



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	iii
Elenco delle tabelle	iv
1 Classificazione e Designazione degli acciai	1
1.1 La normazione	1
1.1.1 Acciai non legati	2
1.1.1.1 Di Qualità	2
1.1.1.2 Speciali	2
1.1.2 Acciai inossidabili	3
1.1.3 Acciai legati	4
1.1.3.1 di Qualità	4
1.1.3.2 Speciali	4
1.2 La norma UNI EN 10027-1:2016	4
1.2.1 UNI EN 10027-1 gruppo 1:2016	4
1.2.2 UNI EN 10027-1 gruppo 2:2016	7
1.2.2.1 Sottocategoria 2.1	7
1.2.2.2 Sottocategoria 2.2	7
1.2.2.3 Sottocategoria 2.3	8
1.2.2.4 Sottocategoria 2.4	8
1.3 La norma UNI EN 10027-2	9
1.4 Cenni alla normativa AISI	11
1.4.1 Acciai al carbonio o basso legati	11
1.4.2 Acciai legati, ma soprattutto inox	11
1.5 Considerazioni generali	11
2 Acciai per impieghi strutturali	13
2.1 UNI EN 10025-(3-6) Prodotti laminati a caldo	14
2.2 Acciai resistenti alla corrosione atmosferica	15
2.3 Acciai ad alta resistenza (HSS e AHSS)	16
2.3.1 Meccanismi di rinforzo	16
2.4 HSLA	18
2.4.1 Ferritico-Perlitici ad alta resistenza	19
2.4.2 Ferritico-Perlitici ad alta resistenza e alta tenacità	19
2.4.3 Acciai a basso tenore di C con struttura aciculare	22
2.4.4 Dual Phase	26
2.4.5 Acciai TRIP	27
2.4.6 Acciai TWIP	28
2.4.7 Q&P	28
3 Acciai Speciali da Costruzione	31
3.1 Acciai speciali da costruzione propriamente detti	31

3.1.1 Acciai da Bonifica	31
A Considerazioni aggiuntive sulla UNI EN 10020	33
A.1 Tipologie di acciai non legati speciali	33
A.2 Tipologie di acciai legati di qualità	33
A.3 Tipologie di acciai legati speciali	34
B Considerazioni aggiuntive sugli acciai da costruzione	35
B.1 Acciai effervescenti e calmati	35
B.2 Considerazioni sugli HSLA	35
C Acronimi	36

A large, faint watermark is positioned diagonally across the page. It consists of a light gray rectangular box with rounded corners containing the word "CONFIDENTIAL" in a bold, sans-serif font.

Elenco delle figure

1.1	Suddivisione acciai in base alla normativa UNI EN 10020:2001	2
1.2	Designazione acciai tramite UNI EN 10027-2	10
1.3	Confronto designazioni	12
2.1	meccanismi di rinforzo in rapporto alla tenacità	17
2.2	Miglioramento tramite dimensione del grano	17
2.3	Variazioni dello snervamento con l'aggiunta di microleganti	19
2.4	Lavorazioni per acciai ferritico-perlitici ad alta resistenza e tenacità	21
2.5	Acciai Ferritico-Perlitici ad alta resistenza e tenacità	22
2.6	Confronto curve CCC tra acciaio Ferritico-Perlitico e a basso carbonio a struttura Aciculare	23
2.7	Rappresentazione della resistenza/duttilità degli acciai HSS e AHSS	24
2.8	Designazioni secondo Ultra-Light Steel Automotive Body - Advanced Vehicle Concept (ULSAB-AVC) a confronto con normative UNI EN	25
2.9	Esempio di processo termomeccanico con i relativi risultati	26
2.10	Microstruttura acciai Dual Phase (DP)	26
2.11	Gli acciai Transformation-Induced Plasticity (TRIP)	27
2.12	Processo produttivo degli acciai TRIP	28
2.13	Confronto in termini di deformazione-snervamento tra acciai TRIP e Twinning-Induced Plasticity (TWIP)	29
2.14	Metodo di realizzazione dei Quenching and Partitioning (QandP)	29
2.15	Acciai Advanced High Strength Steels (AHSS) di seconda generazione e la loro collocazione in caratteristiche meccaniche	30
3.1	Trattamento termico per gli acciai da bonifica	32

Elenco delle tabelle

1.1	Norme di carattere geneale	2
1.2	Prospetto I, norma UNI EN 10020:2001	3
1.3	Indicazioni simboli	5
1.4	Valori di resilienza	5
1.5	Sottogruppo 1.1 vecchia normativa	6
1.6	Sottogruppo 1.2 vecchia normativa	6
1.7	Sottocategoria 2.1	7
1.8	Sottocategoria 2.2	8
1.9	Fattori moltiplicativi elementi	8
1.10	Sottocategoria 2.3	8
1.11	Sottocategoria 2.4	9
1.12	Classificazione acciai su base chimica	9



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 norme 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.

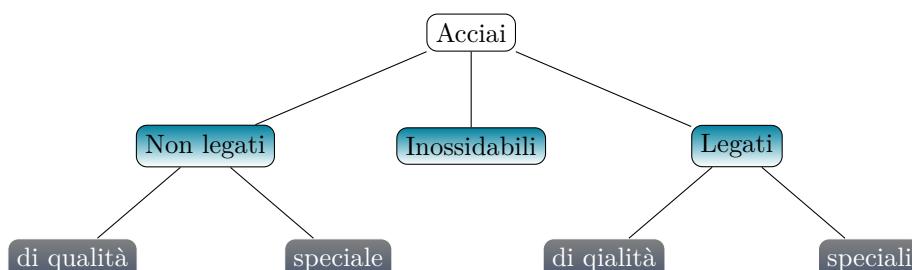
**Figura 1.1:** Suddivisione acciai in base alla normativa UNI EN 10020:2001

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

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

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

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 A.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 A.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

- | | | |
|----------|-----------|-----------|
| • Fe360 | • Fe410Pb | • FeG450 |
| • FeE355 | • Fe410D | • 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. Numero di gruppo del materiale	XX Numero del gruppo dell'acciaio	YY(ZZ) 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 fabbricazione

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...

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, ondulate)
- 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 B.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

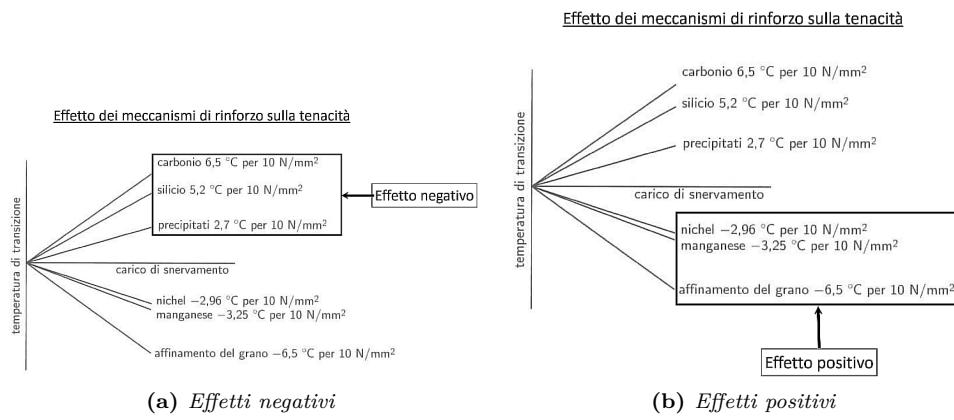
Per raggiungere gli obiettivi indicati in precedenza, gli acciai ad alta resistenza presentano i così detti *Meccanismi di rinforzo*. Si vedranno ora i principali.

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:

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

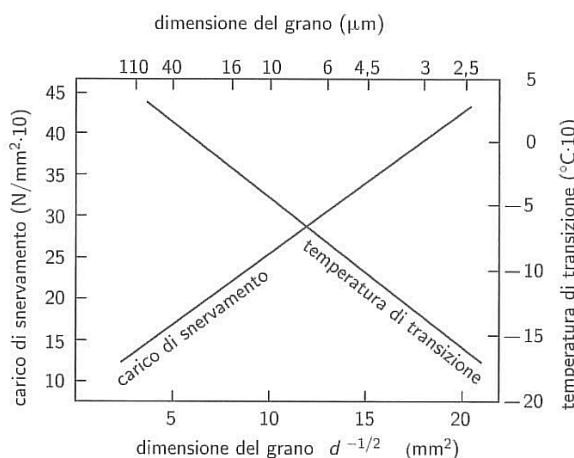
$$I.T.T. = A - B \ln d^{-1/2} \quad (2.2)$$

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.

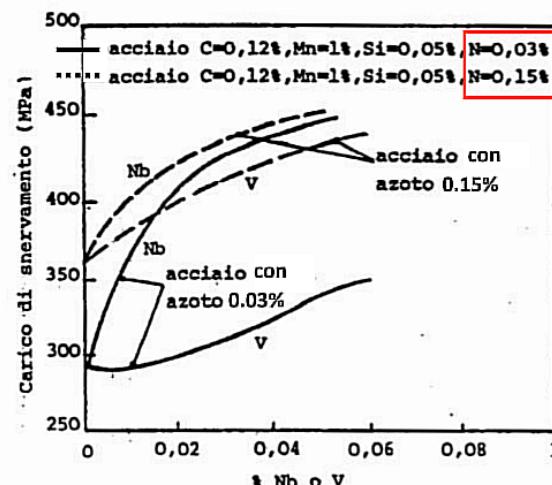


Figura 2.3: Variazioni dello snervamento con l'aggiunta di microleganti

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%).

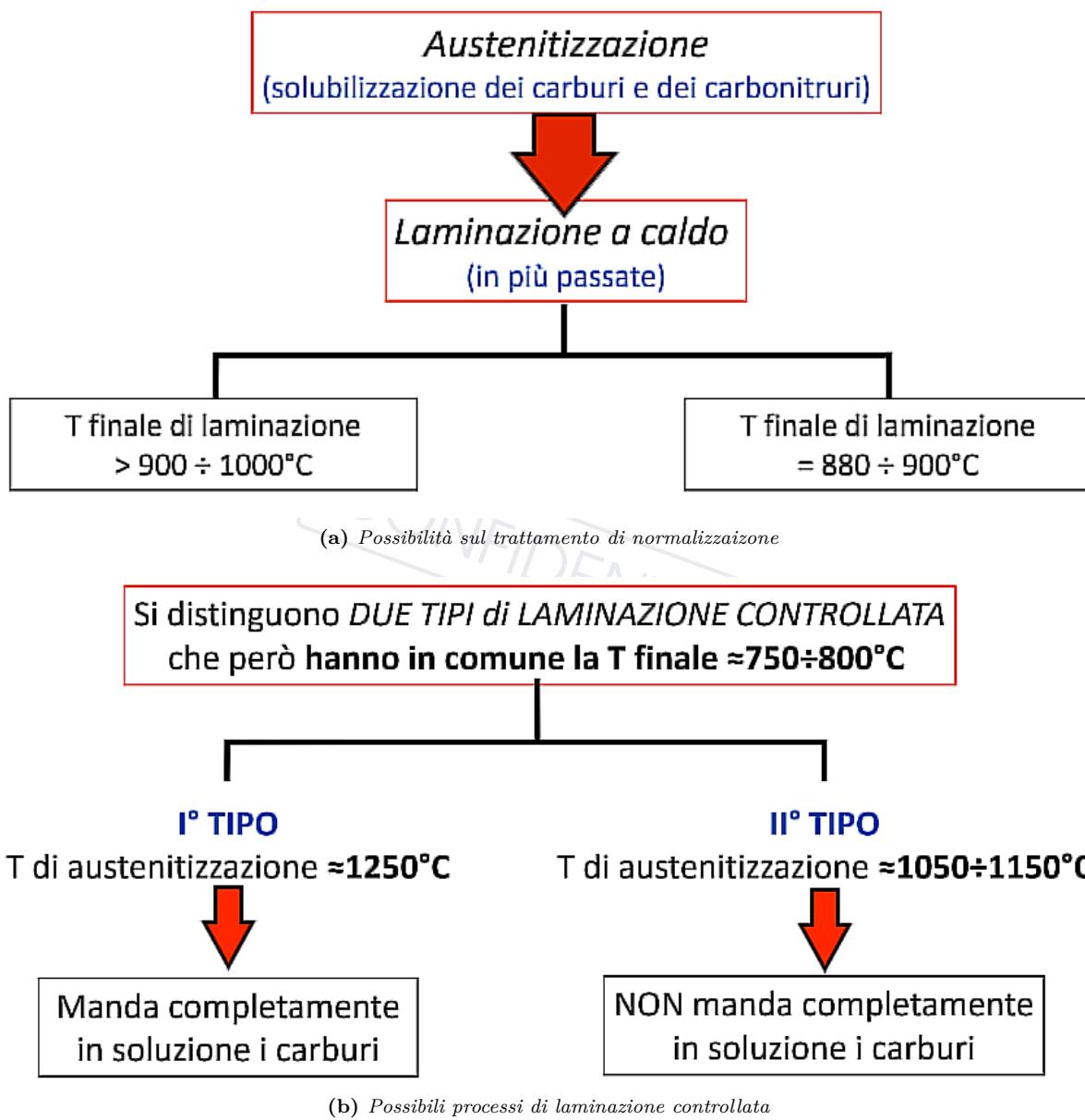
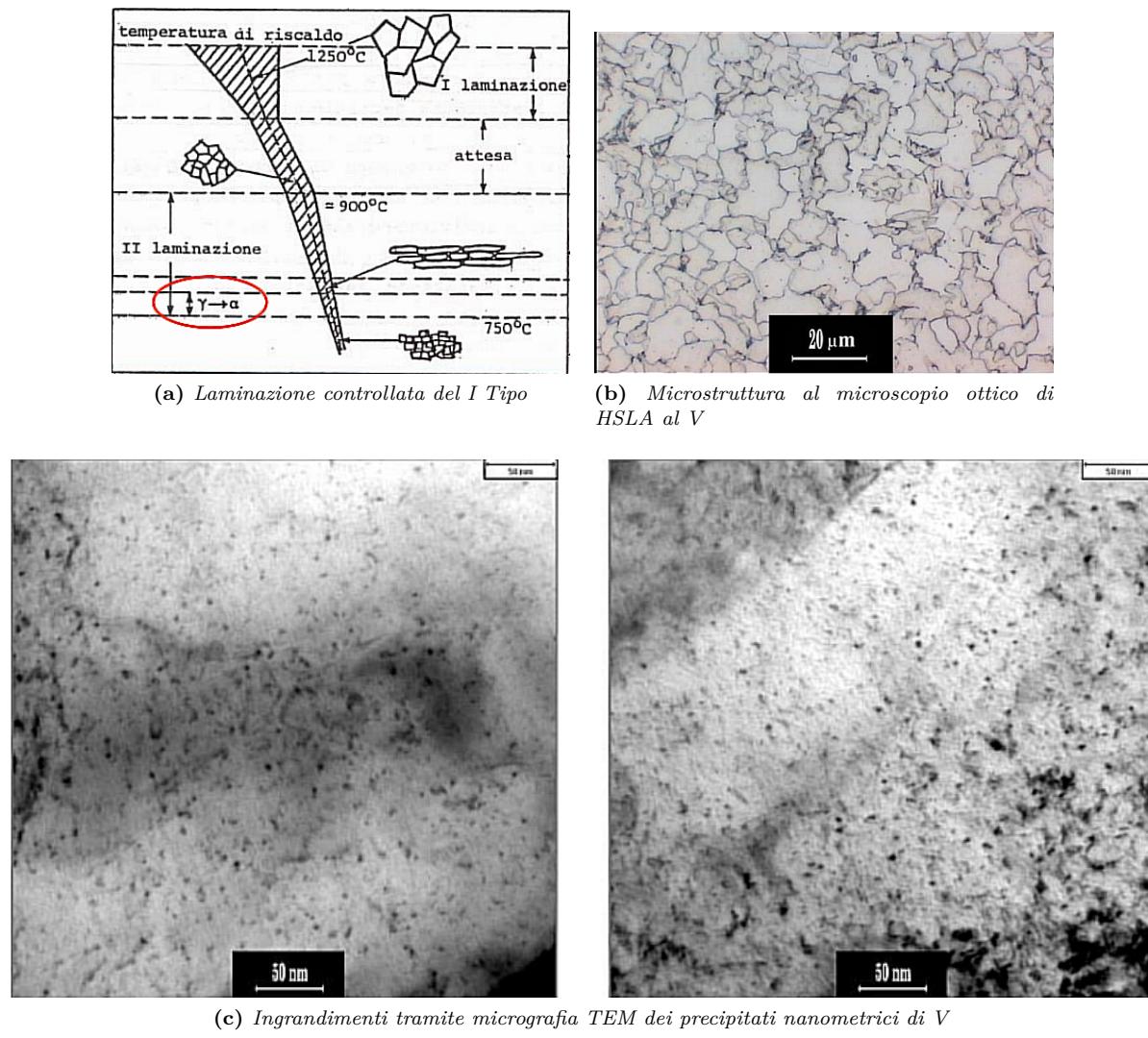


Figura 2.4: Lavorazioni per acciai ferritico-perlitici ad alta resistenza e tenacità

(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));

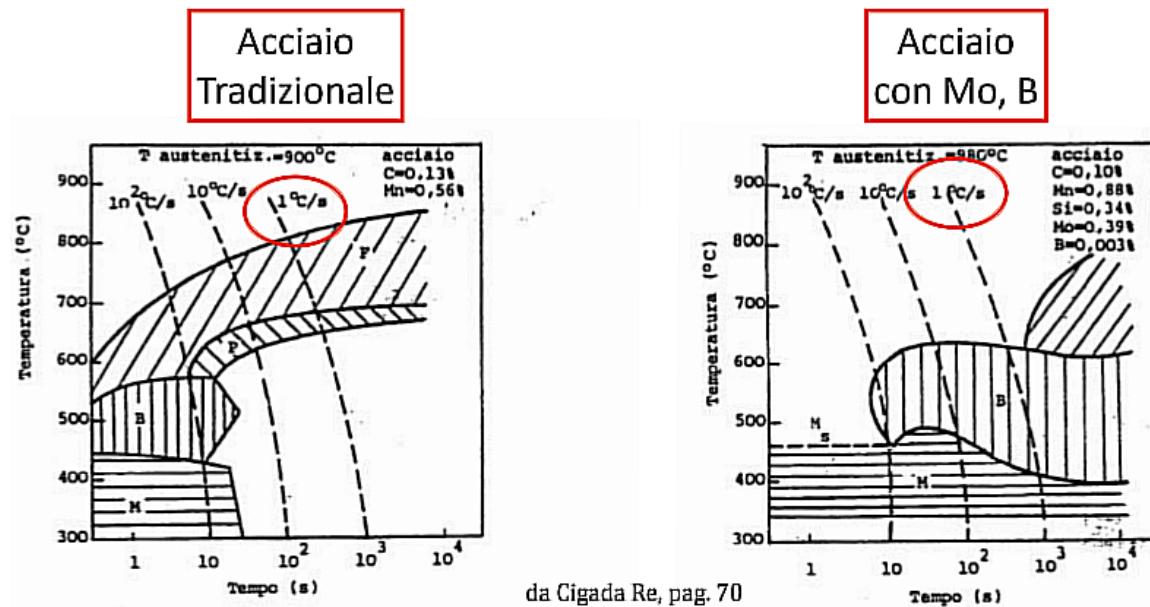


Figura 2.6: Confronto curve CCC tra acciaio Ferritico-Perlitico e a basso carbonio a struttura Aciculare

- 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.

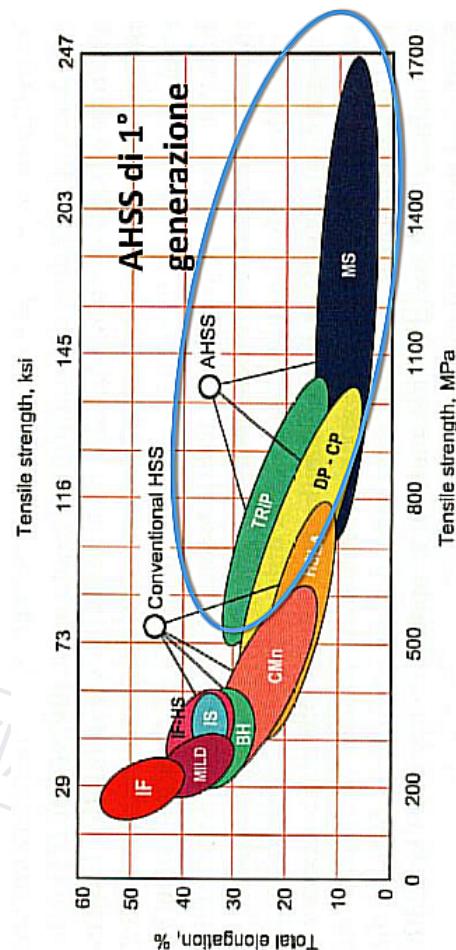


Figura 2.7: Rappresentazione della resistenza/duttilità degli acciai HSS e AHSS

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)						
HSLA 260	260 - 320	350 - 410	$e_t (\%)$ $L_o = 80 \text{ mm}$ $th < 3 \text{ mm}$					
HSLA 300	300 - 360	390 - 450	≥ 28					
HSLA 340	340 - 400	420 - 490	≥ 26					
HSLA 380	380 - 450	460 - 530	≥ 23					
HSLA 420	420 - 520	470 - 590	≥ 20					
			≥ 17					
								
(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)		$e_t (\%)$ $L_o = 80 \text{ mm}$ $th < 3 \text{ mm}$						
HSLA 320	325 - 385	415 - 470	≥ 28					
HSLA 360	360 - 435	450 - 520	≥ 21					
HSLA 420	420 - 500	490 - 570	≥ 20					
HSLA 460	460 - 550	550 - 650	≥ 17					
HSLA 500	500 - 590	570 - 670	≥ 15					
HSLA 550	550 - 650	650 - 730	≥ 15					
		$E_t (\%)$ $L_o = 5,65 \sqrt{S_o} \text{ (mm)}$ $th \geq 3 \text{ mm}$						
(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	HDT580X							
Dual Phase 780								
(c) Designazione acciai Dual Phase								

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

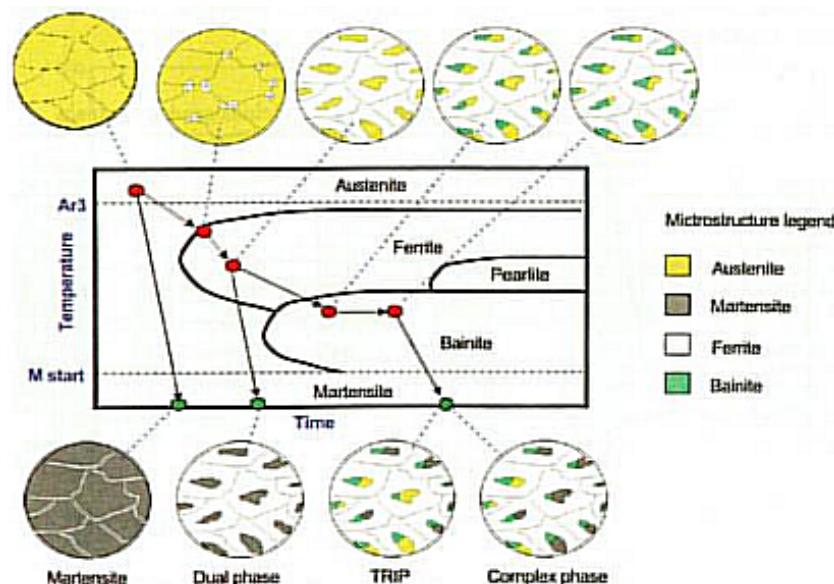


Figura 2.9: Esempio di processo termomeccanico con i relativi risultati

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 ÷ 0.15%	Cr, Mo ≤ 0.4%	V ≤ 0.6%	Nb ≤ 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

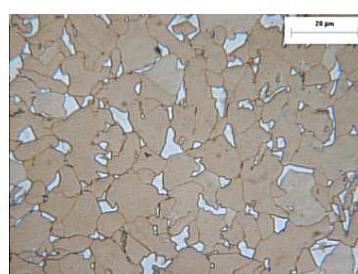


Figura 2.10: Microstruttura acciai DP

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;

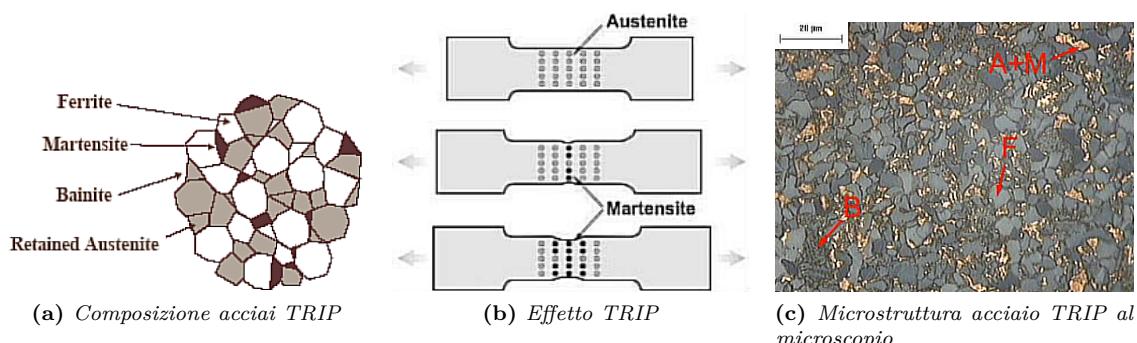


Figura 2.11: Gli acciai TRIP

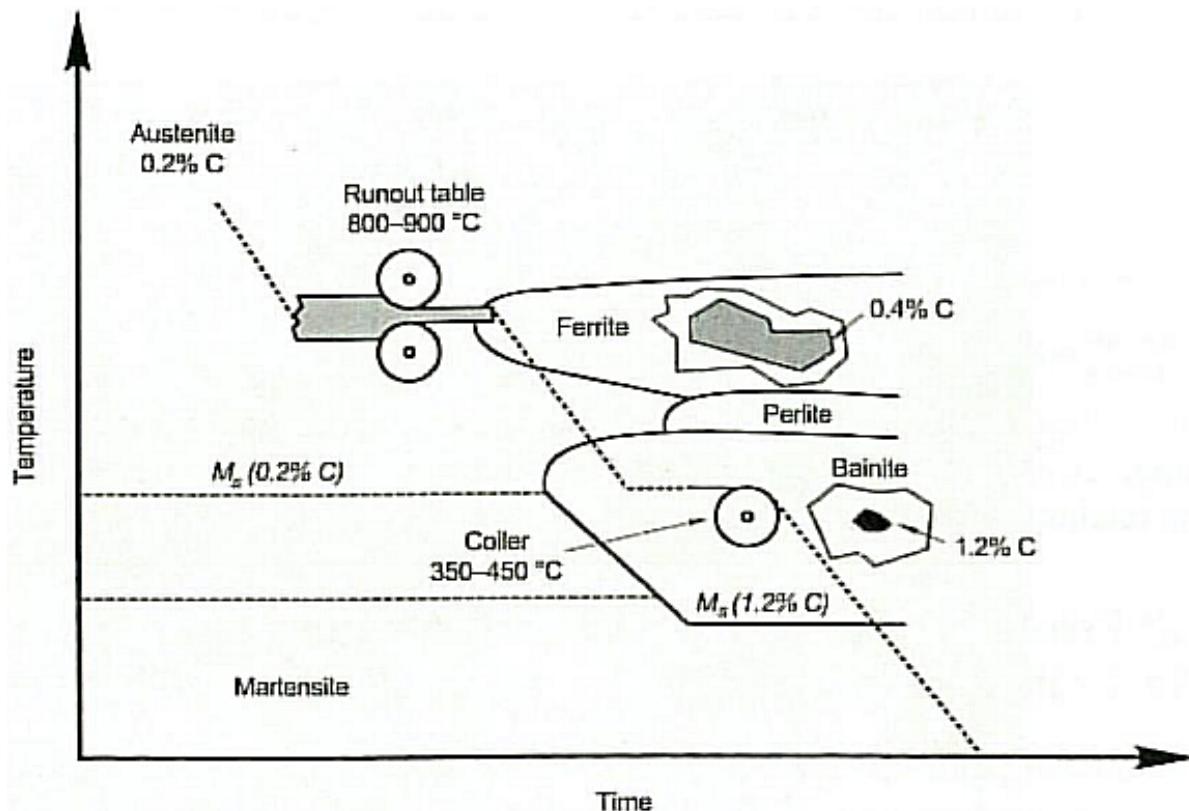


Figura 2.12: Processo produttivo degli acciai TRIP

- 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

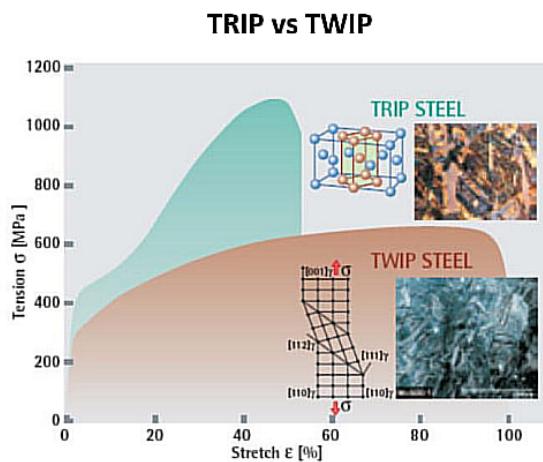


Figure 2: The stress-strain diagram clearly shows the differing characters of TRIP and TWIP steel. TRIP steel can resist high stresses without deforming. TWIP steel deforms with low stresses, but does not break until strain reaches around 90 percent.

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.

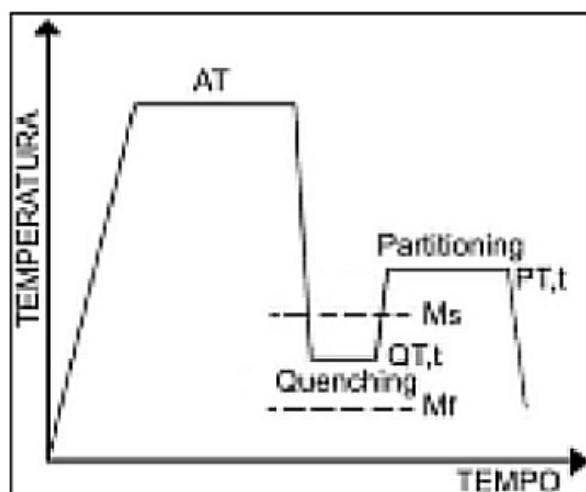


Figura 2.14: Metodo di realizzazione dei QandP

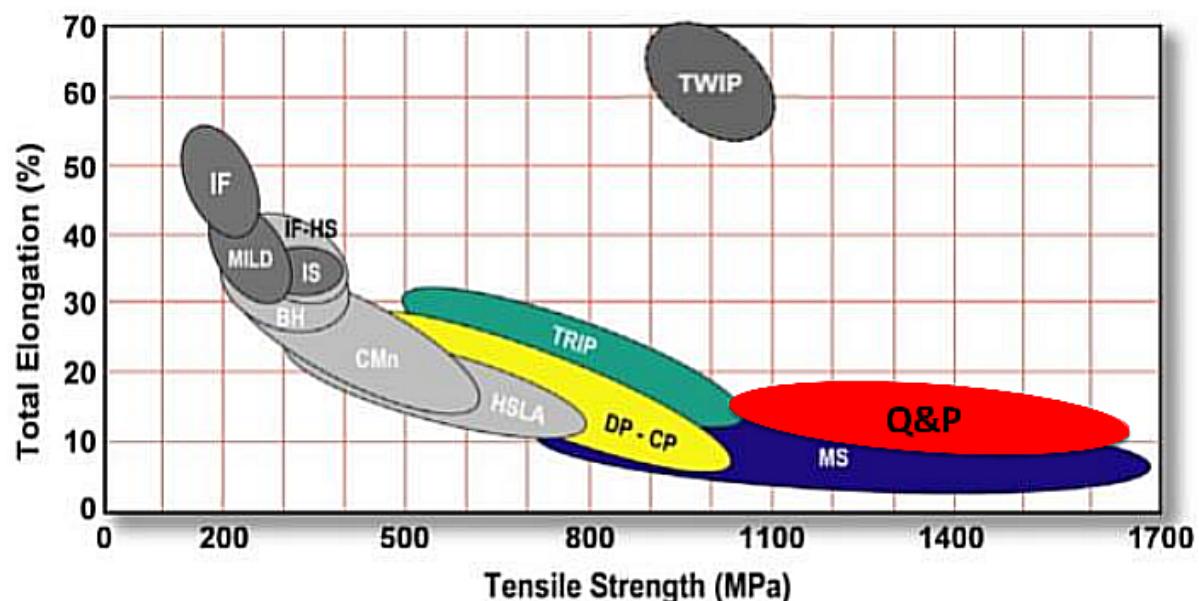


Figura 2.15: Acciai AHSS di seconda generazione e la loro collocazione in caratteristiche meccaniche

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.

APPENDICE A

Considerazioni aggiuntive sulla UNI EN 10020

A.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).

A.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

A.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 B

Considerazioni aggiuntive sugli acciai da costruzione

B.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.

B.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 C

Acronimi

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
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