



Centro Stampa

ATTENZIONE QUESTI APPUNTI SONO OPERA DI STUDENTI , NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE. IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.

**MATERIALI PER L'INDUSTRIA MECCANICA
2018-19**

DI BERGAMO SIMONE

N° 2924

MATERIALI PER L'INDUSTRIA MECCANICA

(Matteis 2018/19)

Sommario

PRODUZIONE ANNUA E COSTO DEI METALLI	16
DIAGRAMMA DI ELLINGHAM	16
Andamento e pendenza delle rette.....	17
Facilità di riduzione.....	17
Ossidazione del carbonio.....	17
Influenza delle pressioni parziali	18
Riduzione del Ferro.....	19
PRODUZIONE DELL'ACCIAIO	21
Principali processi.....	21
Rottami	21
Minerali	21
Altoforno	22
Reazioni nell'altoforno	23
Convertitore	25
Metallurgia fuori forno.....	26
Colata.....	27
Deformazione a caldo.....	28
Inclusioni non metalliche.....	28
DIAGRAMMA FE – C E STRUTTURE CRISTALLOGRAFICHE	29
Diagramma stabile/metastabile	29
Fasi e punti principali.....	29
Regola della leva.....	30
Esempio – raffreddamento 0,16 C.....	31
Le fasi ferrite e austenite.....	32
Volume (densità) dei cristalli in funzione di t.....	32
Siti interstiziali	32
Struttura CFC	32
Struttura CCC.....	33
Elementi interstiziali N e C nelle fasi α e γ	33
Struttura cristallina della cementite.....	34
TRASFORMAZIONI DI FASE ALLO STATO SOLIDO NEGLI ACCIAI	34
Trasformazioni ricostruttive e displasive.....	34
Ricostruttive	34
Displasive.....	35
Trasformazioni di interesse negli acciai.....	35

Trasformazione austenite → ferrite (pre-eutettoidica)	35
Trasformazione austenite → perlite	37
Perlite: relazione tra temperatura di trasformazione e distanza interlamellare	37
METALLOGRAFIA.....	38
1 – Prelievo campioni	38
2 – Inglobatura	38
3 – Pulitura/lappatura	38
4 – Attacco metallografico	38
FERRITE E PERLITE – MICROSTRUTTURA.....	39
Caso 1 - Lega eutettoidica (centrale).....	39
Caso 2 - Lega ipoeutettoidica (sinistra)	40
Caso 3 - Lega ipereutettoidica (destra)	40
Metallografie	40
0,1% C	41
0,25% C	41
0,45% C	41
0,6% C	42
0,76% C – eutettoidico	42
0,15%C + 1% Mn	42
MARTENSITE.....	43
Considerazioni generali	43
Il reticolo TCC (Tetragonale a Corpo Centrato)	44
La teoria cristallografica	45
Durezza della martensite.....	47
Metallografia	47
BAINITE	48
Formazione della bainite superiore (upper) e inferiore (lower)	48
La temperatura B _s (Bainite start).....	49
La trasformazione incompleta.....	50
La ferrite aciculare	51
Cinetica della trasformazione bainitica	51
Meccanismi di rafforzamento	52
CURVE TTT E CCT.....	52
Curve Tempo/Temperatura/Trasformazione (TTT).....	52
Curve di raffreddamento continuo (CCT)	54
Confronto fra i due diagrammi per lo stesso acciaio.....	55

EFFETTI DEGLI ELEMENTI DI LEGA NEGLI ACCIAI	56
Austenitizzanti vs ferritizzanti	56
Formazione di carburi.....	57
Cinetica delle trasformazioni di fase (elementi sostituzionali)	57
CICLI DI LAVORAZIONE DEGLI ACCIAI	57
Semilavorati vs prodotti finiti	57
Esempi di cicli	58
Scopo dei trattamenti termici	58
Ricottura subcritica.....	59
Ricottura ipercritica.....	62
Normalizzazione	62
Ricottura di sferoidizzazione	62
Bonifica	63
Introduzione	63
Tempra.....	63
Rinvenimento	63
FRATTURA	66
Frattura duttile o fragile?	66
Prova Charpy	66
Osservazione dei campioni dopo l'urto.....	67
Transizione duttile – fragile.....	68
Influenza del tenore di carbonio	68
Influenza della microstruttura.....	69
Influenza della temperatura di rinvenimento	69
Influenza del tenore di Zolfo	69
MECCANISMI MICROSCOPICI DI FRATTURA.....	70
Frattura duttile per nucleazione, crescita e coalescenza di microvuoti.....	70
Frattura coppa-cono.....	71
Frattura fragile per clivaggio	71
Frattura fragile intergranulare.....	73
Fratture miste	74
SALDATURA PER FUSIONE E SALDABILITÀ DEGLI ACCIAI	74
Informazioni generali.....	74
Proprietà meccaniche e rotture	75
Saldabilità	75
Carbonio equivalente	76

Analisi metallografica di una saldatura laser senza metallo di apporto.....	77
TECNOLOGIE DI SALDATURA.....	80
Fonte di calore chimica.....	80
Cannello ossi-acetilenico	80
Alluminotermia.....	81
Ad arco elettrico	82
TIG (Tungsten Inert Gas) o GTAW (Gas-Tungsten Arc Welding)	82
MIG (Metal Inert Gas) o GMAW (Gas-Metal Arc Welding)	83
SMAW (Shielded Metal Arc Welding).....	84
A resistenza	84
RSW (Resistance Spot Welding) – Saldatura per punti	84
Laser	85
Allo stato solido	85
Forge Welding (“bollitura”)	86
Roll Welding.....	86
Friction Welding	86
Friction Stir Welding	87
Explosion welding (saldatura per impatto)	87
ACCIAI – GENERALE.....	88
ACCIAI A BASSO TENORE DI C (<0,25%)	89
Acciai ferritici-perlitici (Mild Steel).....	89
Acciai laminati a freddo.....	90
Microstruttura	91
Ricottura	91
Strain-aging.....	92
Acciai per imbutitura profonda	93
Metodo 1: Ciclo base imbutitura profonda.....	94
Metodo 2: Acciai Interstitial Free (IF).....	94
Metodo 3: Acciai Bake Hardening (BH)	95
Acciai HSLA (High Strength Low Alloy)	95
Cicli di produzione	96
Microstruttura	97
Acciai Dual Phase (DP)	97
Ciclo di lavorazione.....	97
Bilanciamento delle fasi.....	98
Temprabilità	98

Proprietà meccaniche.....	99
Acciai TRIP (Transformation Induced Plasticity).....	99
Ciclo di lavorazione.....	99
Proprietà meccaniche.....	100
Acciai martensitici (a basso tenore di C)	100
Ciclo di lavorazione.....	101
Zincatura.....	102
ACCIAI A MEDIO C (circa 0,4%).....	103
TEMPRA E TEMPRABILITÀ	103
Il Diametro Ideale Critico.....	103
Esperimento: tempra di barre	103
Drasticità del mezzo temprante	104
Diametro Ideale Critico – definizione e calcolo.....	104
Prova Jominy (di tempra di un'estremità).....	105
Descrizione della prova	105
Calcolo della durezza senza effettuare la prova.....	106
Evoluzione della microstruttura	107
Esempi di curve Jominy	107
Stima della durezza dopo tempra	108
Metodo di Lamont.....	108
Calcolo analitico: impostazione del problema	108
Calcolo analitico: conclusioni	109
Esempio	110
Unità di misura	110
Limitazioni del metodo.....	110
Esempio pratico.....	111
Tensioni di tempra.....	112
Curva di dilatazione termica	112
Influenza della deformazione plastica.....	112
Aspetti pratici	113
ACCIAI A MEDIO C MICROLEGATI.....	114
Effetto dei microleganti.....	114
Microstruttura.....	115
Proprietà meccaniche.....	115
ACCIAI A MEDIO C BAINITICI.....	116
Effetto del Si	116

Microstruttura.....	116
Proprietà meccaniche.....	117
TRATTAMENTI SUPERFICIALI	117
Tempra superficiale.....	118
Riscaldamento.....	118
Mezzo di raffreddamento.....	118
Acciai impiegati.....	118
Influenza della microstruttura precedente	119
Ciclo di lavorazione.....	120
Tempra a induzione.....	120
Processo.....	120
Regolazione dei parametri.....	121
Osservazioni tecnologiche	122
Cementazione.....	122
Processo.....	122
Temperatura di austenitizzazione	123
Equilibrio di Boudoir	123
Cinetica del processo.....	123
Altre informazioni.....	124
Ciclo di lavorazione.....	125
Cementazione in bassa pressione	125
Atmosfera carburante	125
Controllo del processo.....	126
Tempra.....	126
Confronto fra i due metodi.....	126
Nitrurazione.....	127
Processo.....	127
Reazione e composizione degli strati	127
Microstruttura	128
.....	129
Modello matematico	129
Confronto fra i trattamenti superficiali	129
Luogo di realizzazione.....	129
Durezza dello strato.....	129
Spessore dello strato	129
Resistenza in temperatura dello strato	130

Indurimento selettivo	130
Confronto	130
ACCIAI PERLITICI (EUTETTOIDICI)	131
Resistenza meccanica	131
Microstruttura	132
Quanta cementite nella perlite?	132
Acciai perlitici per rotaie.....	133
Tipologie	133
Proprietà meccaniche.....	133
Acciai perlitici per fili	134
Patentamento vs Processo Stelmor	134
Trafilatura a freddo (wire drawing)	135
Distensione (stabilizzazione)	136
ACCIAI IPEREUETTOIDICI PER BONIFICA ovvero ACCIAI PER CUSCINETTI.....	136
Ciclo di lavorazione.....	137
Austenite residua.....	137
ACCIAI PER UTENSILI	138
Categorie	138
Carburi metallici	138
Ciclo di lavorazione.....	139
ESR – Electroconductive Slag Remelting	140
Trattamento termico	140
Austenitizzazione.....	141
Tempra.....	142
Rinvenimento	142
Influenza della temperatura di austenitizzazione sulla durezza dopo rinvenimento	143
Dettagli impiantistici.....	144
Analisi delle tipologie	144
Acciai per lavorazioni a freddo	144
Acciai per lavorazioni a caldo	146
Acciai rapidi	147
ACCIAI MARAGING.....	148
Composizione e caratteristiche	148
Trattamento termico	149
Effetti degli elementi di lega.....	149
Effetto del Nichel	150

Trasformazioni (precipitati) durante l'invecchiamento.....	150
Ciclo di lavorazione.....	151
Proprietà meccaniche.....	151
CORROSIONE	152
Perdita di massa nel caso di corrosione uniforme	152
Potenziale di elettrodo	152
Corrosione galvanica	153
La passivazione	154
Scala di nobiltà pratica in acqua di mare.....	154
Acciai CORTEN (resistenti alla corrosione atmosferica).....	155
Zincatura.....	156
Corrosione locale.....	156
Pitting (o corrosione per vaiolatura)	156
Corrosione interstiziale.....	157
ACCIAI INOX – INTRODUZIONE	158
Diagramma di stato Fe-Cr.....	158
Diagramma di stato Fe-Ni.....	159
Diagramma di Schaeffler	159
Mercato degli acciai inossidabili.....	160
ACCIAI INOX AUSTENITICI.....	161
Corrosione intergranulare	161
Cinetica	162
Rimedi.....	162
Proprietà meccaniche.....	163
Trasformazione martensitica.....	163
Formazione di seconde fasi	165
Ferrite	165
Fase σ – intermetallico	166
Altri intermetallici.....	166
Trattamenti termici	166
Usi speciali.....	167
BONUS: ACCIAI TWIP.....	167
Effetto TWIP	168
Meccanismo di rafforzamento	168
Saldabilità	168
ACCIAI INOX FERRITICI.....	169

Proprietà meccaniche.....	169
Effetto degli elementi di lega	169
Seconde fasi.....	170
Austenite (o martensite)	170
Carburi di Cromo	170
Fasi intermetalliche	170
Infragilimento a 475 °C.....	171
Trattamenti termici	171
ACCIAI INOX MARTENSITICI.....	171
Tipologie principali	172
Bonifica	172
Austenitizzazione.....	173
Rinvenimento	174
Proprietà meccaniche.....	174
ACCIAI INOX DUPLEX.....	174
Proprietà.....	175
Trattamento termico	175
Fasi indesiderate.....	175
INOX INDURENTI PER PRECIPITAZIONE – PH (PRECIPITATION HARDENING)	176
Ciclo di lavorazione.....	176
Proprietà meccaniche.....	176
Altri tipi.....	176
LEGHE PER ALTA TEMPERATURA – INTRODUZIONE	177
Requisiti	177
Scorrimento viscoso (creep)	177
Prova a forza costante.....	177
Transcristallino vs intercristallino.....	179
Metodi di rafforzamento	179
Corrosione a secco.....	179
Ossidazione.....	180
Tipologie di leghe per alta temperatura.....	180
ACCIAI (MEDIO-BASSO TENORE DI ELEMENTI DI LEGA).....	181
Elementi di lega	181
Fragilità da rinvenimento	181
Trattamento termico	181
Esempi di acciai basso legati.....	182

ACCIAI INOSSIDABILI	182
Elementi di lega	183
Tipologie	183
Ferritici e duplex: formazione di fase σ	183
SUPERLEGHE.....	184
Superleghe base Fe o Ni-Fe	185
Superleghe a base Ni	185
Superleghe base Co	186
Effetto della struttura cristallina sulla resistenza al creep	187
MAGNETISMO	188
Definizioni.....	188
Origine della magnetizzazione.....	188
Diamagnetismo e paramagnetismo	189
Diamagnetismo.....	189
Paramagnetismo.....	189
Ferromagnetismo	190
Tipologie di ferromagnetismo	190
Effetto della temperatura sul ferromagnetismo	191
Domini di Weiss e magnetizzazione	191
Confronto con gli altri magnetismi.....	192
Isteresi magnetica.....	192
Anisotropia magnetica.....	192
Acciai per applicazioni magnetiche	193
Acciai duri	193
Acciai dolci.....	193
GHISE	194
Formazione di grafite	195
Effetto degli elementi di lega	195
Grafitizzanti vs sbiancanti.....	195
Effetto del Silicio.....	195
Classificazione delle ghise.....	196
Altri elementi di lega	196
Tipologie di ghisa	196
Ghisa malleabile	198
Ghisa bianca.....	199
Ghisa grigia	199

Distribuzione della grafite	199
Inoculazione.....	200
Forma della grafite	200
Modifica.....	202
Combinazione dei processi - ghisa duttile.....	202
Matrice	202
Austempering	203
Ghise tipiche	204
Smorzamento	205
ALLUMINIO.....	206
Confronto con acciaio.....	206
Produzione.....	206
Processo Hall-Heroult.....	206
Ciclo di produzione	207
Rafforzamento per precipitazione.....	208
Meccanismo di rafforzamento	208
Caratteristiche dei precipitati.....	208
Interfaccia coerente vs incoerente.....	208
Metodo della solubilizzazione e precipitazione	209
Precipitazione nelle leghe alluminio-rame.....	210
Successione dei precipitati	210
Ciclo di lavorazione.....	210
Metallografie	211
Curve di invecchiamento.....	211
Temperature di trattamento.....	212
Leghe di alluminio per deformazione plastica	213
Trattamento termico - tempra	213
Microstruttura	213
Esempi di leghe.....	213
Designazione dello stato di trattamento termico	214
Esempio: lega 2024.....	215
Esempio: lega 7075.....	215
Leghe di alluminio per fonderia.....	216
Nomenclatura.....	216
Effetti del Silicio	216
Proprietà meccaniche.....	218

Affinamento del grano.....	218
Modifica.....	219
RAME E LE SUE LEGHE	220
Rame (quasi puro)	220
Presenza di ossigeno	221
Tipologie di rame puro	221
Produzione.....	222
Meccanismi di rafforzamento e leghe.....	222
Incrudimento	222
Affinamento del grano.....	223
Ottoni – leghe con Zn	223
Fasi possibili.....	223
Tipologie	225
Proprietà.....	225
Microstruttura	225
Ciclo di lavorazione.....	226
Fenomeni di corrosione negli ottoni con Zn > 15%.....	226
Bronzi con Stagno	226
Diagramma Rame-Stagno.....	226
Esempi di leghe.....	227
Bronzi al fosforo	227
Bronzi con Al.....	228
Leghe Cu-Be.....	228
TITANIO.....	230
Cristallografia e sistemi di scorrimento	230
Produzione.....	231
Tipologie di lega.....	231
Leghe commercialmente pure	232
Elementi di lega (sostituzionali) e trasformazioni di fase.....	232
Diagramma di stato equivalente	235
Leghe α e quasi- α	235
Leghe $\alpha - \beta$	237
Esempio - Caso 1a - Raffreddamento lento da $T > \beta$ -transus.....	238
Esempio – Caso 2b (STA) – Variazione delle proprietà meccaniche	239
Leghe β	239
MAGNESIO	240

Caratteristiche	240
Elementi di lega	240
Leghe da fonderia con Alluminio.....	241
Leghe da fonderia con Zr + RE (La, Ce, Pr, Nd)	241
Leghe da deformazione plastica	242
Trattamenti termici	242
ZINCO	243
METALLURGIA DELLE POLVERI	244
Polveri - Preparazione	244
Atomizzazione	245
Metodi chimici.....	246
Metodo meccanico.....	247
Polveri – composizioni.....	249
Acciai basso legati.....	249
Acciai inossidabili e rapidi.....	250
Polveri - Caratteristiche e lavorazioni.....	251
Caratterizzazione dimensionale	251
Forma delle particelle.....	251
Altre analisi effettuate.....	252
Formatura di sinterizzati.....	252
Pressatura in stampi rigidi	252
Resistenza al “verde”	253
Gli stampi.....	253
Pressatura isostatica.....	255
Formatura per rullatura.....	255
Formatura per estrusione.....	255
Sinterizzazione.....	256
Influenza di tempo e temperatura	256
Influenza della granulometria	256
Influenza di pressione e temperatura	256
Fenomeni di sinterizzazione	257
Meccanismi di consolidamento.....	257
Attivazione con liquido	257
Sinterizzazione - Atmosfere.....	258
Influenza del rapporto H ₂ /H ₂ O	259
Atmosfere esotermiche ed endotermiche	259

Schema di impianto di sinterizzazione	260
Trattamenti successivi	260
Caratteristiche meccaniche	260
Confronti.....	261

PRODUZIONE ANNUA E COSTO DEI METALLI

Metallo	Produzione annua [milioni tonnellate]	Prezzo [€/kg]
Fe	1600	0,4
Al	40	1,2
Cu	20	4
Mg	6	2
Ti	0,2	15

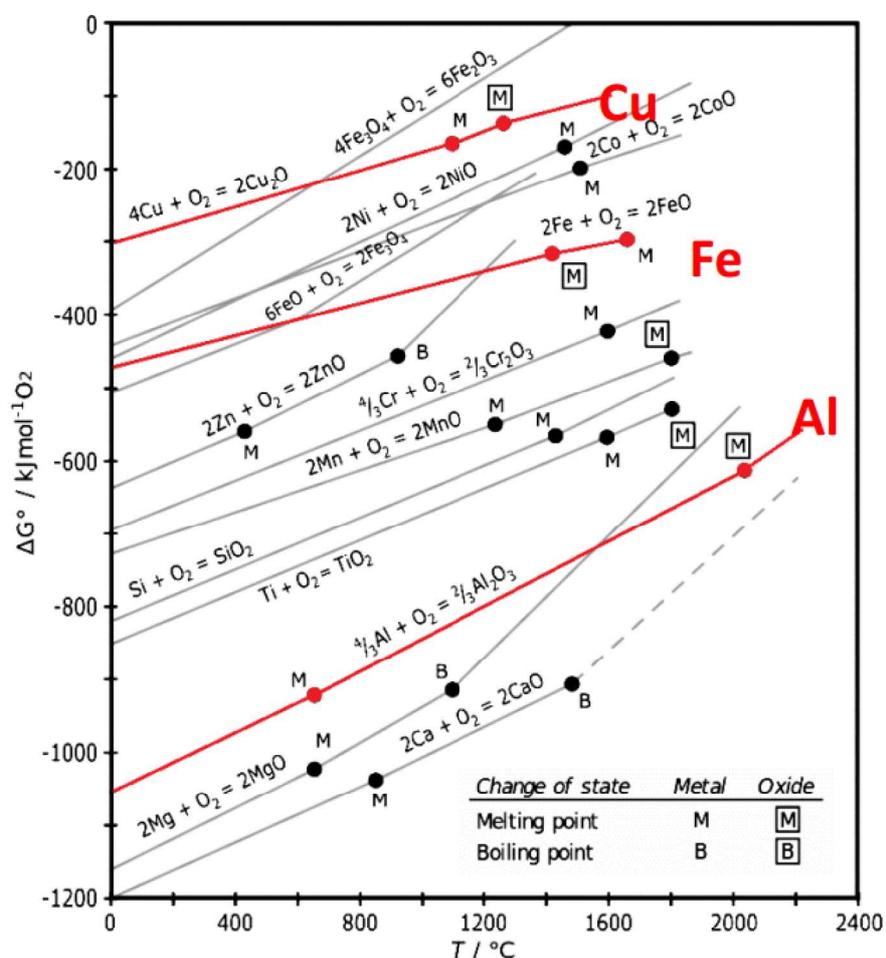
È interessante notare che **maggiore è la produzione, minore è il costo**.

Il **Titanio** viene usato per **applicazioni di nicchia**.

Lo **Zinco** (che non compare) è **poco importante**, viene usato in alcune leghe e nei rivestimenti superficiali.

DIAGRAMMA DI ELLINGHAM

Il diagramma rappresenta l'**energia libera di formazione degli ossidi** (a partire da metallo puro + ossigeno) **in funzione della temperatura**, rispetto allo **stato standard** ($G=0$) (ovvero la variazione di energia libera causata dalle reazioni di ossidazione, con pressione parziale di $O_2 = 1$ atm).



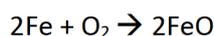
La **variazione di energia libera** è definita come: $\Delta G = G_{\text{prodotti}} - G_{\text{reagenti}}$.

Nel caso delle reazioni rappresentate, ΔG è **sempre negativo**, dunque sono sempre i prodotti (gli ossidi) ad avere energia libera minore --> **la reazione procede spontaneamente verso la formazione degli ossidi**.

Aumentando la **temperatura**, la differenza diminuisce, dunque si tende a spostare la reazione nell'altra direzione (situazione che si verificherebbe per $\Delta G = 0$).

Andamento e pendenza delle rette

Per **esempio**, consideriamo la reazione:



In condizioni standard ($P_{\text{O}_2} = 1 \text{ atm}$) si ottiene una **riduzione di energia libera** $-\Delta G^0$, funzione della temperatura pari a:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

In cui:

- ΔH : varia **poco** con la T.
- ΔS : varia **poco** con la T, dipende principalmente dal numero di moli di gas (più molecole \rightarrow più disordine \rightarrow più entropia).

La **pendenza** della retta è **circa $-\Delta S$** .

Poiché nella reazione si elimina una mole di $\text{O}_2 \rightarrow \Delta S < 0 \rightarrow -\Delta S > 0 \rightarrow$ la **pendenza** del grafico è **positiva** (crescente).

Tale pendenza è **simile per tutte le reazioni** metallo - ossido.

Infatti, se esprimo tutto in funzione di 1 mole di O_2 , ΔS associato alla perdita di una mole di O_2 è circa uguale per tutte le reazioni.

La **pendenza varia** in corrispondenza dei **punti fusione/ebollizione** di metallo/ossido (varia ΔS).

Facilità di riduzione

Se la **curva è più in alto**:

- **Legame con O meno forte** (minore $|\Delta G|$ necessaria per invertire la reazione)
- È **più facile ridurre** (ottenere l'elemento puro dall'ossido)

Infatti, storicamente (in rosso nella figura):

- Età del rame: 6000 a.C.
- Età del ferro: 1200 a.C.
- Riduzione dell'Alluminio: 1825-1886 d.C.

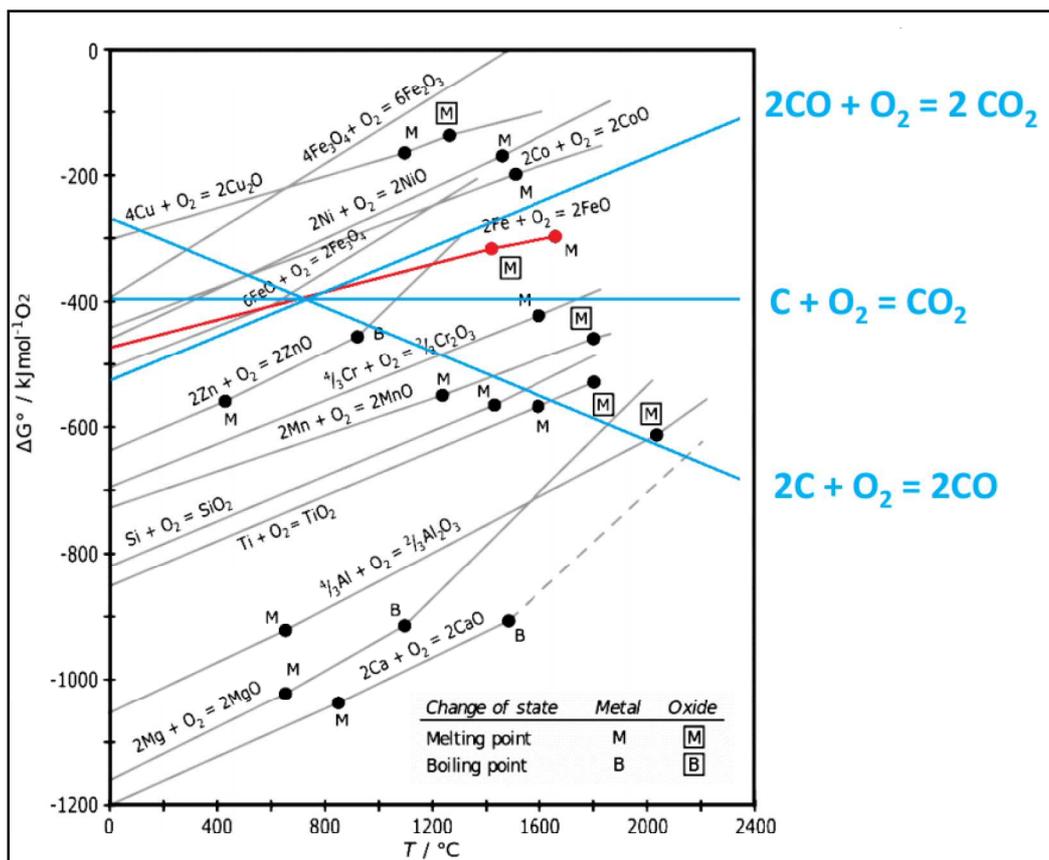
Ossidazione del carbonio

Consideriamo ora sul diagramma anche **le 3 reazioni di ossidazione del carbonio**.

In questo caso la pressione parziale di **tutti i gas** = 1 atm.

Le 3 reazioni hanno **pendenze diverse**:

1. $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ Stessa quantità di gas, $\Delta S \approx 0 \rightarrow$ Pendenza orizzontale
2. $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$ Da 3 a 2 moli di gas, $\Delta S < 0$, $-\Delta S > 0 \rightarrow$ Pendenza crescente (unica reazione con composti in entrambi i membri)
3. $2\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}$ Da 1 a 2 moli di gas, $\Delta S > 0$, $-\Delta S < 0 \rightarrow$ Pendenza decrescente

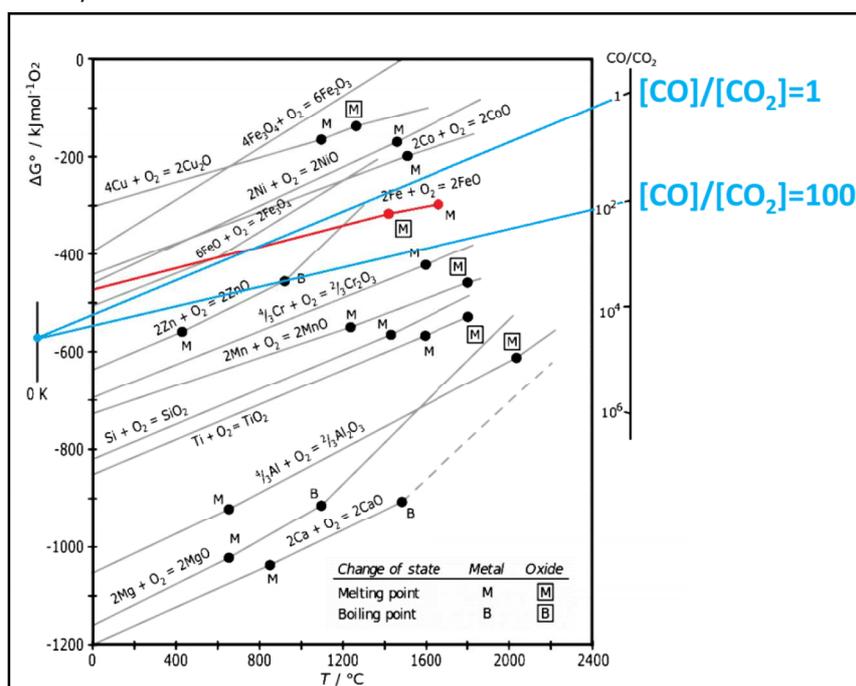


Influenza delle pressioni parziali

Effettuiamo ora una **modifica delle pressioni parziali** dei gas:

$P_{O_2} = 1$ atm pressione standard, ma modifichiamo il rapporto fra le pressioni parziali di CO e CO_2 .

Osserviamo la **variazione di pendenza** della reazione ($2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$): aumentando la pressione parziale di uno dei reagenti la pendenza si abbassa: un aumento della T tende di meno a invertire la reazione (i reagenti sono più stabili).



La **variazione di energia libera dipende infatti (anche) dalle pressioni parziali di prodotti e reagenti.**

Si ha, per la reazione presa in considerazione:

$$\Delta G^0 = costante - 4,6 \cdot R \cdot T \cdot \log_{10} \frac{P_{CO}}{P_{CO2}}$$

Con:

- R = costante dei gas
- P_{CO} e P_{CO2} pressioni parziali

Riduzione del Ferro

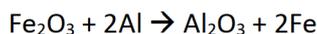
Se si vuole **ridurre l'ossido di Ferro** per ottenere Ferro puro (restituire gli elettroni al Ferro, slegarlo dall'O), **serve un elemento che si ossidi** (ceda i suoi elettroni, si leghi all'O): deve avvenire un'**ossidoriduzione** (Redox).

È necessario perciò **mettere insieme due reazioni** in modo tale che:

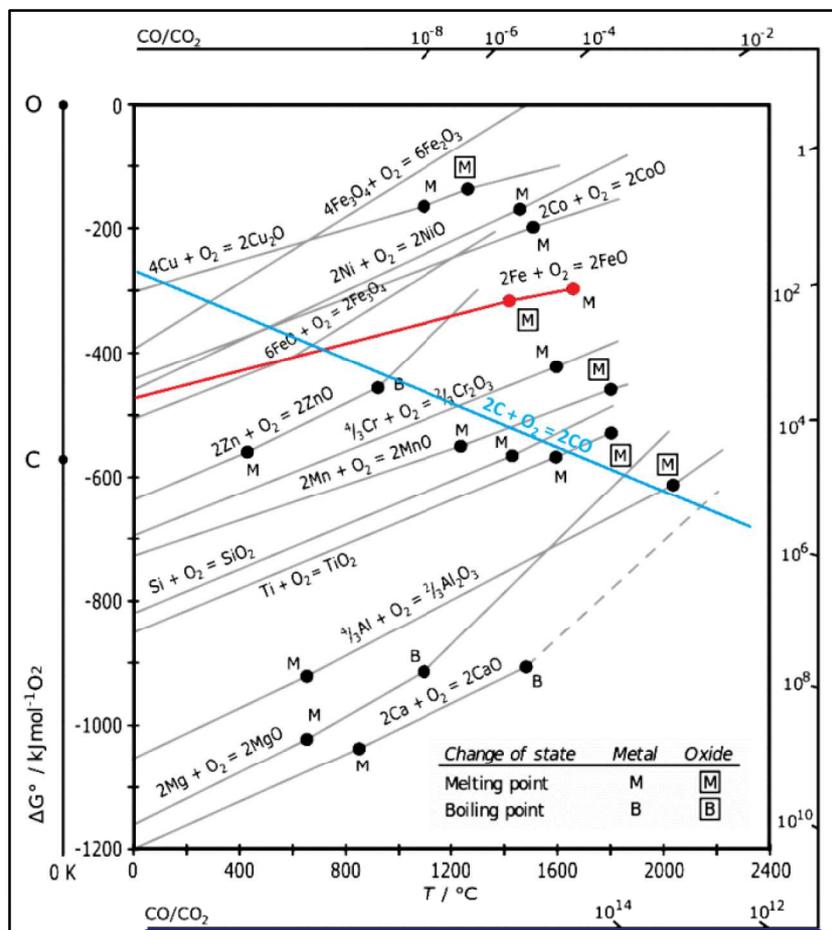
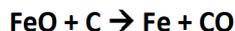
$$\Delta G_{reazione} < 0 \quad \rightarrow \quad G_{prodotti} < G_{reagenti}$$

Ad esempio:

1 – Reazione di **alluminotermia**, usata raramente per ottenere Fe liquido nelle **saldature**, possibile a tutte le T ma più lenta a T ambiente:

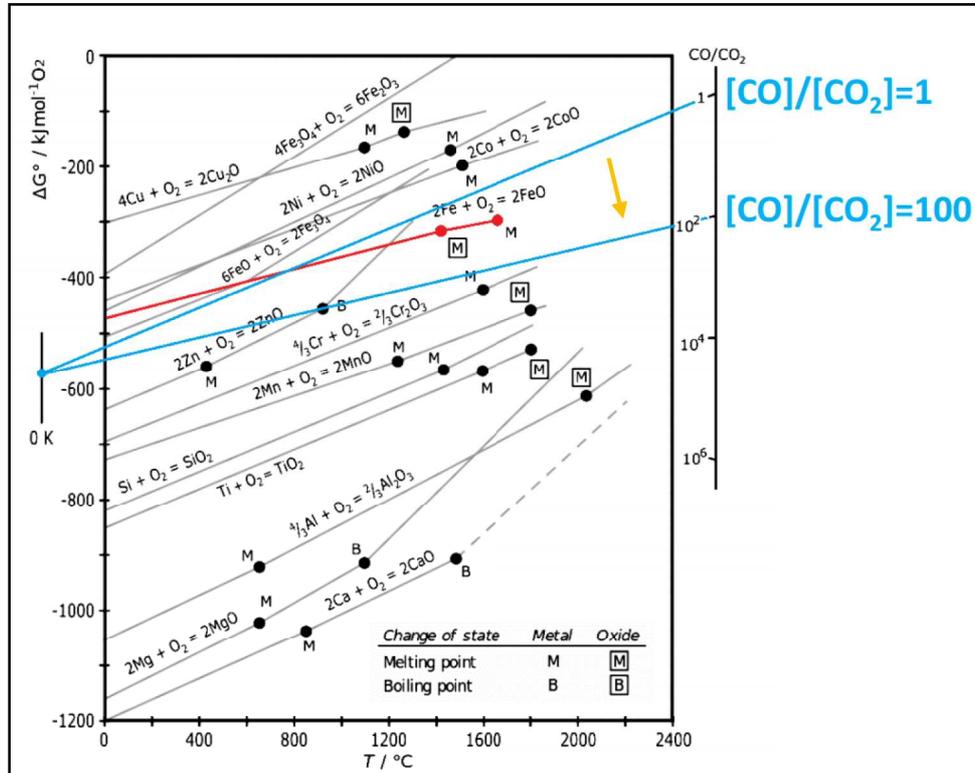


2 – Reazione più utile nella pratica della **produzione di ferro**. Possibile a $T >$ del punto di intersezione fra le due curve:

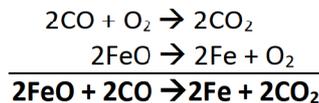


In realtà per la riduzione non si utilizza C solido, ma **CO** e **CO₂** con rapporto **[CO]/[CO₂] >> 1**.

Grazie alla pressione parziale, ΔG di $(2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2)$ diventa più negativo rispetto a ΔG di $(2Fe + O_2 \rightarrow 2FeO)$. Le due rette non si intersecano più, dunque il verso della reazione è indipendente dalla T. Ciò rende conveniente il processo.



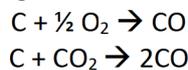
A parità di numero di moli e pressione parziale di O₂, la **reazione principale** usata negli impianti è la seguente:



Nella pratica il **procedimento** è il seguente:

A) Produco/rigenero CO

Il C si ricava da carbone trattato (coke), il CO si genera con le due reazioni:

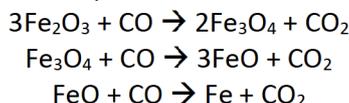


Nella seconda reazione si sfrutta il CO₂ prodotto senza volerlo.

B) Ossido CO e riduco gli ossidi di Ferro

Si parte da **Fe₂O₃ (ematite)** poiché è l'ossido di ferro più diffuso, per **passi successivi** si ottengono altri ossidi fino al **FeO** che viene ridotto a ferro puro.

Nei reagenti c'è sempre il CO, nei prodotti sempre CO₂:



PRODUZIONE DELL'ACCIAIO

Principali processi

Sono possibili due alternative:

1. **Ciclo integrale** (72% produzione mondiale):
 - **Minerali**
 - **Altoforno**: riduzione dell'ossido. Si ottiene ghisa da altoforno, non utilizzabile (troppo C e altri elementi).
 - **Convertitore**: trasformazione della ghisa liquida in acciaio, con eliminazione delle impurezze
2. **Ciclo da rottami**
 - **Rottami**
 - **Forno elettrico ad arco**: non serve ridurre il minerale, i rottami vanno solo rifusi e depurati.

A entrambi i processi seguono sempre:

- **Operazioni fuori forno** (per regolare la composizione)
- **Colata**

Rottami

I rottami sono **facilmente reperibili**, tuttavia possono essere **inquinanti** e presentare **impurezze** difficili (costose) da rimuovere.

I più **comuni** sono: Fe, Al, Ni, Pb, Cu.

L'uso dei rottami ha un **vantaggio ecologico**.

Minerali

I minerali di ferro di **uso comune**, in ordine decrescente di percentuale teorica di Fe, sono i seguenti:

Nome	Comp. chimica	% teorica Fe	Tenore medio Fe nel minerale
Ferro magnetico o magnetite	Fe_3O_4	72,4	45 + 70
Ematite rossa o ferro oligisto	Fe_2O_3	69,9	45 + 60
Ematite bruna o limonite	$2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	59,8	30 + 50
ferro spatico o siderite	FeCO_3	48,2	30 + 40

I minerali vengono preparati con una serie di operazioni e trattamenti.

Operazioni principali:

1. **Frantumazione, macinazione:** per aumentare la **superficie di contatto** e produrre una **pezzatura uniforme** e ottimale per la marcia dell'altoforno.

È necessario:

- **Evitare pezzature grandi:** generano processi incompleti, ghisa con scorie e con S;
- **Evitare pezzature piccole:** provocano discesa irregolare con ostruzioni che bloccano il forno (si formano agglomerati).

2. **Arricchimento** (su minerale frantumato): si depura il minerale del materiale inerte (ganga).

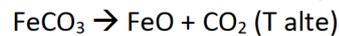
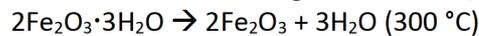
Fatto mediante tecniche magnetiche su minerale magnetico.

Si ottiene:

- **Sfruttamento dei giacimenti più poveri**
- **Riduzione spese** di trasporto
- **Riduzione consumi** di combustibile e di fluidificanti

Trattamenti preliminari (basati su trasformazioni chimico-fisiche per facilitare l'estrazione del metallo):

1. **Essiccamento:** nel caso di elevata umidità.
2. **Calcinazione:** dissociazione dei minerali secondo le seguenti reazioni, è sufficiente il riscaldamento.



3. **Agglomerazione:** recupero del materiale troppo fine, a seconda della pezzatura si distingue in:
 - a. **Sinterizzazione:** per pezzature più grandi, si miscelano le polveri con carbone a T elevate.
 - b. **Pelletizzazione:** per pezzature più fini, si ottengono pezzature di 3 cm.

Altoforno

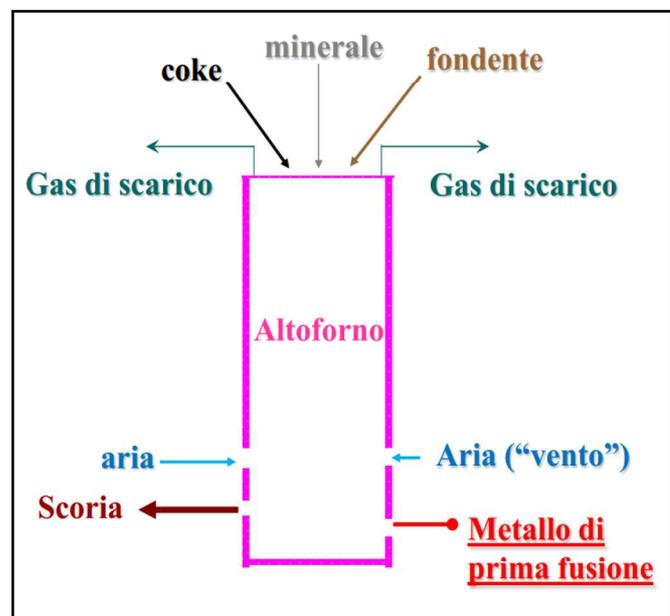
L'altoforno è un **reattore verticale controcorrente**: il **solido cade dall'alto** e fonde nel tragitto, il **gas sale dal basso** verso l'alto.

Si possono distinguere due parti:

1. Parte superiore: reazioni **solido-gas**
2. Parte inferiore: reazioni **liquido-gas**

Dall'alto (con una **tramoggia**) si inseriscono:

- **Minerale**
- **Coke:** prodotto sintetico ottenuto dalla **distillazione** (riscaldamento) **del carbon fossile**, il quale è troppo impuro (S) per essere usato. I sottoprodotti della distillazione sono altamente inquinanti. Ha una certa **resistenza** e **porosità** (utile per la risalita dei gas), funge da **sostegno strutturale** per la colonna, oltre che **fornire il C**.
- **Fondente** (Carbonato di calcio CaCO_3): regola delle **reazioni secondarie**, favorisce la **formazione di scoria** (fa sì che la scoria fonda a T minore e non contenga ferro).



Dal basso viene inserita **aria** ($\text{O}_2 + \text{N}_2$) detta **"vento"**.

Viene **preriscaldata** sui **1000 °C** in altri modi (più economici).

Per risparmiare coke vi si possono aggiungere **polveri di carbonio** o **metano**.

In uscita dalla bocca si hanno i **gas di scarico**: **CO** e **CO₂**: da essi si recupera il "**calore chimico**": si possono bruciare previo filtraggio per preriscaldare l'aria in ingresso.

Sul **fondo** si ha un bagno di **metallo liquido**, **coke solido** e **scoria liquida**, più leggera, che risale in superficie. Si estrae separatamente, periodicamente (ogni qualche ora).

Un altoforno **rimane acceso** per tutta la durata di una "**campagna**" (circa **10 anni**).

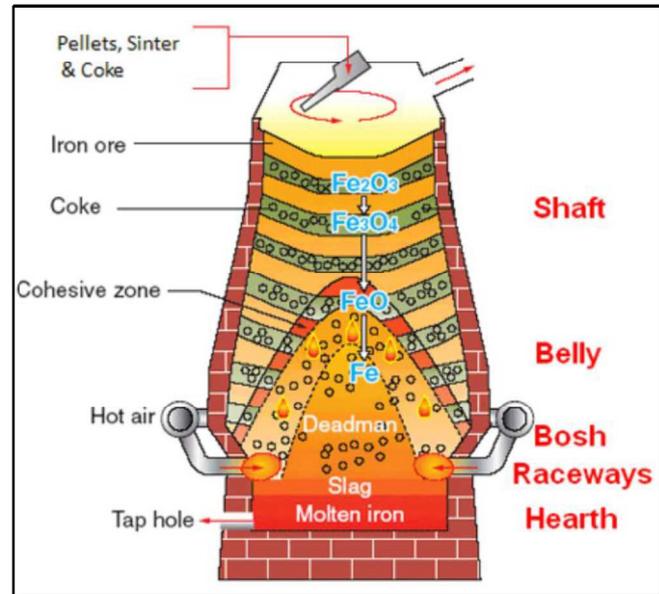
Strutturalmente un altoforno presenta le seguenti caratteristiche:

- **Altezze:** 20-25 metri
- **Diametri:** 10 metri
- **Produzione:** 10'000 t/giorno di metallo
- Scendendo, il forno **si allarga** poiché la carica si dilata con la T, **poi si restringe di nuovo** perché il liquido occupa meno spazio compensando le porosità.
- L'**aria** viene immessa mediante delle **tubiere radiali** presenti nella parte inferiore.

La **carica** avviene a **strati alterni**, per alternare le reazioni e dare sostegno strutturale.

La colonna di materiale è **sorretta dal coke sul fondo** (deadman).

All'interno, le isoterme sono funzione del raggio, il **centro è più caldo**.



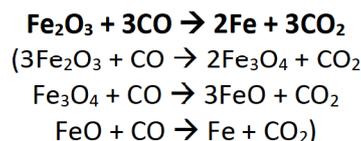
Reazioni nell'altoforno

Riepilogo dei **reagenti** dell'altoforno:

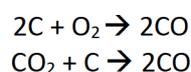
- **Minerali:**
 - Fe₂O₃ (ematite)
 - Fe₃O₄ (magnetite)
 - SiO₂ (silice)
 - Altre impurezze nel minerale
- **Fondente:** CaCO₃
- **Coke:** C, carbone distillato
- **Aria calda:** O₂ + CH₄ + C_{polveri} + ... a T ≈ 1100 °C
- **Refrattario:** Al₂O₃ + SiO₂

Reazioni principali:

- **Riduzione del ferro**, risultato delle reazioni intermedie:



- **Formazione di CO:**



- **Dissociazione dei carbonati e formazione della scoria:**

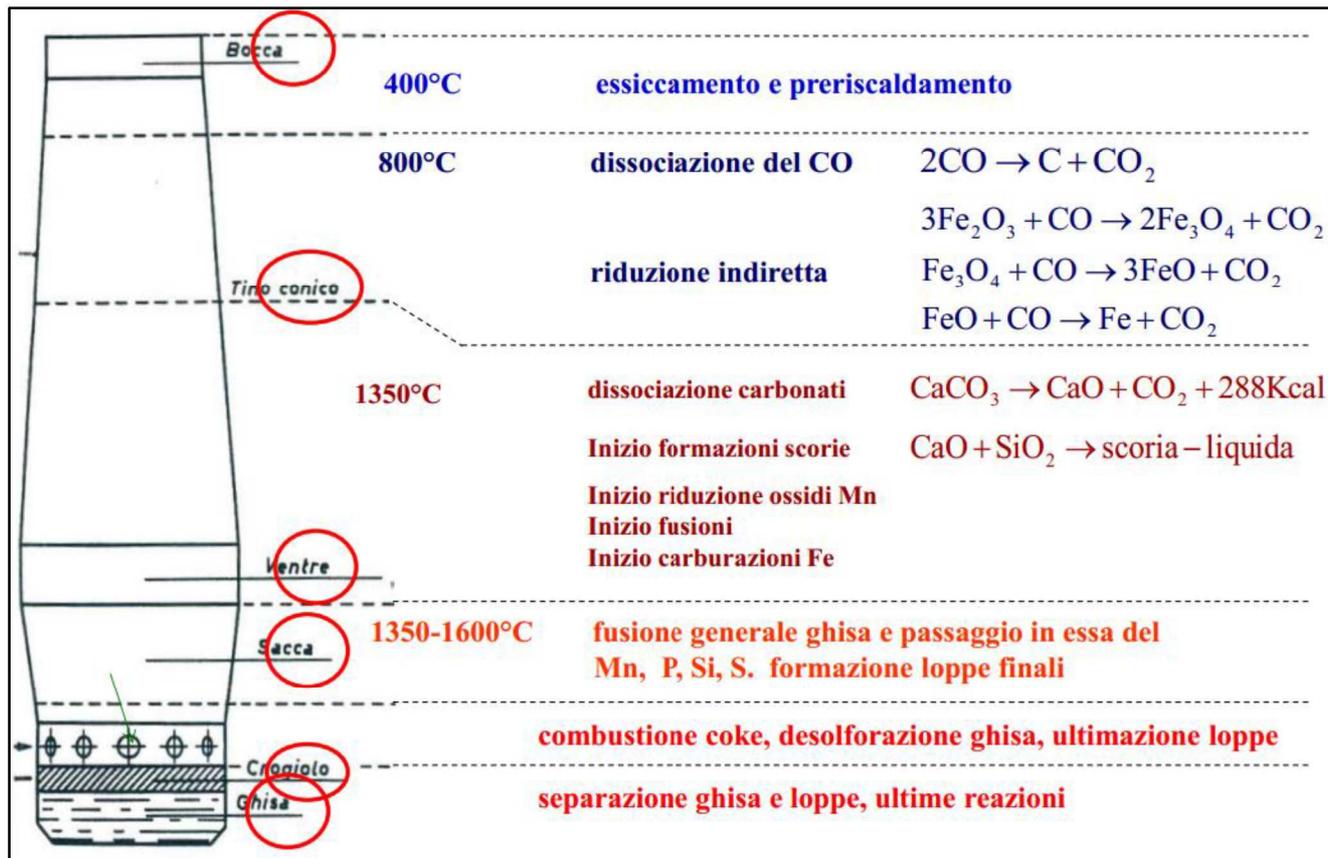


Altre riduzioni, da cui **si ottengono Mn, Si, P puri** dai loro ossidi, i quali finiscono nella ghisa.

Mn è utile, mentre P e Si verranno rimossi:

- $MnO + CO \rightarrow Mn + CO_2$
- $SiO_2 + 2CO \rightarrow Si + 2CO_2$
- $P_2O_5 + 5CO \rightarrow 2P + 5CO_2$
- $FeO + C \rightarrow Fe + CO$
- $SiO_2 + 2C \rightarrow Si + 2CO$
- $H_2O + C \rightarrow CO + H_2$ (in presenza di umidità)

Riepilogando:



Nell'ultima parte del forno, **il ferro si arricchisce di C** che va sottratto.

In definitiva, si ottiene **ghisa da altoforno**, contenente:

- C 3,5 ÷ 4 % (Fe₃C)
- Mn 0,7 ÷ 1,6 %
- Si 0,6 ÷ 1,5 %
- S, P

Il bilancio dell'altoforno è il seguente:

INPUT (7 t)		OUTPUT (7 t)	
Minerale (Fe 50%)	2 t	Ghisa	1 t
Coke	0,4 t	Scoria	0,8 t
CaCO ₃	0,4 t	Gas esausti	5,1 t
Altri combustibili	0,2 t	Polvere	0,1 t
Aria	4 t		