

Capitolo 6 – Esercizi e quesiti

Esercizio 6.1

Iniziare con una breve descrizione della struttura del forno Martin-Siemens e delle camere recuperatrici del calore (rif. cap. 6.3.2), seguita dalla specificazione della carica; successivamente, illustrare la condotta dell'affinazione con le principali reazioni che intervengono nel processo.

Esercizio 6.2

Premettere le differenze esistenti fra processi di conversione ed affinazione, descrivere la struttura del convertitore *L.D.* ed illustrare la condotta del processo di conversione, con particolare riferimento alla formazione della scoria ed alla eliminazione dello zolfo (rif. cap. 6.3.1).

Esercizio 6.3

P350M

Acciaio per impieghi sotto pressione con carico unitario di snervamento $R_e \geq 350 \text{ MPa}$, laminato termomeccanicamente

C40

Acciaio non legato con percentuale di carbonio dello 0.4%

B350

Acciaio in barre per cemento armato con carico unitario di snervamento $R_{eL} \geq 350 \text{ MPa}$

Esercizio 6.4

Iniziare con un accenno sulla carica dell'altoforno, scrivere le principali reazioni con l'indicazione della zona nella quale esse avvengono (rif. cap. 6.2.1) e chiarire le differenze fra riduzione diretta ed indiretta.

Esercizio 6.5

Descrivere la struttura dei recuperatori di calore (rif. cap. 6.2.1), specificarne il funzionamento, mettendo in luce gli effetti sul risparmio energetico e sull'inquinamento ambientale.

Esercizio 6.6

Indicare le materie prime utilizzate per la carica dell'altoforno (rif. cap. 6.2), con particolare riferimento alla scelta dei minerali di ferro da impiegare. Descrivere le modalità con le quali si prepara e si effettua la carica dell'altoforno.

Esercizio 6.7

La quantità in ferro presente in 100 kg di ghisa è data da:

$$m_{Fe} = 100 \cdot (1 - 0.0312 - 0.0152 - 0.0222) = 93.14 \text{ kg}$$

Il minerale, utilizzato per la produzione della ghisa, contiene sia l'ossido ferrico sia quello ferroso in diverse quantità; nell'ossido ferrico la quantità percentuale di ferro è data da:

$$m_{Fe} \% \text{ in } Fe_2O_3 = \frac{2 \cdot 55.847}{2 \cdot 55.847 + 3 \cdot 15.999} \cdot 100 = 69.94\%$$

mentre la quantità percentuale di ferro nell'ossido ferroso è data da:

$$m_{Fe} \% \text{ in } FeO = \frac{55.847}{55.847 + 15.999} \cdot 100 = 77.73\%$$

quindi, la quantità di ferro nel minerale che costituisce la carica sarà:

$$m_{Fe} = 212.7 \cdot (0.5518 \cdot 0.6994 + 0.0848 \cdot 0.7773) = 96.11 \text{ kg}$$

La perdita in ferro nella produzione di 100 kg di ghisa si calcola ora, immediatamente, come differenza fra la quantità di ferro immessa con la carica e quella presente nella ghisa:

$$\text{perdita in } Fe = 96.11 - 93.14 = 2.97 \text{ kg}$$

Tale perdita corrisponde in percentuale a:

$$\Delta m_{Fe} \% = \frac{2.97}{96.11} \cdot 100 = 3.09\%$$

Esercizio 6.8

Indicando con X , Y e Z le quantità in tonnellate delle ferroleghie e dei correttivi, ferro-manganese, ghisa e ferro-cromo, da aggiungere alle 50t di acciaio prodotte con il convertitore *L.D.*, si possono scrivere i bilanci di materia sui tre elementi di alligazione che caratterizzano la composizione dell'acciaio desiderato:

Bilancio di materia

$$\text{C} \quad 0.0004 \cdot 50 + 0.07 \cdot X + 0.042 \cdot Y + 0.025 \cdot Z = 0.0038 \cdot (50 + X + Y + Z)$$

$$\text{Mn} \quad 0.0030 \cdot 50 + 0.75 \cdot X + 0.012 \cdot Y = 0.012 \cdot (50 + X + Y + Z)$$

$$\text{Cr} \quad 0.40 \cdot Z = 0.015 \cdot (50 + X + Y + Z)$$

Esplicitando le 3 equazioni di bilancio, si ha il sistema:

$$\begin{cases} 0.0662 \cdot X + 0.0382 \cdot Y + 0.0212 \cdot Z = 0.17 \\ 0.738 \cdot X - 0.012 \cdot Z = 0.45 \\ -0.015 \cdot X - 0.015 \cdot Y - 0.385 \cdot Z = 0.75 \end{cases}$$

La soluzione di questo sistema di 3 equazioni in 3 incognite può essere trovata con il metodo che si ritiene più opportuno, ad esempio con quello di Kramer:

$$X = \frac{\begin{vmatrix} 0.1700 & 0.0382 & 0.0212 \\ 0.4500 & 0.0000 & -0.0120 \\ 0.7500 & -0.0150 & 0.3850 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 0.0662 & 0.0382 & 0.0212 \\ 0.7380 & 0.0000 & -0.0120 \\ -0.0150 & -0.0150 & 0.3850 \end{vmatrix}} = 0.6432 \text{ t} = 643 \text{ kg}$$

$$Y = \frac{\begin{vmatrix} 0.0662 & 0.1700 & 0.0212 \\ 0.7380 & 0.4500 & -0.0120 \\ -0.0150 & 0.7500 & 0.3850 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 0.0662 & 0.0382 & 0.0212 \\ 0.7380 & 0.0000 & -0.0120 \\ -0.0150 & -0.0150 & 0.3850 \end{vmatrix}} = 2.1931 \text{ t} = 2193 \text{ kg}$$

$$Z = \frac{\begin{vmatrix} 0.0662 & 0.0382 & 0.1700 \\ 0.7380 & 0.0000 & 0.4500 \\ -0.0150 & -0.0150 & 0.7500 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 0.0662 & 0.0382 & 0.0212 \\ 0.7380 & 0.0000 & -0.0120 \\ -0.0150 & -0.0150 & 0.3850 \end{vmatrix}} = 2.0586 \text{ t} = 2059 \text{ kg}$$

Una volta calcolate le quantità in massa di correttivi e ferroleghie da aggiungere all'acciaio prodotto, è opportuno effettuare una verifica, calcolando i tenori dei vari elementi di alligazione nell'acciaio liquido:

$$\%C = \frac{0.0004 \cdot 50000 + 0.07 \cdot 643 + 0.042 \cdot 2193 + 0.025 \cdot 2059}{50000 + 643 + 2193 + 2059} \cdot 100 = 0.38\%$$

$$\%Mn = \frac{0.003 \cdot 50000 + 0.75 \cdot 643 + 0.012 \cdot 2193}{50000 + 643 + 2193 + 2059} \cdot 100 = 1.2\%$$

$$\%Cr = \frac{0.4 \cdot 2059}{50000 + 643 + 2193 + 2059} \cdot 100 = 1.5\%$$

Le verifiche effettuate assicurano la correttezza dell'impostazione e della soluzione.

Esercizio 6.9

EN – GJS – 800 – 2

Ghisa grigia sferoidale con resistenza a trazione di $R_m \geq 800 \text{ MPa}$ ed allungamento dopo rottura del 2%

EN – GJL – 250

Ghisa grigia lamellare con resistenza a trazione di $R_m \geq 250 \text{ MPa}$

EN – GJMB – 450 – 6

Ghisa malleabile a cuore nero con resistenza a trazione di $R_m \geq 450 \text{ MPa}$ ed allungamento dopo rottura del 6%

EN – GJMW – 450 – 7

Ghisa malleabile a cuore bianco con resistenza a trazione di rottura $R_m \geq 450 \text{ MPa}$ ed allungamento dopo rottura del 7%

Esercizio 6.10

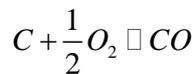
L'indice di marcia di un altoforno è il rapporto in volume fra ossido di carbonio (CO) ed anidride carbonica (CO_2); ricordando che i rapporti in volume corrispondono anche ai rapporti in moli, essendo la produzione oraria di ghisa pari a 120t, la quantità di coke necessaria per la riduzione degli ossidi sarà:

$$m_{coke} = 0.250 \cdot 120000 = 30000 \text{ kg}$$

corrispondenti a:

$$moli_{coke} = \frac{30000}{12.011} = 2497.7 \text{ kmol}$$

Esse devono reagire con l'ossigeno secondo le due reazioni:



Poiché deve aversi:

$$IM = \frac{CO}{CO_2} = 2$$

ovvero, la quantità di ossido di carbonio deve essere doppia di quella dell'anidride carbonica, per cui un terzo del carbonio deve reagire con l'ossigeno per formare anidride carbonica e due terzi devono reagire per formare ossido di carbonio, quindi si formeranno:

$$moli_{CO_2} = \frac{1}{3} \cdot 2497.7 = 832.57 \text{ kmol}$$

e

$$moli_{CO} = \frac{2}{3} \cdot 2497.7 = 1665.13 \text{ kmol}$$

La quantità di ossigeno necessaria per le due reazioni sarà:

$$832.57 \text{ kmol di } O_2 \text{ per la formazione di } CO_2$$

e

$$\frac{1665.13}{2} = 832.57 \text{ kmol di } O_2 \text{ per la formazione di } CO$$

In totale occorrono 1665.14 kmol di O_2 , che corrispondono anche a:

$$m_{O_2} = 1665.14 \cdot 2 \cdot 15.999 = 53281 \text{ kg}$$

D'altro canto, tenendo conto che l'aria è costituita all'incirca per il 21% da ossigeno e per il 79% di azoto, la quantità di azoto sarà:

$$moli_{N_2} = \frac{1665.14}{21} \cdot 79 = 6264.10 \text{ kmol}$$

la cui massa sarà:

$$m_{N_2} = 6264.10 \cdot 2 \cdot 14.006 = 175470 \text{ kg}$$

per una massa totale di aria di:

$$m_{aria} = 53281 + 175470 = 228751 \text{ kg} \approx 229 \text{ th}$$

Esercizio 6.11

L'indice di basicità è definito come il rapporto in massa fra gli ossidi basici e quelli acidi; nel caso in esame esso è dato da:

$$IB = \frac{CaO}{SiO_2}$$

Dovendo essere $IB = 3$ è necessario che la massa di ossido di calcio sia tripla rispetto a quella della silice. Nella carica del convertitore, la silice è presente per il 30% nel minerale che costituisce il 15% dell'intera carica, per cui la quantità di silice sarà:

$$m_{SiO_2} = 80000 \cdot 0.15 \cdot 0.30 = 3600 \text{ kg}$$

Nella ghisa, che forma il 70% della carica, è contenuto l'1% di silicio che corrisponde ad una quantità in massa di:

$$m_{Si} = 80000 \cdot 0.01 \cdot 0.7 = 560 \text{ kg}$$

Tale quantità corrisponde in moli a:

$$\text{moli di Si} = \frac{560}{28.086} = 19.94 \text{ kmol}$$

Poiché nel processo di conversione quasi tutto il silicio viene eliminato dalle reazioni di ossidazione, si ha l'ulteriore formazione di 19.94 kmol di SiO_2 . Una volta calcolato il peso molecolare della silice:

$$p.m._{SiO_2} = 28.086 + 2 \cdot 15.999 = 60.084$$

la quantità di 19.94 kmol di SiO_2 corrisponde ad una massa di silice:

$$m_{Si} = 19.94 \cdot 60.084 = 1198 \text{ kg}$$

Si ottiene, in tal modo, una quantità totale di silice pari a:

$$m_{SiO_2} = 3600 + 1198 = 4798 \text{ kg}$$

Tenendo conto dell'indice di basicità, la quantità di ossido di calcio deve essere:

$$m_{CaO} = 3 \cdot 4798 = 14394 \text{ kg}$$

Per calcolare, ora, la massa di carbonato di calcio necessaria, bisogna tener conto del peso molecolare dei due composti:

$$p.m._{CaO} = 40.080 + 15.999 = 56.079$$

per cui le moli di ossido di calcio necessarie sono:

$$\text{moli di CaO} = \frac{14394}{56.079} = 256.67 \text{ kmol}$$

Essendo il peso molecolare del carbonato di calcio:

$$p.m._{CaCO_3} = 40.080 + 12.011 + 3 \cdot 15.999 = 100.09$$

poiché da una mole di carbonato di calcio si ottiene una mole di ossido di calcio, la quantità di carbonato di calcio necessaria sarà:

$$m_{CaCO_3} = 256.67 \cdot 100.09 = 25690 \text{ kg}$$

Esercizio 6.12

Nel caso di uniforme distribuzione di una fase dispersa in una matrice, la frazione volumica coincide con la frazione areale e, quindi, è sufficiente calcolare la frazione volumica occupata dalla fase continua ferritica per rispondere al quesito. Considerando una massa di un chilogrammo di ghisa sferoidale essa è costituita da 36 g di grafite e da 964 g di ferro α , per cui i volumi occupati dalle due fasi saranno:

$$V_{grafite} = \frac{m_{grafite}}{\rho_{grafite}} = \frac{36 \cdot 10^{-3}}{2270} = 1.586 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

e

$$V_{Fe_\alpha} = \frac{m_{Fe_\alpha}}{\rho_{Fe_\alpha}} = \frac{0.964}{7870} = 12.25 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

la frazione volumica del ferro α sarà, quindi:

$$v_{Fe_\alpha} = \frac{12.25 \cdot 10^{-5}}{12.25 \cdot 10^{-5} + 1.586 \cdot 10^{-5}} \cdot 100 = 88.54\%$$

che coincide con la frazione resistente.

Esercizio 6.13

Il peso molecolare della siderite, $FeCO_3$, risulta essere:

$$p.m._{FeCO_3} = 55.847 + 12.011 + 3 \cdot 15.999 = 115.855$$

per cui la percentuale del ferro presente nella siderite $FeCO_3$ risulta:

$$\% \text{ di ferro} = \frac{55.847}{115.855} = 0.482 = 48.20\%$$

Il peso molecolare dell'ematite, Fe_2O_3 , risulta essere:

$$p.m._{Fe_2O_3} = 2 \cdot 55.847 + 3 \cdot 15.999 = 159.691$$

per cui la percentuale del ferro presente nell'ematite Fe_2O_3 risulta:

$$\% \text{ di ferro} = \frac{2 \cdot 55.847}{159.691} = 0.699 = 69.94\%$$

Il peso molecolare della magnetite Fe_3O_4 risulta essere:

$$p.m._{Fe_3O_4} = 3 \cdot 55.847 + 4 \cdot 15.999 = 231.537$$

per cui la percentuale del ferro presente nella magnetite Fe_3O_4 risulta:

$$\% \text{ di ferro} = \frac{3 \cdot 55.847}{231.537} = 0.724 = 72.36\%$$

Infine, si calcola la quantità di ferro presente in 2 kg di ematite:

$$m_{Fe} = 0.6994 \cdot 2000 = 1399 \text{ g}$$

Esercizio 6.14

Ritenendo la densità dell'acciaio pari a quella del ferro, non essendo fornita la composizione, un pezzo di massa 15kg avrà un volume di:

$$V_{\text{acciaio}} = \frac{m_{\text{acciaio}}}{\rho_{\text{acciaio}}} = \frac{15}{7870} = 1.906 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

La massa volumica della lega $G - AlCu4$, costituita da alluminio con il 4% di rame, avrà una densità:

$$\rho_{G-AlCu4} = 0.96 \cdot 2700 + 0.04 \cdot 8930 = 2949.2 \text{ kgm}^3$$

per cui la massa del particolare in lega di alluminio sarà:

$$m_{G-AlCu4} = \rho_{G-AlCu4} \cdot V_{G-AlCu4} = 2949.2 \cdot 1.906 \cdot 10^{-3} = 5.621 \text{ kg}$$

con una riduzione percentuale di peso pari a:

$$\Delta P\% = \frac{15 - 5.621}{15} \cdot 100 = 62.5\%$$

Esercizio 6.15

La quantità oraria di aria necessaria per le reazioni di combustione all'interno dell'altoforno è:

$$m_{aria} = \frac{3 \cdot 10^6}{24} \cdot 2 = 2.5 \cdot 10^5 \text{ kgh}$$

Il peso molecolare medio dell'aria (21% di ossigeno e 79% di azoto) è dato da:

$$p.m._{aria} = 0.21 \cdot (2 \cdot 15.999) + 0.79 \cdot (2 \cdot 14.006) = 28.85$$

per cui, la portata oraria in moli di aria è:

$$moli_{aria} = \frac{2.5 \cdot 10^5}{28.85} = 8666 \text{ kmol/h}$$

Considerando l'aria un gas ideale, una chilomole in condizioni standard di temperatura e pressione (0°C e 1atm) occupa un volume di 22.42m³, la portata oraria volumetrica alla pressione di 1atm, tenendo anche conto della legge di Boyle-Mariotte per i gas ideali, è:

$$V_{aria} = \frac{8666 \cdot 22.42}{2.5} = 77717 \text{ m}^3/\text{h}$$

Questa portata si distribuisce uniformemente nei 24 ugelli di sezione totale:

$$S_{ugelli} = 24 \cdot \frac{\pi \cdot 0.250^2}{4} = 1.178 \text{ m}^2$$

per cui la velocità dell'aria in uscita dalle tubiere è:

$$v_{aria} = \frac{77717}{1.178} = 65974 \text{ m/h} = 18.33 \text{ m/s}$$

Esercizio 6.16

EN – GJMW – 350 – 4

Ghisa malleabile a cuore bianco con resistenza a trazione $R_m \geq 800 \text{ MPa}$ ed allungamento dopo rottura del 2%

EN – GJMB – 500 – 5

Ghisa malleabile a cuore nero con resistenza a trazione $R_m \geq 500 \text{ MPa}$ ed allungamento dopo rottura del 5%

EN – GJL – 350

Ghisa grigia lamellare con resistenza a trazione $R_m \geq 450 \text{ MPa}$

EN – GJS – 400 – 18

Ghisa sferoidale con resistenza a trazione $R_m \geq 400 \text{ MPa}$ ed allungamento dopo rottura del 18%

Esercizio 6.17

La quantità di ferro presente in 100t di ghisa è data da:

$$m_{Fe} = 100 \cdot (1 - 0.038 - 0.008 - 0.015) = 93.90t$$

Il minerale, utilizzato per la produzione della ghisa, contiene sia l'ossido ferrico sia quello ferroso in diverse quantità; nell'ossido ferrico la quantità di ferro è data da:

$$m_{Fe} \text{ in } Fe_2O_3 = \frac{2 \cdot 55.847}{2 \cdot 55.847 + 3 \cdot 15.999} \cdot 100 = 69.94\%$$

mentre la quantità percentuale di ferro nell'ossido ferroso è data da:

$$m_{Fe} \text{ in } FeO = \frac{55.847}{55.847 + 15.999} \cdot 100 = 77.73\%$$

quindi, la quantità di ferro nel minerale che costituisce la carica sarà:

$$m_{Fe} = 218 \cdot (0.523 \cdot 0.6994 + 0.108 \cdot 0.7773) = 98.04t$$

La perdita in ferro nella produzione di 100t/h di ghisa si calcola ora come differenza fra la quantità di ferro immessa e quella presente nella ghisa:

$$perdita \text{ in } Fe = 98.04 - 93.90 = 4.14t/h$$

Tale perdita corrisponde in percentuale a:

$$\Delta m_{Fe} \% = \frac{4.14}{98.04} \cdot 100 = 4.22\%$$

Esercizio 6.18

<i>E355K2</i>	Acciaio per cemento armato con carico unitario di snervamento $R_e \geq 355 \text{ MPa}$ e resilienza di 40J alla temperatura di -20°C
<i>C40Cr</i>	Acciaio non legato con lo 0.4% di carbonio con l'aggiunta intenzionale di cromo
<i>X10CrNi18-8</i>	Acciaio legato con lo 0.1% di carbonio, il 18% di cromo e l'8% di nichel
<i>X150CrMo12</i>	Acciaio legato con l'1.5% di carbonio, il 12% di cromo e tenore inferiore di molibdeno

Esercizio 6.19

Indicando con X , Y e Z le quantità in tonnellate delle ferroleghie e dei correttivi, ferro-manganese, ghisa e ferro-cromo, da aggiungere alle 60t di acciaio prodotte con il convertitore *L.D.*, si possono scrivere i bilanci di materia sui tre elementi di alligazione che caratterizzano la composizione dell'acciaio desiderato:

Bilancio di materia

$$\text{C} \quad 0.0012 \cdot 60 + 0.065 \cdot X + 0.038 \cdot Y + 0.035 \cdot Z = 0.0035 \cdot (60 + X + Y + Z)$$

$$\text{Mn} \quad 0.0080 \cdot 60 + 0.72 \cdot X + 0.013 \cdot Y = 0.011 \cdot (60 + X + Y + Z)$$

$$\text{Cr} \quad 0.45 \cdot Z = 0.0125 \cdot (60 + X + Y + Z)$$

Esplicitando le 3 equazioni di bilancio, si ha il sistema:

$$\begin{cases} 0.0615 \cdot X + 0.0345 \cdot Y + 0.0315 \cdot Z = 0.138 \\ 0.709 \cdot X - 0.002 \cdot Z = 0.18 \\ -0.0125 \cdot X - 0.0125 \cdot Y + 0.4375 \cdot Z = 0.75 \end{cases}$$

La soluzione di questo sistema di 3 equazioni in 3 incognite può essere trovata con il metodo che si ritiene più opportuno, ad esempio con quello di Kramer:

$$X = \frac{\begin{vmatrix} 0.1380 & 0.0345 & 0.0315 \\ 0.1800 & 0.0000 & -0.0020 \\ 0.7500 & -0.0125 & 0.4375 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 0.0615 & 0.0345 & 0.0315 \\ 0.7090 & 0.0000 & -0.0020 \\ -0.0125 & -0.0125 & 0.4375 \end{vmatrix}} = 0.2589 \text{ t} = 259 \text{ kg}$$

$$Y = \frac{\begin{vmatrix} 0.0615 & 0.1380 & 0.0315 \\ 0.7090 & 0.1800 & -0.0020 \\ -0.0125 & 0.7500 & 0.4375 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 0.0615 & 0.0345 & 0.0315 \\ 0.7090 & 0.0000 & -0.0020 \\ -0.0125 & -0.0125 & 0.4375 \end{vmatrix}} = 1.9165 \text{ t} = 1917 \text{ kg}$$

$$Z = \frac{\begin{vmatrix} 0.0615 & 0.0345 & 0.1380 \\ 0.7090 & 0.0000 & 0.1800 \\ -0.0125 & -0.0125 & 0.7500 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 0.0615 & 0.0345 & 0.0315 \\ 0.7090 & 0.0000 & -0.0020 \\ -0.0125 & -0.0125 & 0.4375 \end{vmatrix}} = 1.7764 \text{ t} = 1776 \text{ kg}$$

Una volta calcolate le quantità in massa di correttivi e ferroleghie da aggiungere all'acciaio prodotto, è opportuno effettuare una verifica, calcolando i tenori dei vari elementi di alligazione nell'acciaio liquido:

$$\%C = \frac{0.0012 \cdot 60 + 0.065 \cdot 0.2589 + 0.038 \cdot 1.9165 + 0.035 \cdot 1.7764}{60 + 0.2589 + 1.9165 + 1.7764} \cdot 100 = 0.35\%$$

$$\%Mn = \frac{0.008 \cdot 60 + 0.72 \cdot 0.2589 + 0.013 \cdot 1.9165}{60 + 0.2589 + 1.9165 + 1.7764} \cdot 100 = 1.08\%$$

$$\%Cr = \frac{0.45 \cdot 1.7764}{60 + 0.2589 + 1.9165 + 1.7764} \cdot 100 = 1.25\%$$

Le verifiche effettuate assicurano la correttezza dell'impostazione e della soluzione.