamente le proprietà meccaniche sono scarse. Ci si è resi conto che dopo un processo di invecchiamento naturale si sono aumentate le caratteristiche meccaniche. Industrialmente parlando si sfrutta un TT di solubilizzazione + tempra e successivo invecchiamento

naturale che prende il nome di T4 secondo le normative. Un TT di solubilizzazione + tempra e successivo invecchiamento artificiale che prende il nome di T6 in riferimento alle normative.



Parte VII

Appendici

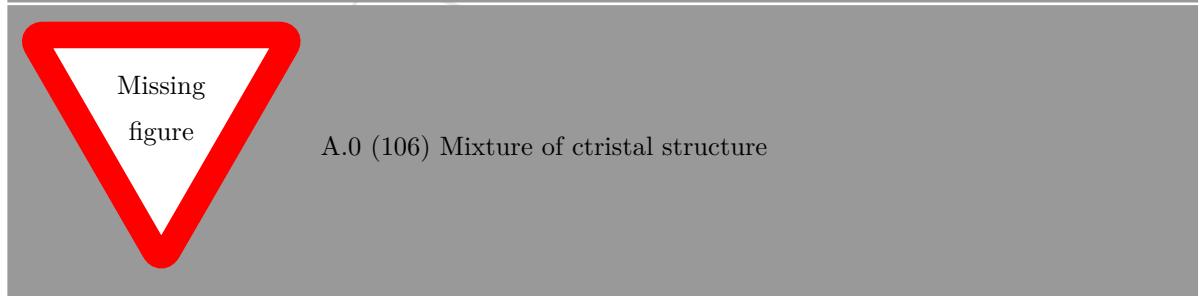
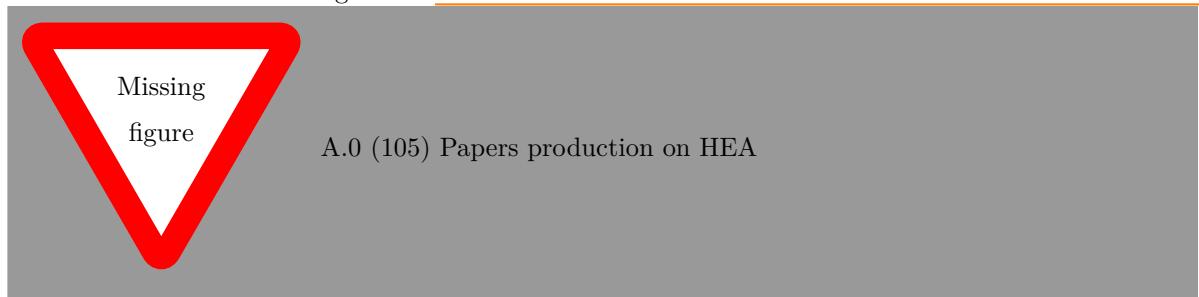
CONFIDENTIAL

APPENDICE A

High Entropy Alloys

Sono delle leghe a matrice con più di 5 elementi precipitanti. Due to the distinct design concept, these presents unusual properties. These alloys have named HEAs because of their liquid or random solid solutions states have significant

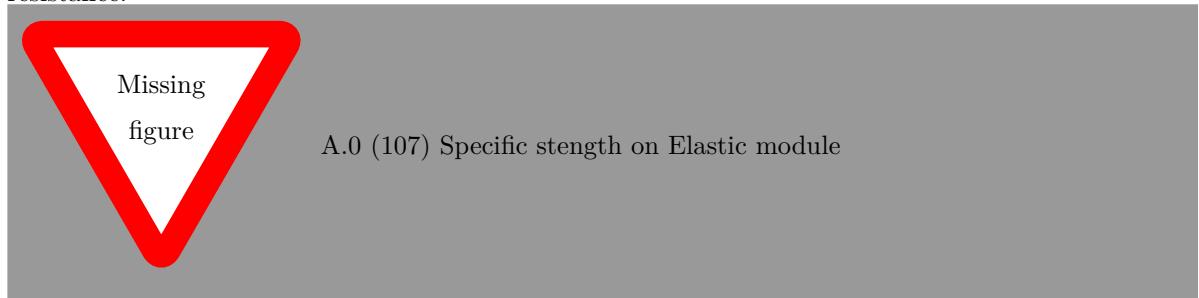
A.0 (104)
ADD



As we can see we want to mix these elements to catch all the characteristics produced by singular elements. This is done by the presence of a high number of alloy in the material.

Why are we looking to produce that type of alloys?

It's because they have an high creep resistance at high temperatures. So new applications can be developed using these alloys. Not all of these alloys are temperature hardening. It depends on the singular alloy. Also higher yield stress resistance can be achieved by these alloys. As before it depends on single material. Some HEA have been tested to corrosion. In addition, some of them have high wear resistance.



Fracture toughness is really high even than standard Steel alloys. So it's been evident how these alloys could find critical applications which are not yet implemented.

the production is a bit complex. It's made by sinterization. It's possible to melt them, in particular induction melting ist one of the most used way to produce HEAs. Thin films are in development as a production process.

Atomization is a key process, not only on HEAs production, but in general for additive manufacturing. So it's fundamental that cooling must be as fast as possible in order to produce thin powder. After that the milling process is succeede. The problem is that in standard milling is done in about $50 \div 100$ rpm but for HEAs its going to be about $100 \div 1000$ rpm. At this moment it's possibile only at laboratory level and not in industrial.



APPENDICE B

Trattamenti termici

Granigliatura ha l'obiettivo di pulire il comportamento.
La pallinatura ha come obiettivo l'incrudimento a freddo del materiale pallinato.

B.1 Filiera prodotto acciaio

Quasi tutti i prodotti vengono da acciaieria in prodotto come barre, in genere. Si ottengono, dal fuso, delle blette e poi su laminazione a freddo, con riduzione dal 4% a 8%. L'acciaieria presenta un set di diametri con diverse composizioni di acciai.

come mai effettuare una ricottura isotermica sul prodotto forgiato? Si possono avere delle eccessive deformazioni in caso si vogliano trattare termicamente.

Dopo la vendita allo stato di ricottura isotermica vengono eseguite le lavorazioni meccaniche del caso. Prima si fanno delle verifiche metallografiche per verificare che il prodotto rispetti i dettagli richiesti.

Poi si eseguono i trattamenti termici. Quindi si garantisce sia un'ottima durezza superficiale (durezza superficiale) mentre a cuore si preferisce avere una certa tenacità.

In automotive si cercano acciai al massimo 1.10% di tenore di carbonio. Per esempio solo nel cambio si hanno 18 componenti che in genere vengono cementati e solitamente pallinati. L'esigenza della ricerca su nuovi TT è dovuto al fatto che non è possibile cambiare progetto di una scatola del cambio in continuazione. Perciò devono aumentare le caratteristiche meccaniche senza le dimensioni.

Segue un processo di pallinatura, dove richiesto. Ha l'obiettivo di aumentare la resistenza a fatica. Nella temprabilità le variabili importanti sono

- Dimensione grano (è fissato da normativa)
- Tenore carbonio
- Tenore di leghe

Si possono avere degli acciai microlegati potrebbero essere una valida sostituzione ad acciai da bonifica a patto che il materiale lavori ad una temperatura superiore o uguale a quella ambiente. Altrimenti è obbligatorio l'utilizzo dei bonificati.

Nella cementazione in atmosfera: si formano degli strati di ossidi che compromettono, leggermente compromettenti la resistenza a fatica del materiale cementato. In caso di bassa pressione si evita la formazione degli ossidi, garantendo una resistenza a fatica di circa il 20%.

APPENDICE C

Considerazioni aggiuntive sulla UNI EN 10020

C.1 Tipologie di acciai non legati speciali

Di seguito sono riportati quali acciai rientrano in questa classe.

1. acciai che presentano un valore minimo di resilienza allo stato bonificato;
2. acciai che presentano un valore stabilito di profondità di penetrazione di tempra o di durezza superficiale allo stato temprato, bonificato o indurito superficialmente.
3. acciai per i quali sono prescritti tenori particolarmente ridotti di inclusioni non metalliche.
4. acciai con tenore massimo di S e P $\leq 0.020\%$ su analisi di colata.
5. resilienza $\geq 27\text{J}$ a -50° su provini Charpy a V in senso longitudinale.
6. acciai per reattori nucleari con limitazioni su tenori di Cu $\leq 0.10\%$, Co $\leq 0.05\%$ e V $\leq 0.05\%$.
7. acciai che presentano conduttività elettrica $\geq 9\text{Sm/mm}^2$.
8. acciai per cemento armato precompresso.
9. acciai indurenti per precipitazione con C $> 0.25\%$ con struttura di ferrite-perlite, con aggiunta di micro-leganti come Nb e V (sotto ai limiti del prospetto 1.2).

C.2 Tipologie di acciai legati di qualità

1. Acciai saldabili a grano fine per impieghi strutturali, che rispondano contemporaneamente alle seguenti prescrizioni:
 - $R_{s,\min} < 380\text{MPa}$ ($s < 16\text{mm}$);
 - valore degli elementi in lega inferiori a valori imposti rigorosamente dalla norma;
 - acciai con valore minimo di KV $\leq 27\text{J}$ (provetta Charpy, intaglio a V, -50°).
2. acciai che contengono solo Si (o Si e Al) come elementi in lega, con prescrizioni riguardanti la limitazione delle perdite magnetiche e/o dei valori minimi dell'induzione magnetica;
3. acciai per rotaie, per parancole e armature di miniere;
4. acciai legati per i quali il Cu è il solo elemento prescritto;
5. acciai legati per prodotti piani laminati a caldo o a freddo destinati a operazioni severe di deformazioni a freddo e contenenti elementi affinanti il grano quali B, Nb, Ti, V e/o Zr;
6. acciai bifasici

C.3 Tipologie di acciai legati speciali

1. per costruzioni meccaniche, per apparecchi a pressione, e/o con caratteristiche fisiche particolari;
2. acciai rapidi, acciai da utensili;
3. acciai per cuscinetti e altri acciai per usi particolari;

CONFIDENTIAL

APPENDICE D

Considerazioni aggiuntive sugli acciai da costruzione

D.1 Acciai effervescenti e calmati

Durante la colata, ci possono essere delle formazioni di ossidi di carbonio per via dell'alta reattività tra ossigeno e carbonio appunto. Ciò provoca la presenza di impurità decisamente grandi al interno del materiale colato. Per eliminare la probabilità di tali formazioni, che ovviamente intaccano le prestazioni meccaniche dell'acciaio, si inseriscono in colata degli elementi ad alta reattività con l'ossigeno per poterlo estrarre in fase di raffreddamento del colato. Tali sono:

Acciai effervescenti acciai a cui, durante la colata, **non** vengono aggiunti elementi. Per cui presentano dispersione di CO al interno, sotto forma di bolle - da cui il nome effervescente. Il vantaggio è il costo decisamente inferiore rispetto ai successivi e non presentano ritrazione in fase di raffreddamento.

Acciai calmati acciai a cui vengono inseriti durante la colata elementi ad alta reattività con l'ossigeno, tipo Al, Si o Mn. I quali legano l'ossigeno e lo portano in superficie per via della minore densità. Da ciò si forma una schiuma che può essere eliminata agilmente prima del raffreddamento del colato. Grazie a questa tecnica si ha un maggiore controllo sul tenore del carbonio presente in lega.

Al giorno d'oggi, gli acciai venduti sono tutti calmati. È imposto solo per alcune normative: dunque gli acciai effervescenti si possono ancora trovare sul mercato. Il punto è che il loro utilizzo è molto limitato per via della poca affidabilità nelle caratteristiche meccaniche.

D.2 Considerazioni sugli HSLA

Lo sviluppo di questi nuovi acciai testimonia come la ricerca può portare a risultati di interesse applicativo. Risulta fondamentale l'acquisizione di conoscenze sul rapporto tra struttura e proprietà. Lo sviluppo di nuove metodologie di analisi, hanno consentito una migliore definizione e indagine delle strutture.

APPENDICE E

Acronimi

ADI	Austempered Ductile Iron
AHSS	Advanced High Strength Steels
AISI	American Iron and Steel Institute
BH	Bake Hardens
CEN	Comitato Europeo di Normazione
CMn	Alto tenore di Carburi di Manganese
CP	Complex Phase
DP	Dual Phase
HSLA	High Strength Low Alloy
HSS	High Strength Steels
IF-HS	Interstitial Free High Strength
IS	Isotrophic Steels
ISO	International Organization for Standardization
MS	Martensitic Steel
PH	Precipitation Hardening
PREN	Pitting Resistance Equivalent Number
QandP	Quenching and Partitioning
SAE	Society of Automotive Engineers
TR	Technical Report
TRIP	Transformation-Induced Plasticity
TTT	Time Temperature Transformation
TWIP	Twinning-Induced Plasticity
TT	Trattamenti Termici
ULSAB-AVC	Ultra-Light Steel Automotive Body - Advanced Vehicle Concept
UNI	Ente nazionale di 'UNI'ficazione

CONFIDENTIAL