



ESCÓRIA DE ALTO FORNO

Na literatura técnica = Ground-granulated blast-furnace slag (GGBS ou GGBF-S)



A Escória de Alto Forno é obtida na fabricação de Ferro Gusa.

A Escória de Aciaria é obtida na fabricação de Aço.



Vista do Alto Forno 1 - ArcelorMittal Tubarão/BR -2010

http://www.cst.com.br/produtos/co_produtos/catalogo_produtos/escoria_forno/index.asp

“

A fabricação de ferro gusa se realiza em unidades industriais chamadas Altos-Fornos, nas quais se reduzem os óxidos contidos nos minerais de ferro e se separam as impurezas que os acompanham.

As **escórias** se formam pela fusão das impurezas do minério de ferro, juntamente com a adição de fundentes (calcário e dolomita) e as cinzas do coque (carvão mineral).

A **escória fundida** é uma massa que, por sua insolubilidade, e menor densidade, sobrenada no ferro gusa e é conduzida por canais, até o lugar de resfriamento.

A **escória de Alto Forno** é produzida no Alto Forno que produz Ferro Gusa , na proporção de 200 a 300 Kg de escória por tonelada de ferro gusa. ”



FERRO GUSA

“ *O gusa é o produto imediato da redução do minério de ferro, pelo coque ou carvão, e calcário num alto forno. O gusa normalmente contém até 5% de carbono, o que faz com que seja um material quebradiço e sem grande uso direto.*

Geralmente nos processos industriais, o ferro gusa é considerado como uma liga de ferro e carbono, contendo de 4 a 4,5% de carbono e outros elementos ditos residuais como por exemplo: silício, manganês, fósforo e enxofre, dentre outros.

O gusa é vertido diretamente a partir do cadinho do alto forno para contentores para formar lingotes, ou usado diretamente no estado líquido em aciarias. Os lingotes são então usados para produzir ferro fundido e aço, ao extrair-se o carbono em excesso.

O Brasil se destaca como o maior produtor mundial de ferro gusa a partir de carvão vegetal. Minas Gerais é o Estado com maior número de produtores, destacando as cidades de Itaúna, Sete Lagoas e Divinópolis como principais polos produtores.

Normalmente, o aço é fabricado a partir de carbono e óxido de ferro, no alto forno. Nesta fase se produz o chamado ferro gusa, que contém um excesso de carbono e impurezas como silício (que torna o aço quebradiço), fósforo e enxofre (que facilitam a oxidação).”

Prof. Elson Longo, da UFSCar

GUSA

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Gusa>



FABRICAÇÃO DE FERRO GUSA NO ALTO FORNO.

Thomaz Seilnacht – Chemielexicon <http://www.seilnacht.com/Lexikon/hochofen.html>

Hochofenprozess und Stahlherstellung (*Funcionamento do Alto forno e fabricação do Aço*)

MATÉRIA PRIMA PARA CARREGAMENTO DO ALTO FORNO

Minérios de ferro



Hematita preta $\equiv \text{Fe}_2\text{O}_3$



Hematita vermelha $\equiv \text{Fe}_2\text{O}_3$



Magnetita $\equiv \text{Fe}_3\text{O}_4$



Limonita $\equiv \text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

O minério de ferro é pré-transformado em pelotas
(*pellets*) para carregar o alto forno.



Também carregam o alto forno : coque e calcário



Coque = Carbono **C**

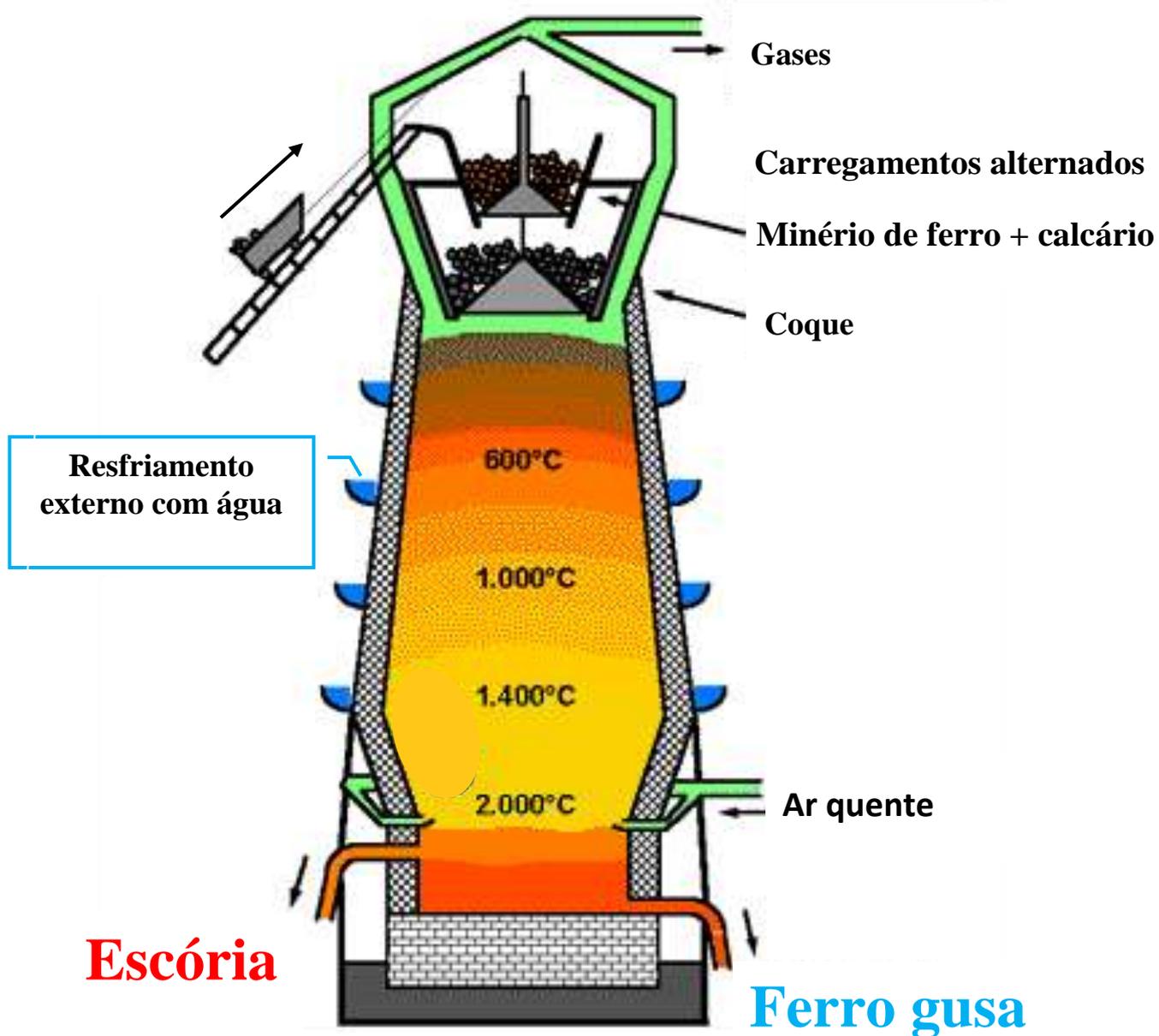


Calcário = $\text{Ca} \cdot \text{CO}_3$



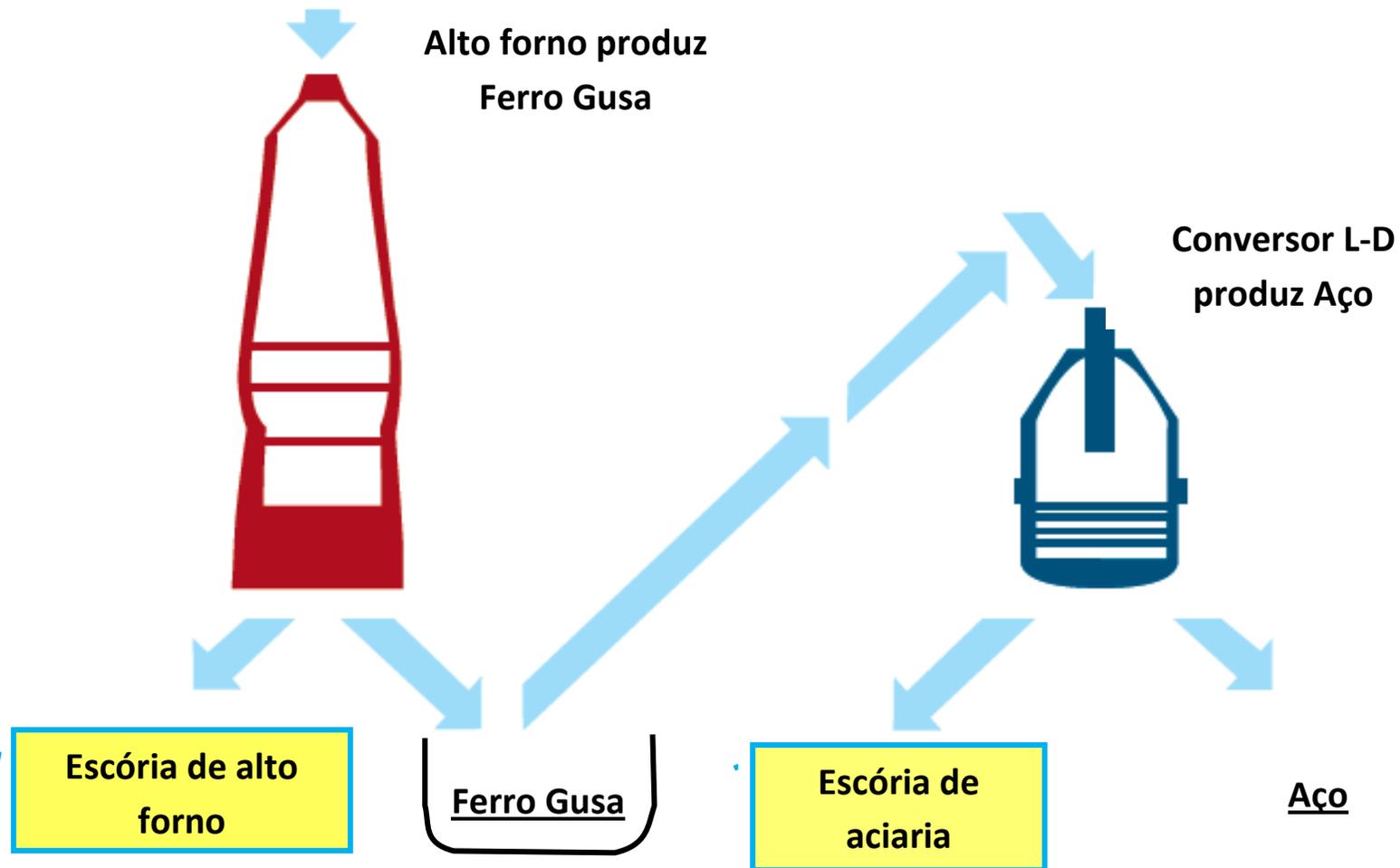
Alto forno - Thomas Seilnacht – Chemielexicon

<http://www.seilnacht.com/Lexikon/hochofen.html>





PRODUÇÃO DA ESCÓRIA DE ALTO FORNO E DA ESCÓRIA DE ACIARIA



O Ferro Gusa produzido no alto forno é usado para produzir Aço no conversor L-D



CONVERSOR L-D para fabrico do aço.

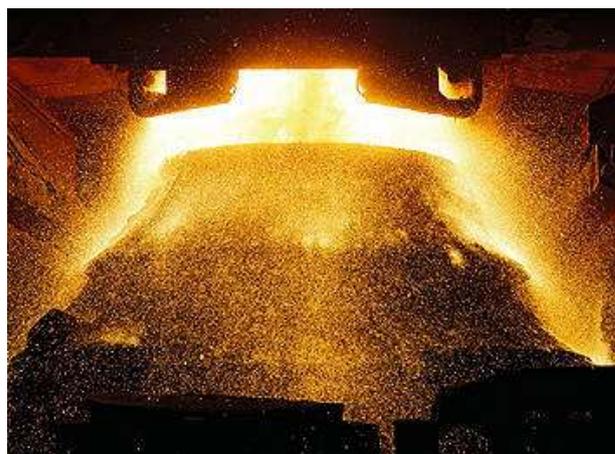
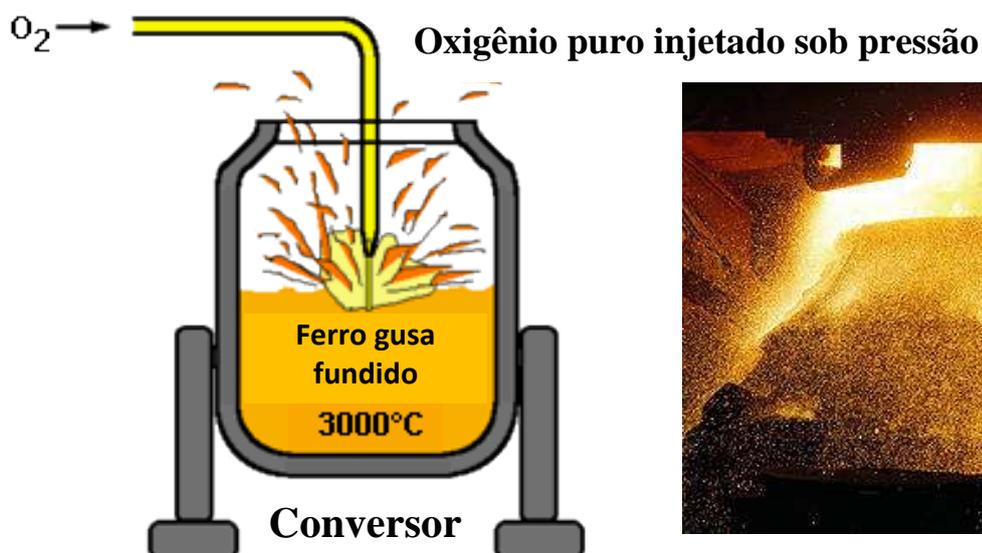
Thomaz Seilnacht – Chemie Lexicon

<http://www.seilnacht.com/Lexikon/hochofen.html>

Hochofenprozess und Stahlherstellung (Alto forno e fabricação do aço)

O ferro gusa formado no alto forno é lançado, a seguir, no conversor.

Um jato de oxigênio puro retira o excesso de carbono existente no ferro gusa.



O conversor recebe 70% de ferro gusa fundido (*com muito carbono C*) e 30% sucata de aço. A temperatura atinge $T=3000^{\circ}\text{C}$.

A capacidade de um conversor é de 400 toneladas.

O Oxigênio Puro é injetado durante cerca de 20 minutos.

Formam-se :

o **aço** (baixo teor de carbono C) , a escória de aciaria, e CO_2 (gás) ↑.



ESCÓRIA DE ALTO FORNO



Escória de Alto Forno (onde é produzido Ferro Gusa com ~ 5% de carbono)
e
Escória de Aciaria (onde é produzido Aço).



Escórias de alto forno e lavas vulcânicas são semelhantes.



Lava vulcânica natural



Escória de alto forno



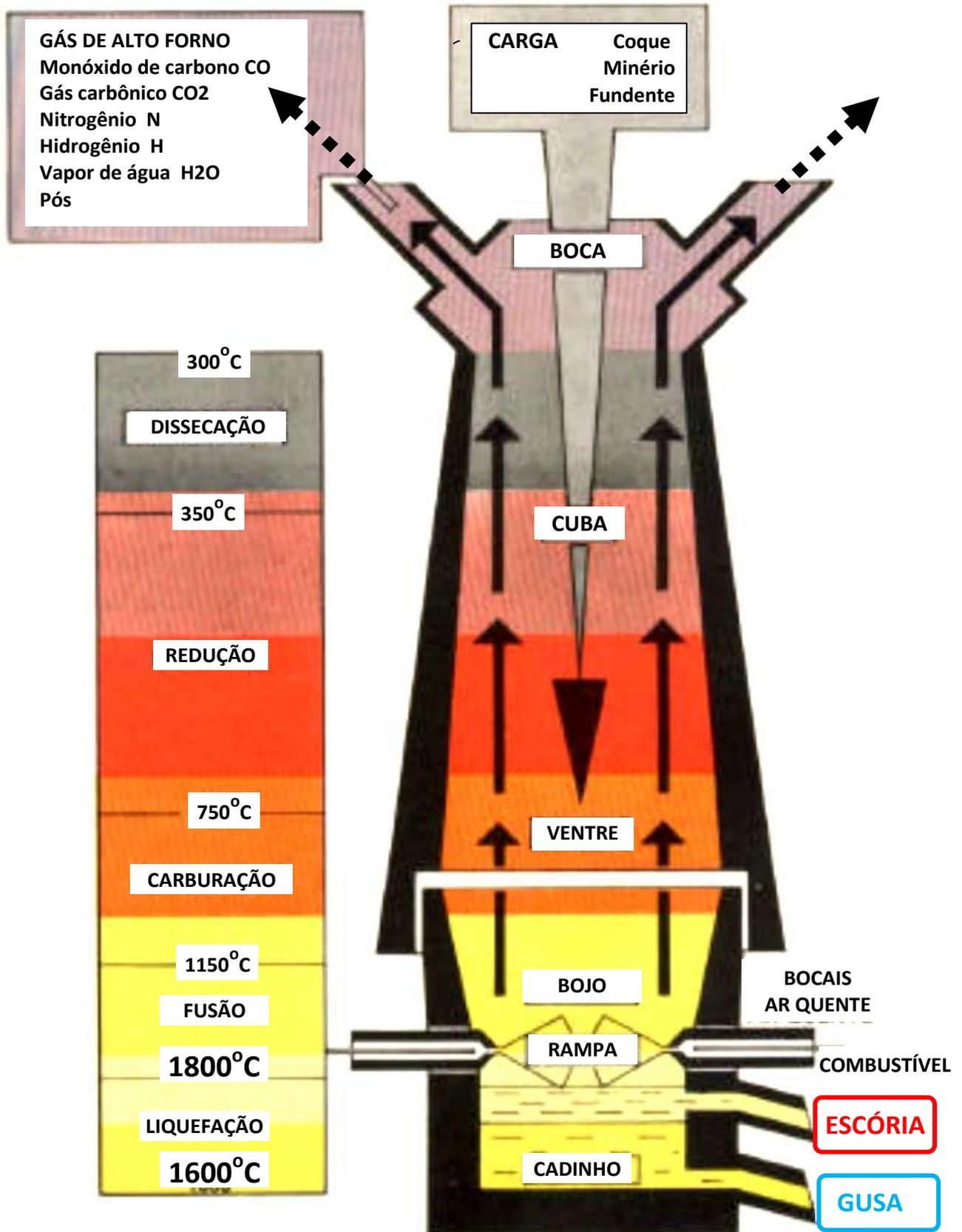
Na montagem de fotos acima:

O que é Escória de Alto Forno e o que é Lava Vulcânica natural?

“ Was ist künstliche Hochofenschlacke und was ist natürliche Lava? ”

Andreas Ehrenberg, Beton-Informationen 4 · 2006

<http://www.beton-informationen.de/downloads/1-2006-04-01.pdf>



Os alto-fornos modernos têm cerca de trinta metros de altura.

<http://www.eletrica.ufpr.br/piazza/materiais/FabricioDzierva.pdf>



Gusa sólida (com ~5%de carbono)



Escória granulada

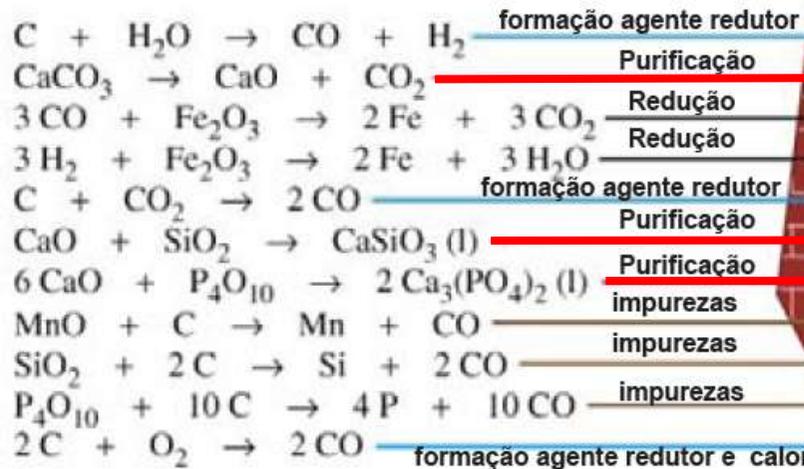
*A escória bem granulada é essencialmente amorfa
“Amorfa” significa não cristalina.*



Produto Ferro Gusa

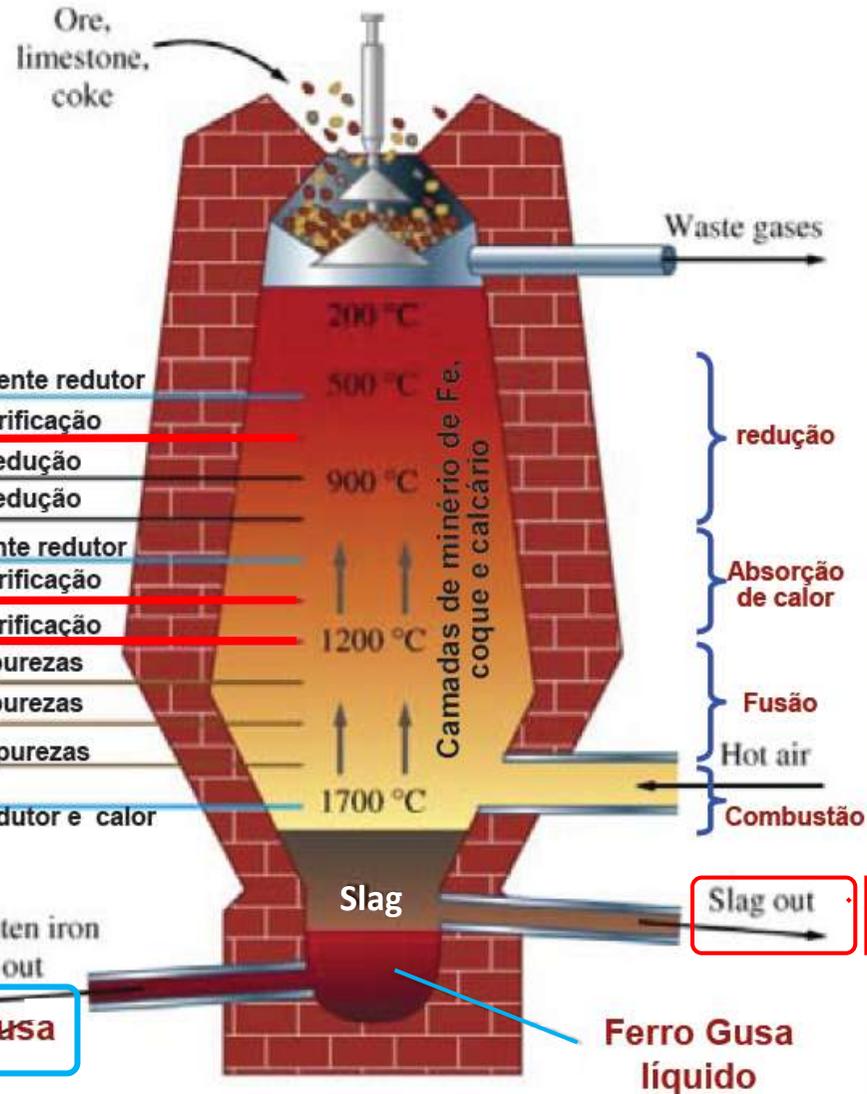
Composição:

~92% Fe,
3 a 4% C,
0,5 a 3% Si,
0,25 a 2,5% Mn,
0,04 a 2% P,
e traças de S.



Key:

- Formation of reducing agents
- Reduction of iron oxide
- Slag formation
- Impurity source



ESCÓRIA

Ferro Gusa

Ferro Gusa líquido

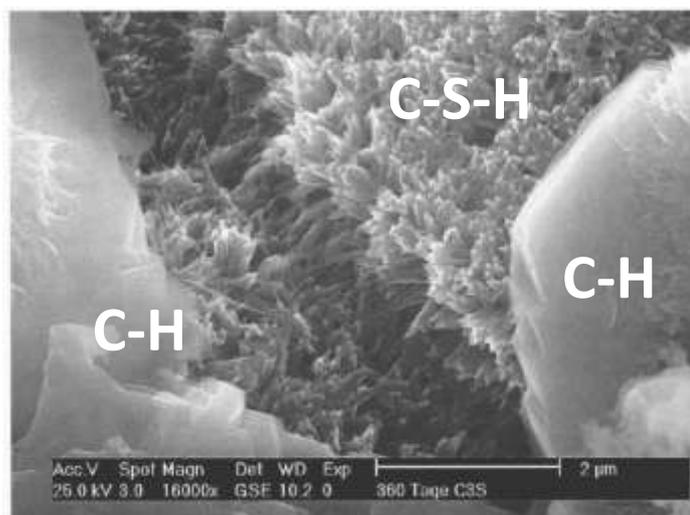


Composição química das Escórias de Alto-Forno

Óxido	Escória de Alto Forno <i>AcelorTubarão/BR</i> %	Escória de Alto Forno <i>segundo</i> <i>Andreas Ehrenberg</i> %		Clinker do cimento Portland <i>segundo Holdercim</i> %
	Brasil	Alemanha	Europa	Brasil
FeO	0,45	0,48	0,57	2 - 5
SiO ₂	33,65	36,4	36,8	16 – 26
Al ₂ O ₃	12,42	11,8	11,2	4 - 8
CaO	41,60	39.2	39,4	59 - 67
MgO	7,95	8,9	8,8	0,8 - 6,5
TiO	0,73	0,91	0,93	-
SO ₃	-	-	-	0,5 – 1,2
Na ₂ O	-	-	-	0 – 1,5
K ₂ O	-	-	-	0 – 1,5

A Escória de Alto Forno contém pouco Cálcio, CaO, e, por isso, é pouco reativa e precisa ser misturada ao clínquer do cimento Portland, para reagir com o Ca(OH)₂ que é formado pela dissolução, na água, do CaO do cimento Portland.

Formam-se os mesmos C-S-H e C-H, que se formam na hidratação do clínquer do cimento Portland.



Clinker Portland - C3S hidratado, 360 dias após o início da hidratação.

C-S-H : C= CaO ; S= SiO₂ ; H= H₂O **C-H** = Ca(OH)₂

- Para aumentar a reatividade da escória de alto forno, ela é moída com grãos muito finos, para ter uma maior superfície em contato com a água.



ArcelorMittal Tubarão/BR -2010

http://www.cst.com.br/produtos/co_produtos/catalogo_produtos/escoria_forno/index.asp

As Escórias de Alto-Forno podem ser resfriadas de 2 formas:

1. Esfriada ao ar, fica Cristalizada = Escória Bruta de Alto-Forno



São vazadas em estado líquido em pátios apropriados, onde são resfriadas ao ar.

Por ser um processo lento, os seus componentes formam distintas fases cristalinas, e com isto não adquirem poder de aglomerante hidráulico.

Essa escória recebe o nome de Escória Bruta de Alto-Forno, podendo ser britada ou utilizada como material inerte em diversas aplicações, substituindo materiais pétreos.

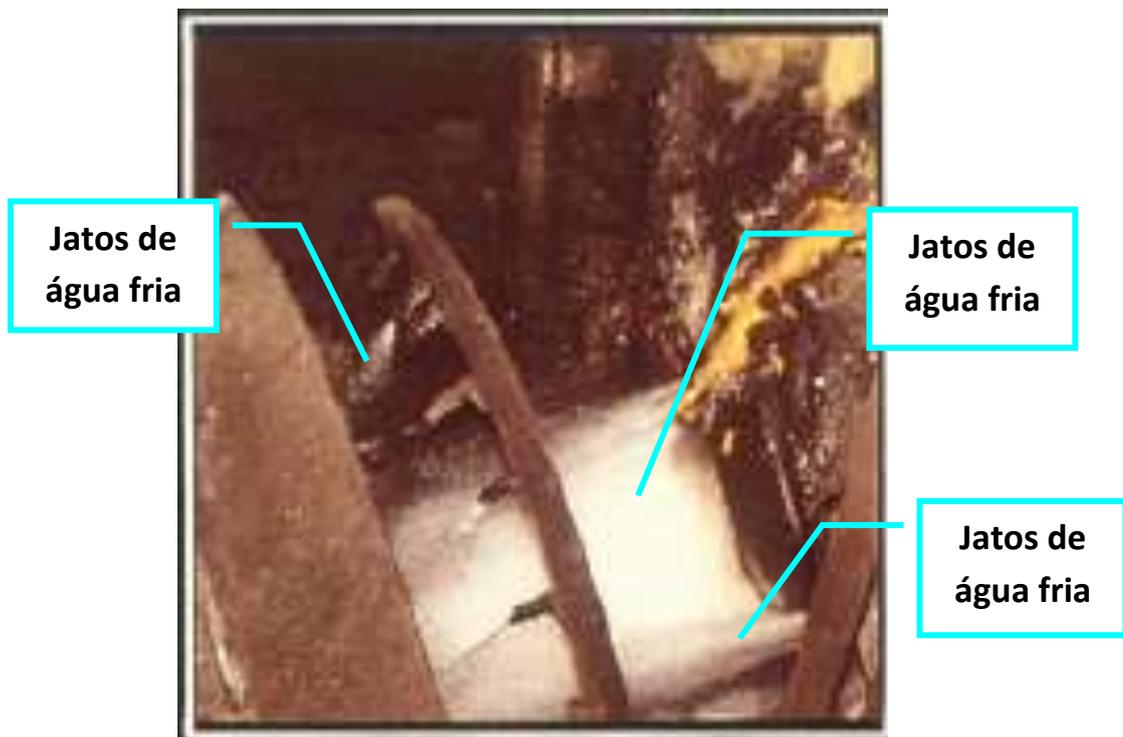


Escória Bruta de Alto-Forno



2. Escória Resfriada rapidamente com Água, é a Escória Granulada

No **Granulador**, jatos de água são usados para o resfriamento rápido da escória fundida .



Granulador, ainda sem a escória. Só com a água.

Escória de Alto Forno

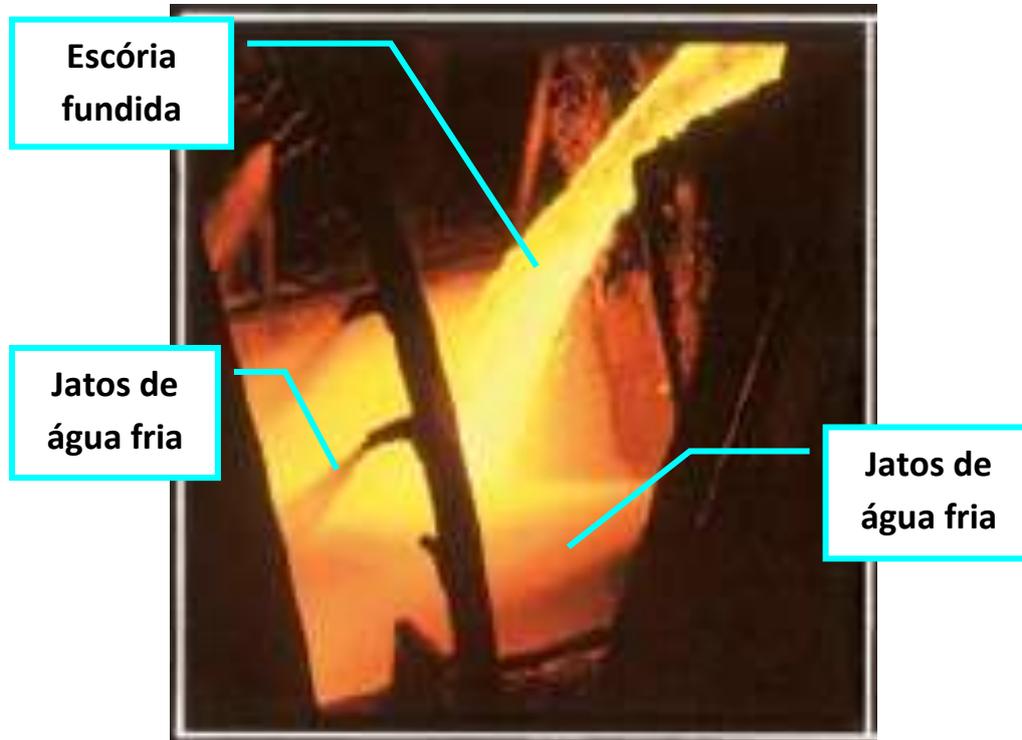
A escória líquida é transportada para os granuladores, que são equipamentos onde ela é resfriada bruscamente por meio de jatos de água sob alta pressão.

Não havendo tempo suficiente para formação de cristais, essa escória se granula, "vitrificando", e recebe o nome de Escória Granulada de Alto-Forno
Na literatura técnica = **Ground-granulated blast-furnace slag (GGBS ou GGBFS)**





No Granulador se forma a escória granulada. Jatos de água fria são usados no resfriamento rápido da escória fundida.



Granulador : Jatos de água durante resfriamento rápido da escória fundida.

A Escória Granulada de Alto-Forno apresenta-se, macroscopicamente, com um aspecto de uma areia grossa, porosa, de fratura vítrea observada com lupa, com um tamanho máximo do grão, de 5 mm.



Fotos do artigo de Andreas Ehrenberg, Beton-Informationen 5 · 2006

<http://www.beton-informationen.de/downloads/1-2006-05-01.pdf>

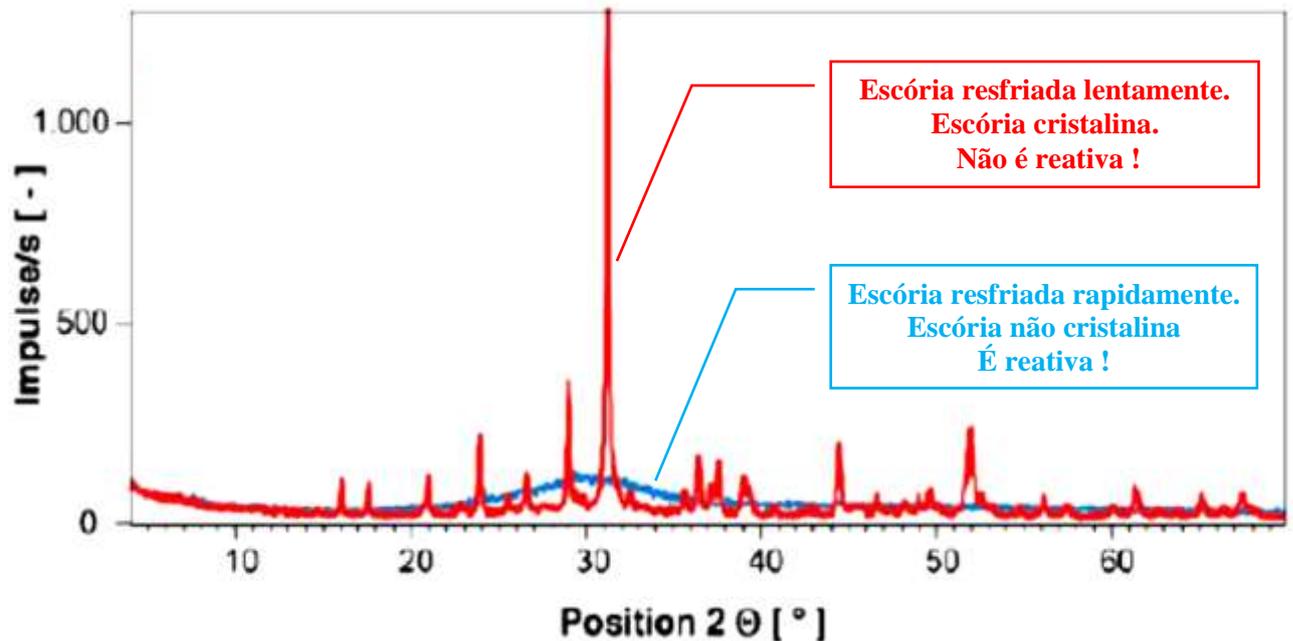
A escória bem granulada é essencialmente amorfa, vítrea.

Nas fotos acima 97% a 100% = vidro (glass).

A palavra amorfa significa que a microestrutura não é cristalina, isto é, não é ordenada em planos paralelos que refratam os raios X .



Espectros de Raio X



Espectros de Raio X de duas Escórias de Alto Forno, com mesma composição química.

- **Escória de Alto Forno, quando é Resfriada Lentamente, é Cristalina. Apresenta espectro de Raio X com picos característicos da microestrutura cristalina. Não é reativa quando em contato com a água, e, por isso, não é usada como aglomerante junto com o cimento. Essa escória é usada como agregado inerte em pavimentação de estradas.**
- **Escória de Alto Forno, quando é Resfriada Rápidamente, é Amorfa. Não é Cristalina e sim Vítrea, e não apresenta picos no espectro de Raio X.**
- **É reativa quando em contato com a água, e, por isso, é usada como aglomerante junto com o cimento.**



Escória granulada (GGBF)



A escória bem granulada é essencialmente amorfa, vítrea.

Segundo a ArcelorMittal (<http://www.arcelormittal.com/br/>) :

“A característica mais importante da Escória Granulada de Alto-Forno é a sua capacidade hidráulica potencial, que permite que, quando moída e em contato com a água, ela endureça (propriedade cimentante), podendo substituir parte do clínquer Portland, na fabricação de cimentos compostos.

O maior mercado para a Escória Granulada de Alto-Forno, é a Construção Civil.

No processo de fabricação de cimento, por exemplo, a Escória Granulada de Alto-Forno é utilizada para substituir parte do clínquer Portland consumido, reduzindo, significativamente, a emissão de CO₂ para a atmosfera durante o processo de produção do clínquer.

Reduz também a exploração de reservas naturais de calcário e argila, matérias-primas do clínquer Portland”



Cimentos com Escória de Alto Forno

- Cimentos com escória de alto forno são o CII-E e o CIII
- O cimento composto CII –E tem na sua composição 6% a 34% de escória granulada de alto forno. Ver [16]
- O cimento de alto forno CP III tem na sua composição 35% a 70% de escória granulada de alto forno. Ver [16]

PCA – Portland Cement Association

- A cor do cimento Portland CP I puro (só clínquer + gesso) é diferente da cor das adições normalmente usadas no concreto.





PCA – Portland Cement Association
Cement Research Library – 2008 Edition

Concrete Information : “Portland , Blended , and Other Hydraulic Cements”



- Os cimentos compostos (clinquer + escória + gesso), como o CPII-E e o CPIII, têm cor intermediária entre a cor escura do clinquer e a cor clara da escória de alto forno.



Cimentos com Escória de Alto Forno

Segundo a ArcelorMittal (<http://www.arcelormittal.com/br/>) :

“A aplicação de Escória Granulada de Alto-Forno pode trazer vantagens, também, para os concretos. Dentre estas vantagens, destacamos :

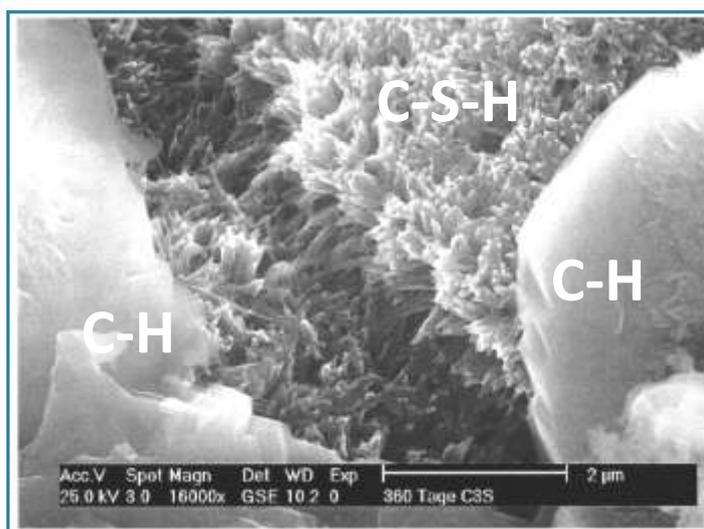
- *Maiores resistências finais e maior durabilidade.*
- *Menor risco de fissuração (baixo calor de hidratação da Escória Granulada de Alto-Forno);*
- *Melhor trabalhabilidade e plasticidade;*
- *Maiores resistências finais: os concretos feitos com cimentos de Alto-Forno tendem a apresentar valores finais de resistência mais elevados, se comparando com concretos produzidos com alguns tipos de cimentos;*
- *Menores porosidade e permeabilidade. Isso favorece a durabilidade;*
- *Contribuição para prevenção de reações álcalis-agregado (ASTM C989 - 97);*
- *Aumento da resistência à corrosão por cloretos e sulfatos (NBR 5737). Todas essas informações são provenientes de ensaios e pesquisas feitas or diversas instituições no Brasil e no Mundo, que comprovam a qualidade da Escória Granulada de Alto-Forno no concreto.”*



Composição química das Escórias de Alto-Forno

Óxido	Escória de Alto Forno AcelorTubarão [12] %	Escória de Alto Forno <i>segundo</i> Andreas Ehrenberg [1] %		Clinker do cimento Portland <i>segundo</i> Holdercim [16] %
	Brasil	Alemanha	Europa	Brasil
FeO	0,45	0,48	0,57	2 - 5
SiO ₂	33,65	36,4	36,8	16 – 26
Al ₂ O ₃	12,42	11,8	11,2	4 - 8
CaO	41,60	39,2	39,4	59 - 67
MgO	7,95	8,9	8,8	0,8 - 6,5
TiO ₂	0,73	0,91	0,93	-
SO ₃	-	-	-	0,5 – 1,2
Na ₂ O	-	-	-	0 – 1,5
K ₂ O	-	-	-	0 – 1,5

A Escória de Alto Forno contém pouco Cálcio, CaO, e por isso é pouco reativa e precisa ser misturada ao *clinker* do cimento Portland para reagir com o Ca(OH)₂ que é formado pela dissolução, na água, do CaO do cimento Portland. Formam-se os mesmos C-S-H e C-H, que se formam na hidratação do *clinker* do cimento Portland.



Clinker Portland - C3S hidratado, 360 dias após o início da hidratação.



- Para aumentar a reatividade da escória de alto forno, ela é moída com grãos muito finos, para ter uma maior superfície em contato com a água.



Composição das escórias de alto forno, segundo Andreas Ehrenberg [1]

<http://www.beton-informationen.de/downloads/1-2006-05-01.pdf>

Alemanha

Analysen glühverlustfrei		Deutschland				Europa (inkl. Deutschland)			
		Mittel	Max.	Min.	n	Mittel	Max.	Min.	n
SiO ₂	M.-%	36,4	41,2	33,5	53	36,8	44,0	30,7	142
Al ₂ O ₃	M.-%	11,8	15,3	10,1	53	11,2	16,4	5,4	142
FeO	M.-%	0,48	0,99	0,21	42	0,57	2,23	0,12	86
TiO ₂	M.-%	0,91	2,45	0,43	42	0,92	3,70	0,07	91
MnO	M.-%	0,30	0,53	0,09	53	0,44	1,41	0,06	142
CaO	M.-%	39,2	42,5	34,6	53	39,4	45,6	30,7	142
MgO	M.-%	8,9	12,4	5,3	53	8,8	17,3	3,5	142
Na ₂ O	M.-%	0,34	0,67	0,13	50	0,38	1,22	0,10	127
K ₂ O	M.-%	0,46	0,96	0,10	53	0,55	1,97	0,10	142
Na ₂ O-Äquiv. *	M.-%	0,64	1,31	0,22	50	0,75	2,04	0,22	127
SO ₃ ²⁻	M.-%	0,10	0,30	0,00	38	0,12	0,41	0,00	80
S ²⁻	M.-%	1,15	1,46	0,68	41	1,04	1,46	0,42	89
Cl ⁻	M.-%	0,02	0,05	0,01	8	0,02	0,06	0,01	24
Unlösliches	M.-%	0,36	1,98	0,09	39	0,47	4,23	0,04	83
Glühverlust	M.-%	0,43	2,01	0,03	42	0,59	4,74	0,03	91
Glasgehalt	Vol.-%	99,0	100,0	95,2	37	94,8	100,0	27,1	84
CaO + MgO + SiO ₂	M.-%	84,6	86,0	80,8	53	85,0	91,9	76,6	142
CaO/SiO ₂	-	1,08	1,27	0,88	53	1,07	1,27	0,87	142
(CaO + MgO)/SiO ₂	-	1,32	1,55	1,08	53	1,32	1,65	1,06	142
F-Wert **	-	1,53	1,73	1,28	41	1,47	1,89	1,13	89

* Na₂O + 0,658·K₂O

** (CaO+0,5·S²⁻+0,5·MgO+Al₂O₃)/(SiO₂+MnO)

Beton-Informationen 5 · 2006

Segundo AcelorTubarão [12]

“ Dependendo das características das Escórias de Alto-Forno, resultantes do tipo de resfriamento e composição química, registram-se várias aplicações para as Escórias de Alto-Forno :

- Bases de estrada;
- Asfalto;
- Aterro / Terraplanagem;
- Agregado para concreto;
- Cimento (grande utilização da Escória de Alto-Forno granulada devido a sua hidraulicidade);
- Aplicações especiais (lastro ferroviário, material para cobertura, isolamento, vidro, filtros, condicionamento de solo e produtos de concreto).

Na ArcelorMittal Tubarão/BR, grande parte da sua produção é de Escória Granulada de Alto-Forno, que encontra um mercado amplo na fabricação de cimento - Construção Civil ”.



Bild 49: Extrem poriger Hüttensand
($\rho_{Roh} = 2,021 \text{ g/cm}^3$)



Bild 51: Typischer Hüttensand
($\rho_{Roh} = 2,490 \text{ g/cm}^3$)



Bild 53: Hüttensandpellets, 1998
($\rho_{Roh} = 2,028 \text{ g/cm}^3$)

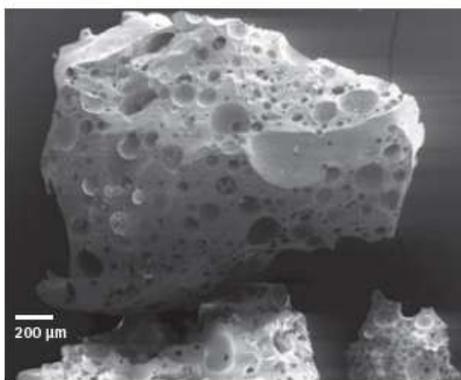


Bild 50: Extrem poriger Hüttensand
($\rho_{Roh} = 2,021 \text{ g/cm}^3$)

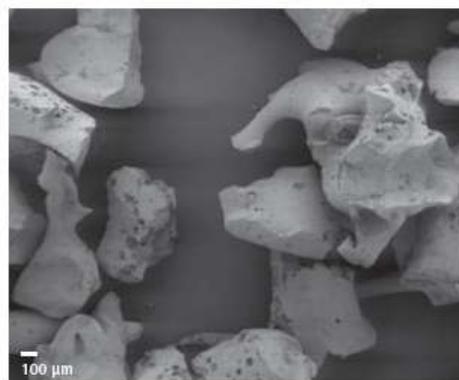


Bild 52: Typischer Hüttensand
($\rho_{Roh} = 2,490 \text{ g/cm}^3$)

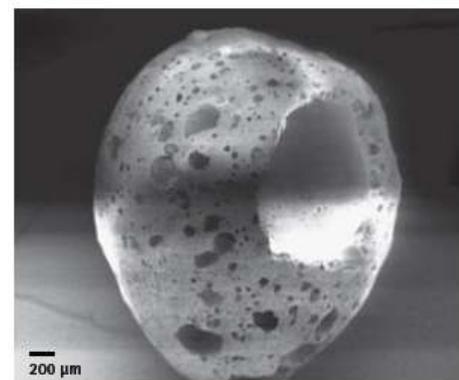


Bild 54: Hüttensandpellet, 1998
($\rho_{Roh} = 2,028 \text{ g/cm}^3$)

A figura mostra diversas escórias, com diferentes massas específicas ($2,021 \text{ g/cm}^3$ a $2,490 \text{ g/cm}^3$). Muitas escórias, por serem muito porosas, têm baixa resistência e não podem ser usadas como agregados.

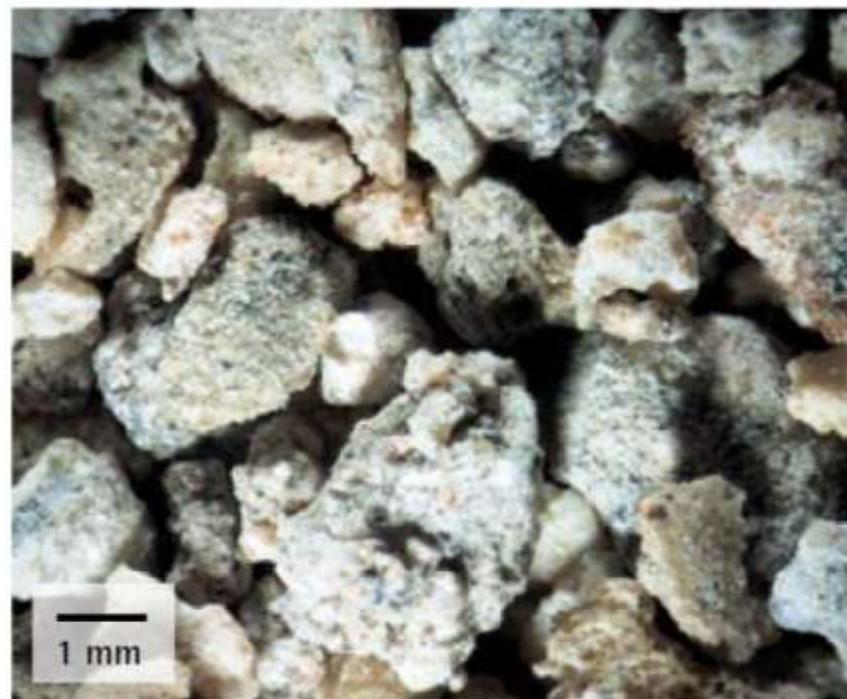


Bild 58: Frischer (links) und 10 Jahre im Freien gelagerter (rechts) Hüttensand

Escória logo após a fabricação.

Escória depois de ficar 10 anos estocada ao ar livre.



Critérios básicos de avaliação das escórias.

Tafel 7: Chemische Bewertungskriterien für Hüttensand (Auswahl), vgl. [198]

Vorschlag/Vorschrift	Jahr	Kriterium	Anforderung
„Einfache“ Basizität	1885 [89]	CaO/SiO_2	> 1
Norm für Eisenportlandzement	1909 [121]	$\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$	≥ 1
Norm für Hochofenzement	1917 [122]	$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \frac{1}{3} \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \frac{2}{3} \text{Al}_2\text{O}_3}$	> 1
DIN 1164	1932	$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \frac{1}{3} \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \frac{2}{3} \text{Al}_2\text{O}_3}$	≥ 1
bei Hochofenzement:		MnO	$\leq 5 \text{ M.-%}$
DIN 1164	1942	$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$	≥ 1
F-Wert nach Keil	1942 [176]	$\frac{\text{CaO} + \text{CaS} + 0,5 \cdot \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \text{MnO}}$	$> 1,5$
F-Wert nach Sopora	1959 [212]	$\frac{\text{CaO} + \text{CaS} + 0,5 \cdot \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \text{MnO}^2}$	$> 1,5$
Basizität nach Schwiete	1963 [219]	$\frac{\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 - 10}{\text{SiO}_2 + 10}$	-
DIN 1164-1	1994	$\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$	> 1
DIN EN 197-1	2001 [94]		
prEN 15167	2006 [131]	$\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2$	$> 2/3$

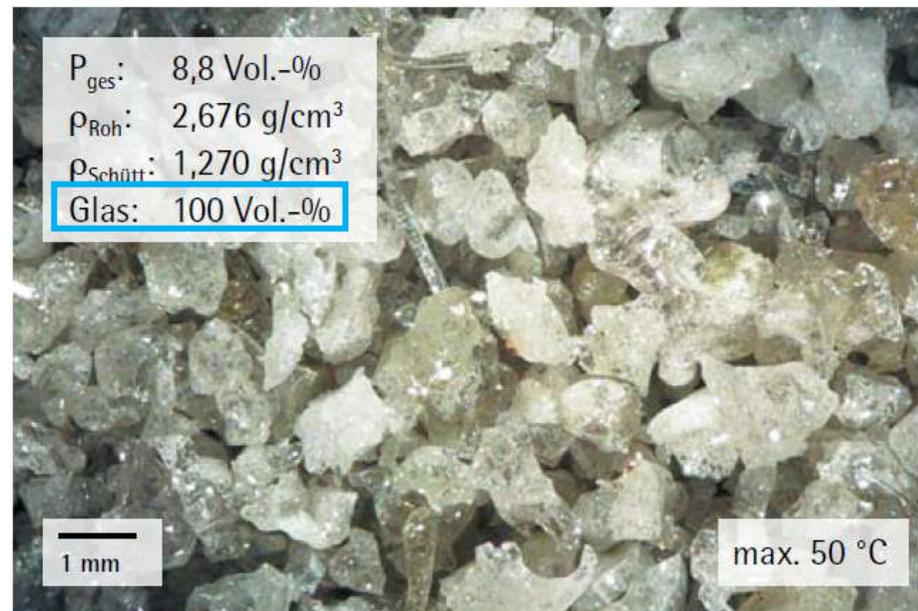
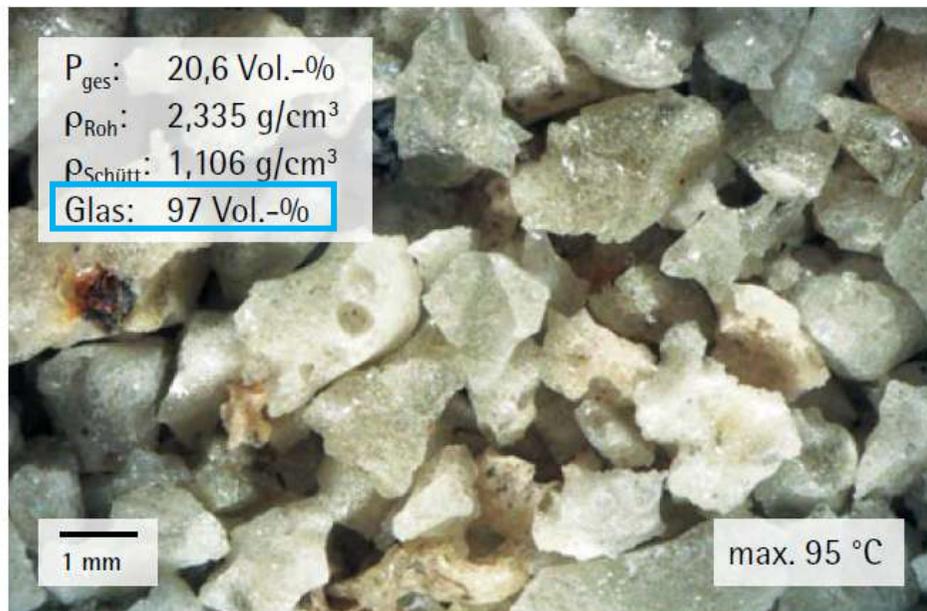


Bild 78: Wirkung verschiedener Granulationswassertemperaturen auf die Hüttensandeigenschaften bei gleicher chemischer Zusammensetzung

Efeito da temperatura da água usada no resfriamento rápido da escória.

À esquerda T=95°C → 97% vidro (glass).

À direita T=50°C → 100 % vidro (glass).

Quanto mais baixa a temperatura da água no granulador, mais vidro se forma na escória e mais reativa ela será.

<http://www.beton-informationen.de/downloads/1-2006-05-01.pdf>



ANEXOS



ANEXO 01

GIOVANNI FELICE SALIERNO - SISTEMA DE MONITORAMENTO DO DESEMPENHO DOS ALTOS-FORNOS A CARVÃO VEGETAL

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção de Grau em Engenheiro de Controle e Automação. - Orientador: Prof. Dr Ronilson Rocha

<http://www.em.ufop.br/cecau/monografias/2007/GIOVANNI%20SALIERNO.pdf>

Referência : ARAÚJO, LUIZ A. , Manual de Siderurgia, São Paulo: Editora Arte & Ciência, 1997. Volume 2.

2.2 Produção de ferro gusa em altos-fornos a carvão vegetal

O alto-forno é um reator térmico no qual a carga sólida é descendente e os gases redutores ascendentes. É um equipamento contínuo e seu funcionamento é ininterrupto por anos. É destinado à produção de ferro gusa, matéria prima do aço.

O ferro gusa é o produto obtido a partir da redução de óxidos de ferro através dos elementos redutores (dióxido de carbono - CO_2 , e gás hidrogênio - H_2). Este produto têm em sua composição de 90 a 95% de ferro e 3,0 a 4,5% de carbono e alguns elementos de liga (ARAÚJO, 1997).



O ferro reduzido absorve carbono, é fundido e escorre para o cadinho na parte inferior do forno. O fluxo combina-se com as impurezas do minério e com as cinzas do carvão e forma uma escória que sobrenada o metal líquido do cadinho. Em períodos de tempo determinados o ferro-gusa, e a escória do alto-forno são vazados do cadinho pela casa de corrida.

No alto-forno, o gusa é produzido no estado líquido a uma temperatura de aproximadamente 1.500°C, após este processo ele passa pela aciaria, onde passa por purificações e tratamentos para adiquir determinadas características e passar a se denominar aço (ARAÚJO, 1997).

A escória é obtida pela fusão e separação das impurezas das matérias-primas e dos fundentes. É constituída principalmente de óxidos termodinamicamente muito estáveis como MgO, CaO, Al₂O₃ e SiO₂ (óxido de magnésio, cal virgem, alumina e sílica, respectivamente) (ARAÚJO, 1997).

Na figura 1 mostra-se um fluxograma dos principais processos para a obtenção de ferro gusa e aço.

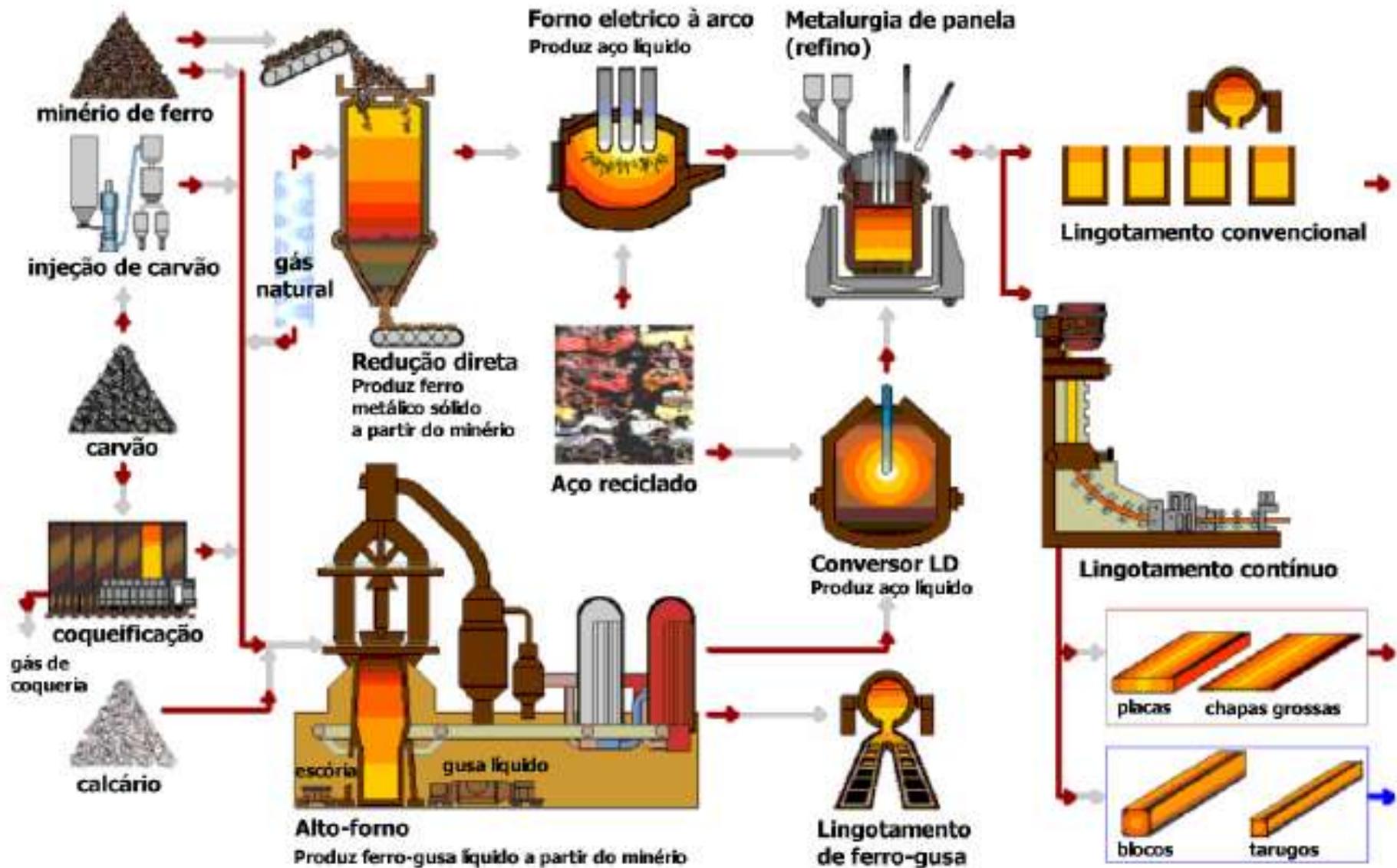


FIGURA 1



A estrutura do alto-forno é dividida em topo, cuba, ventre, rampa e cadinho, como segue na figura 2 um desenho esquemático do alto-forno.

O topo é a parte superior do alto-forno, por onde a carga é carregada e por onde os gases são coletados para serem conduzidos ao sistema de limpeza.

A cuba é a região que compreende a maior porção corpo do forno. Nessa região ocorrem as principais reações gás/sólido de redução.

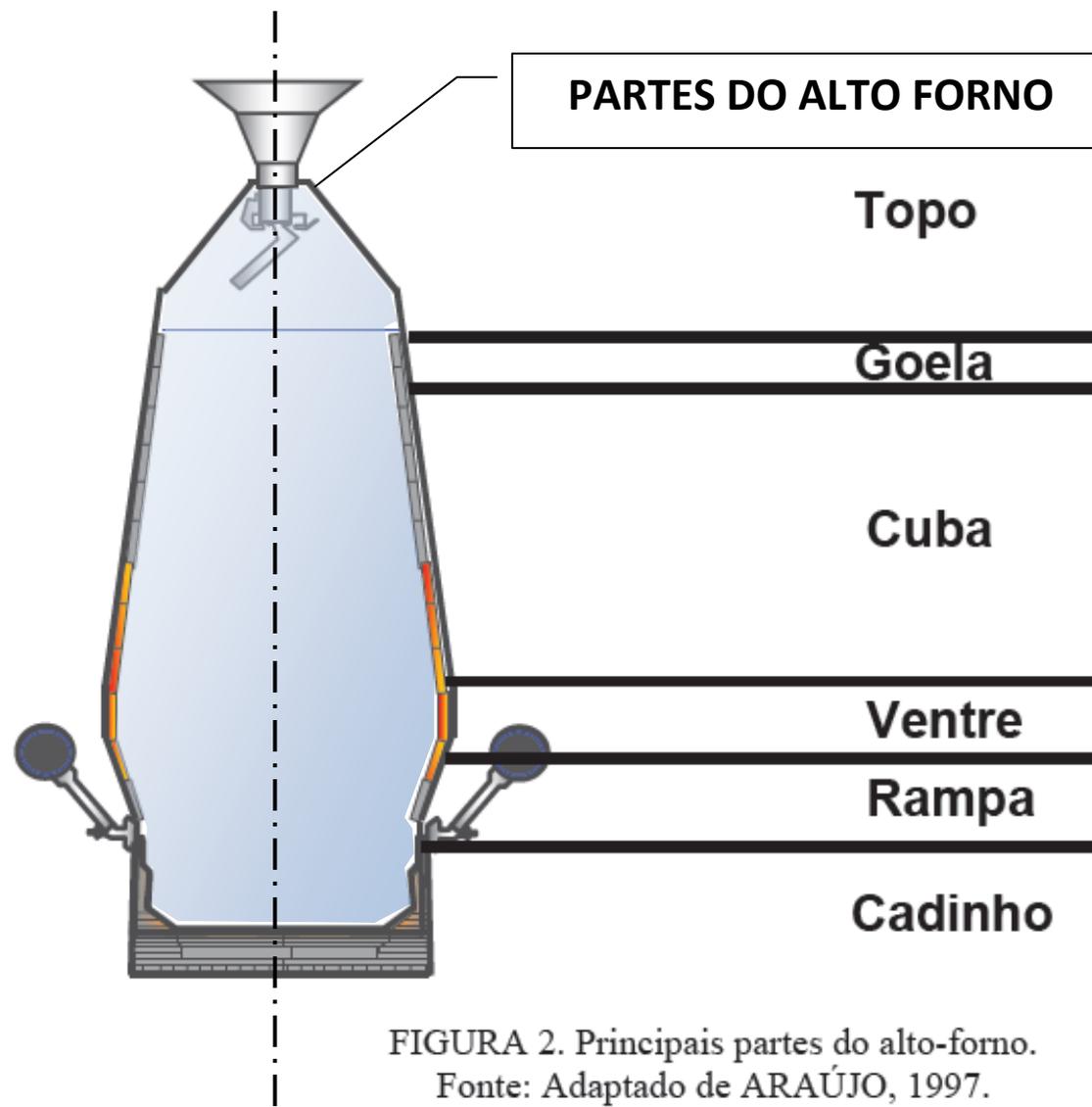
Ventre é a região acima da rampa, onde os gases se expandem e se distribuem através da zona de coesão.



A rampa é a região imediatamente acima das ventaneiras, onde se tem a combustão do carvão e a zona de coesão. O seu formato ajuda na sustentação da carga no interior do forno.

O cadinho é a região inferior do alto-forno onde o material líquido (gusa e escória) é armazenado antes de ser vazado. Tem-se a presença de líquidos, sólidos e gases, com a ocorrência de algumas reações. No cadinho, o gusa e a escória se separam por diferença de densidade (ARAÚJO, 1997).

O ar soprado pelas ventaneiras reage com o carvão gerando o gás redutor CO e calor. Na região mais inferior do alto-forno, os gases à temperatura de 2.000°C irão fundir a carga metálica e a escória. Este gás redutor em contato com as fontes de óxido de ferro gera o processo de redução do minério (ARAÚJO, 1997).





O carvão é o combustível e agente redutor para o processo de redução dos óxidos de ferro. Ele também tem a função de dar suporte à carga criando espaços apropriados de modo a garantir um bom escoamento dos gases e dos materiais fundidos. Para que se consiga esse papel, exige-se do carvão baixa reatividade e alta resistência física de maneira que não se degrade à medida que se desce do topo até a zona inferior do forno (ARAÚJO, 1997).

Os minérios de ferro, a pelota e o sinter são as fontes de óxidos de ferro das quais o ferro (Fe) é extraído neste processo. Estas matérias-primas trazem também impurezas, principalmente Al_2O_3 (alumina), Cão (cal), SiO (sílica) e MgO (óxido de magnésio), que fundidas formarão a escória que se dirige ao cadinho juntamente com o gusa. O carregamento dos fundentes no alto-forno, tem como objetivo conferir uma proporção adequada dos componentes da escória (ARAÚJO, 1997).

Na figura 3 mostra-se o fluxo dos materiais dentro do reator.

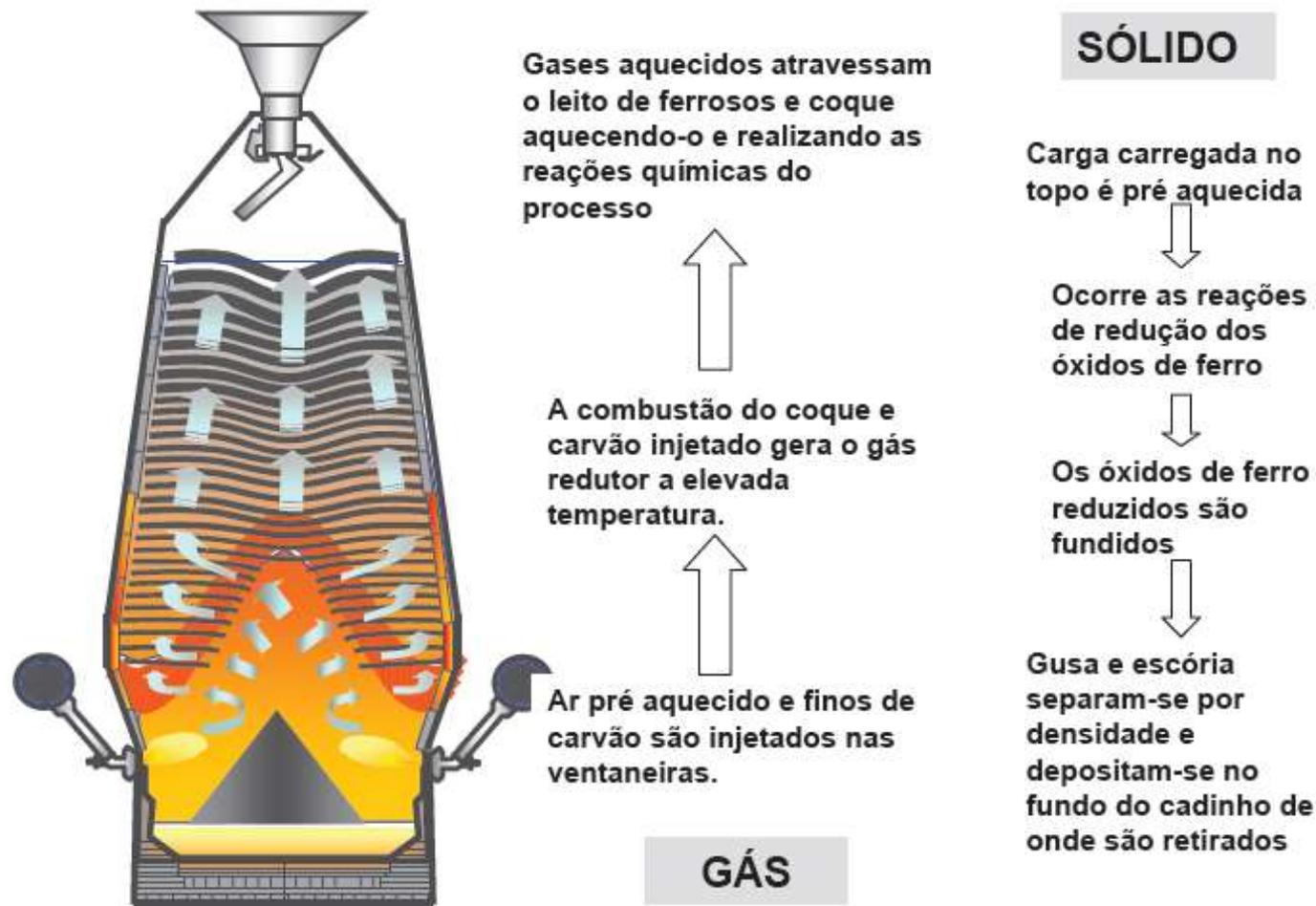


FIGURA 3. Fluxo de materiais dentro do alto-forno.
Fonte: Adaptado de ARAÚJO, 1997.



Na figura 4 mostra-se um desenho esquemático com a disposição das cargas no interior do alto-forno.

As cargas são dispostas no interior do alto-forno, alternadamente, carvão e carga metálica. A medida que a carga desce no interior do forno, as camadas se tornam mais estreitas, mantendo a distinção entre elas. Essa região se denomina zona de granular.

Ao atingir a temperatura de fusão, a carga metálica se torna pastosa e praticamente impermeável. Os gases aí passam através das camadas de carvão. Essa região é denominada zona de amolecimento e fusão (ARAÚJO, 1997).

Abaixo da zona de amolecimento e fusão existe a zona de gotejamento, na qual o ferro já fundido começa a descer.

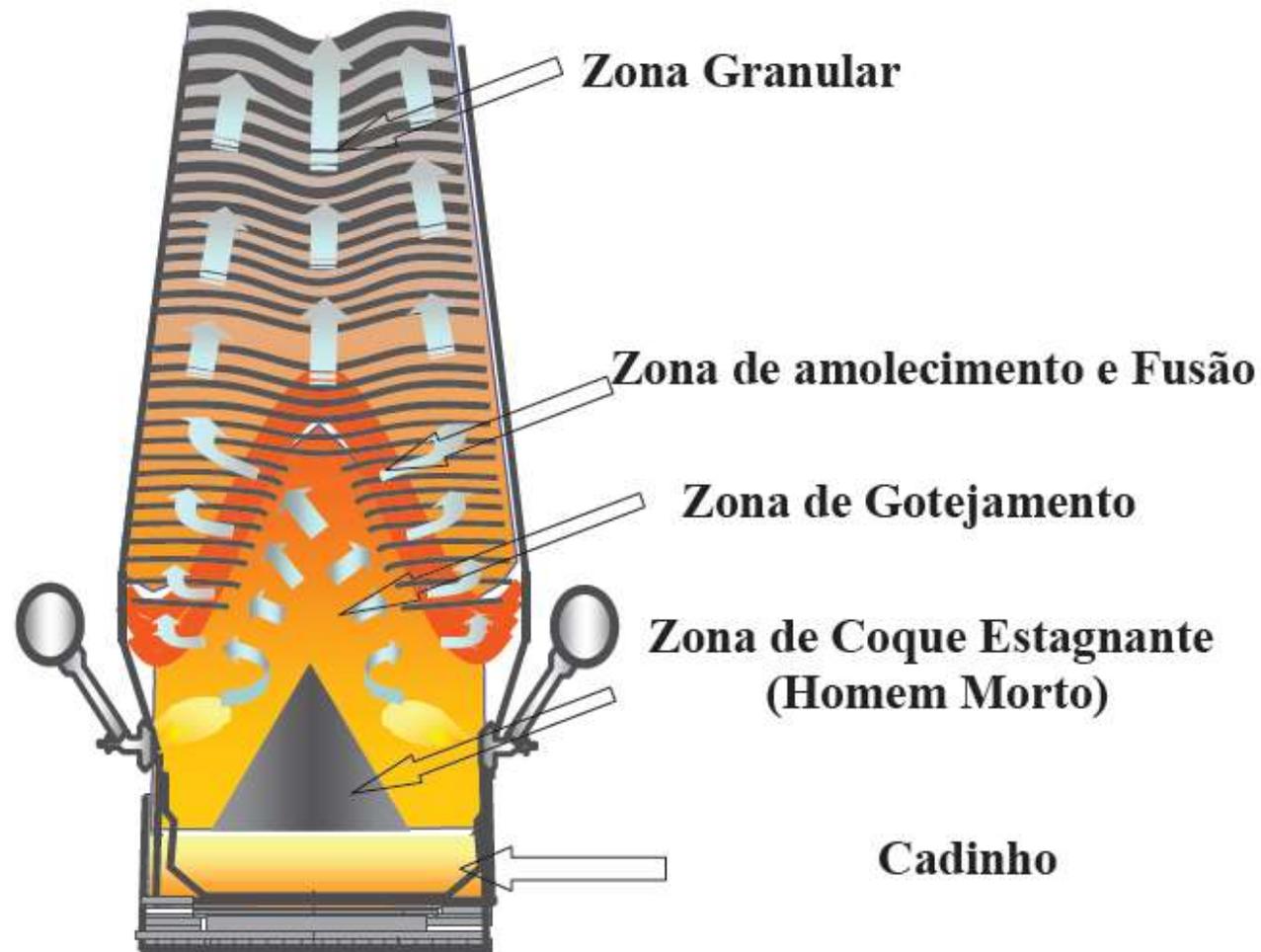


FIGURA 4. Disposição das cargas no interior do alto-forno.
Fonte: Adaptado de ARAÚJO, 1997.



Abaixo da zona de amolecimento e fusão, a única carga sólida existente é o carvão, que não se funde nas temperaturas reinantes nessa região. Na zona de gotejamento, o carvão se move para ser queimado em frente às ventaneiras sendo assim denominada zona de carvão ativo. Ocupando a parte mais central, abaixo desta região, encontra-se a zona de carvão estagnante, que praticamente não reage. Esta região é denominada de homem morto. Ocupando os vazios entre as partículas de carvão tem-se o gusa e a escória fundidos que atingiram o cadinho gotejando desde a zona de amolecimento e fusão.

Na região em frente às ventaneiras denominada zona de combustão, o ar quente soprado por elas promove a combustão do carvão formando o gás CO e grande quantidade de calor. À medida que o gás sobe através da carga, esse calor é transferido para a mesma e ocorrem as reações de redução.

De acordo com as reações internas, o alto-forno pode ser dividido em zonas, conforme a figura 5.

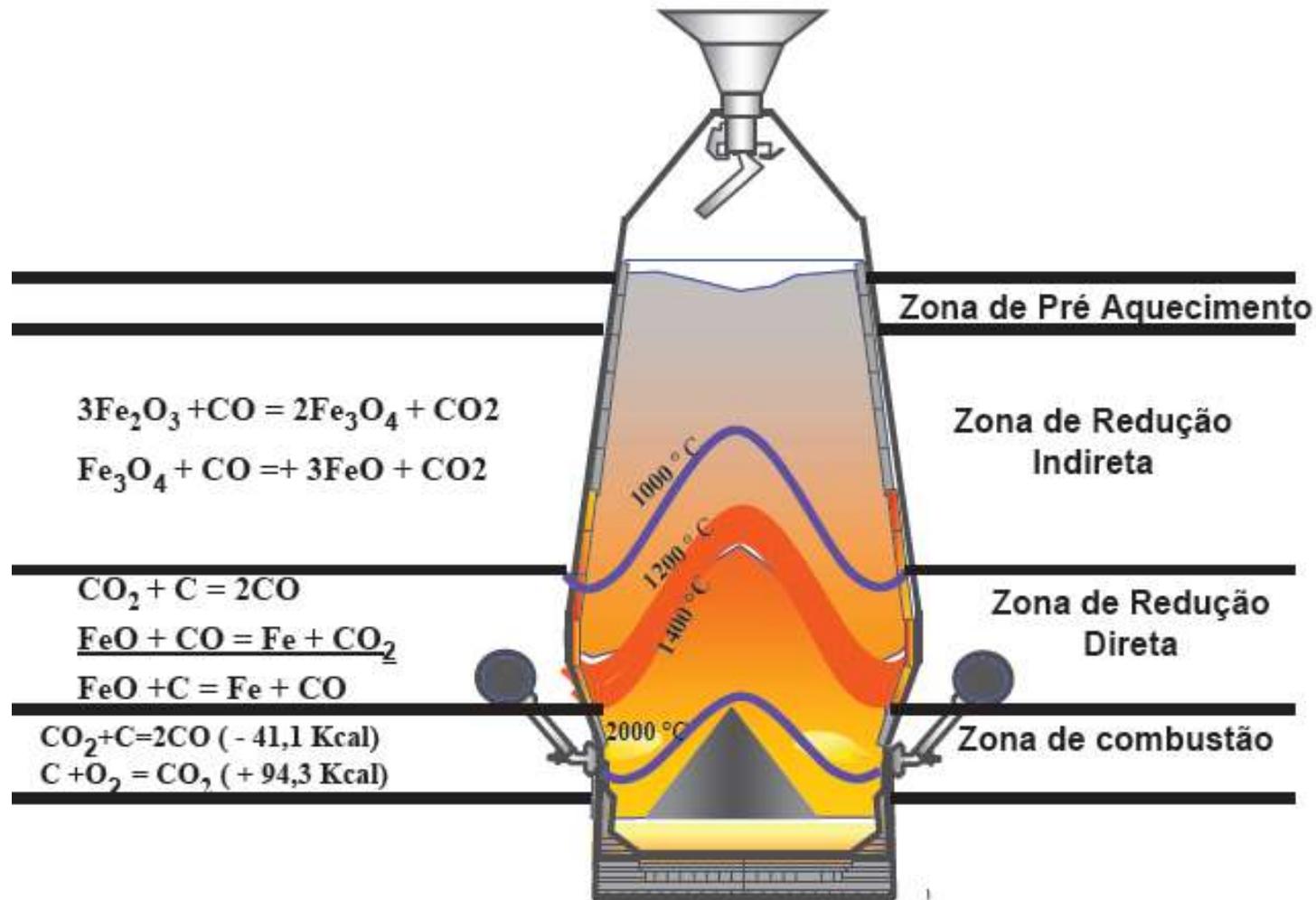


FIGURA 5. Reações no interior do alto-forno.
Fonte: Adaptado de ARAÚJO, 1997.



Na operação de um alto-forno, instrumentos modernos para observação e controle, controle operacional de equipamentos e supervisão da operação por computadores estão sendo utilizados. Entretanto a operação se apoia em vários dados como: propriedades e composição das matérias primas, do gusa e escória; temperatura e composição do gás do topo; pressão e temperatura de sopro; permeabilidade da carga; temperaturas nas paredes do forno.

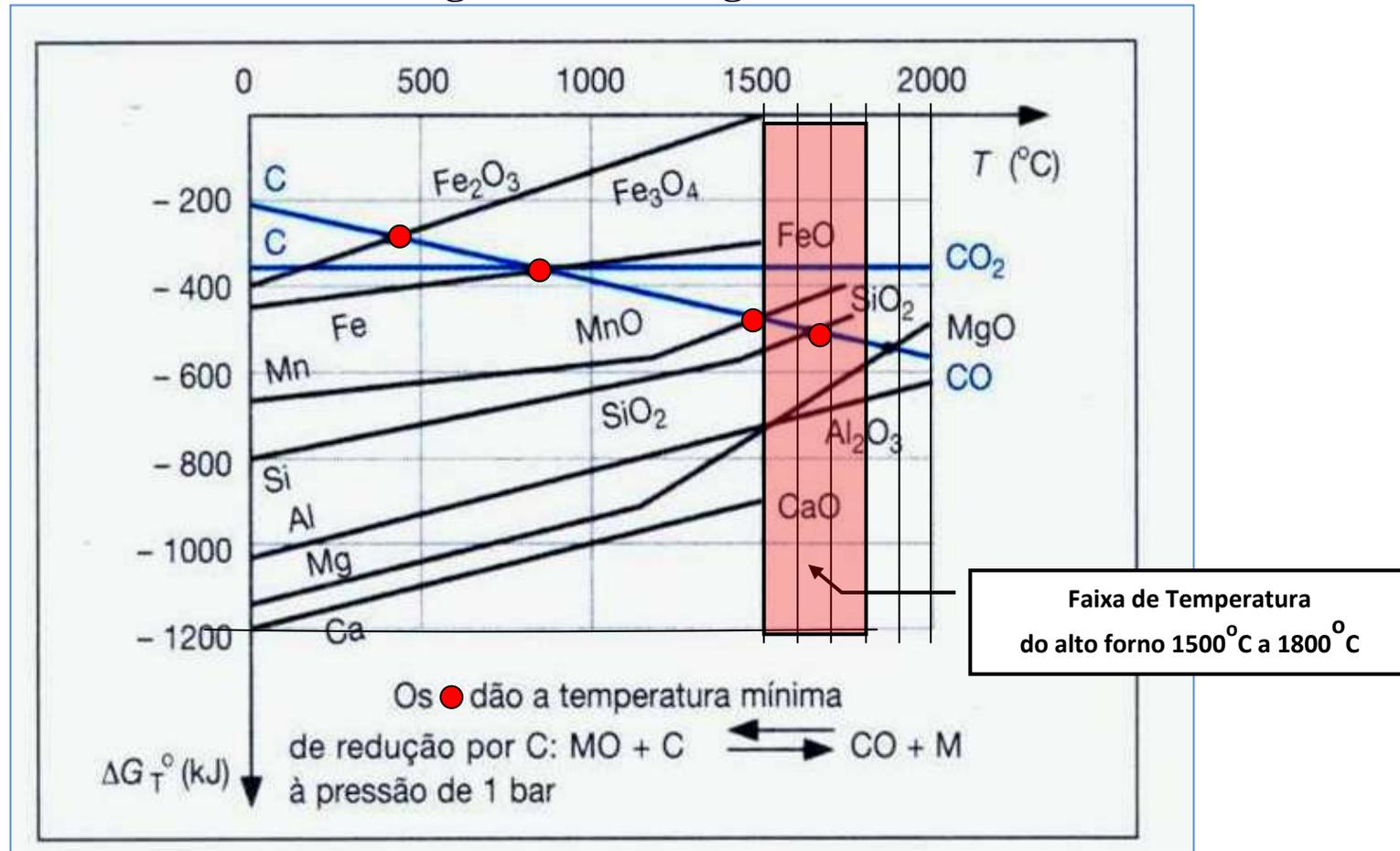
Esses dados são usados para avaliação, num esforço para se obter uma operação estável.

A estabilidade é um aspecto fundamental na operação do alto-forno, principalmente com a atual tendência de se ter fornos cada vez maiores, afetando sobremaneira a atividade de produção de toda a usina. E, uma vez iniciada a operação do alto-forno, ela deve se manter praticamente ininterrupta por vários anos. A campanha dos fornos de projetos mais antigos é de 5 a 8 anos (ARAÚJO, 1997).



ANEXO 02

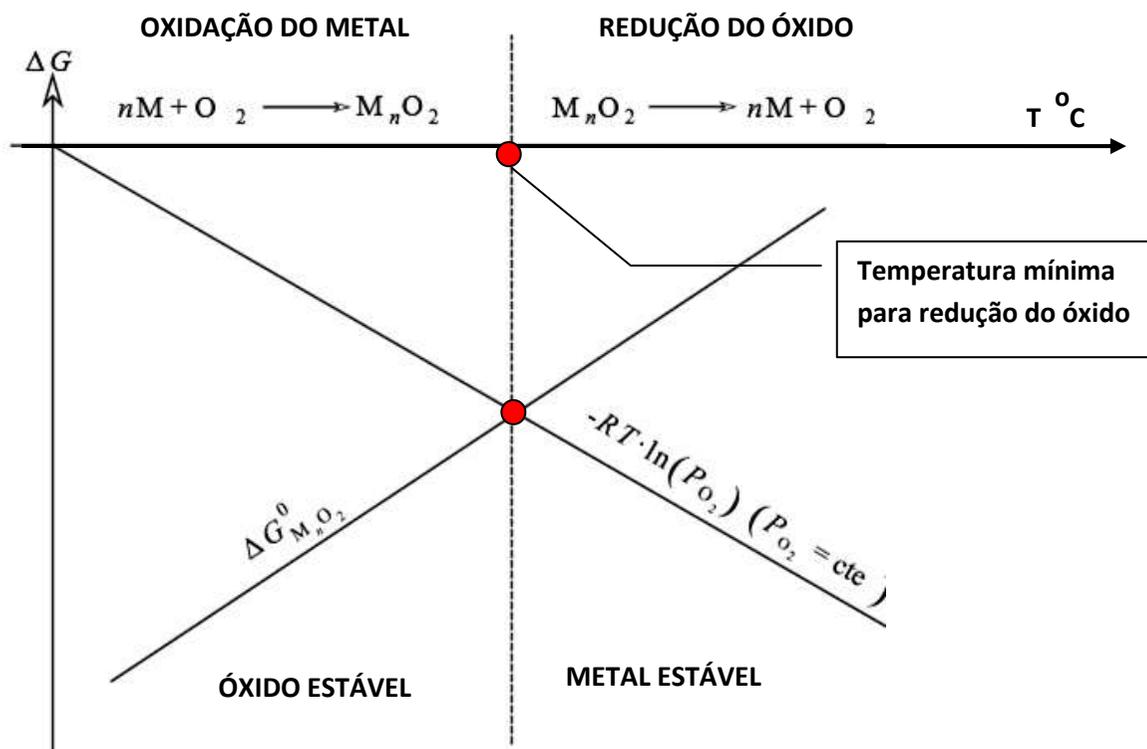
Diagrama de Ellingham



Nas temperaturas do alto forno, o carbono pode reduzir os óxidos de ferro Fe, de manganês Mn e de silício Si



Diagrama de Ellingham



No gráfico de Ellingham pode-se observar que, para a temperatura do alto forno, os óxidos de alumínio Al_2O_3 , de magnésio MgO e de cálcio CaO , não são reduzidos pelo carbono, continuando a fazer parte da escória.



2. ELABORAÇÃO DA GUSA

2.1. Matérias primas

2.1.1. Minérios de ferro

O ferro encontra-se essencialmente combinado sob a forma de óxidos: óxido férrico Fe_2O_3 ou óxido magnético (magnetite). O ferro é por conseguinte extraído por redução.

A abundância da ganga determina a riqueza do minério: 30% de ferro para os minérios de fraco teor, 60% de ferro para os minérios ricos.

A ganga é formada de silico-aluminatos de cálcio e de magnésio e de fosfato de cálcio. A composição da ganga varia segundo a proveniência do minério.

2.1.2. Coque metalúrgico

O diagrama de Ellingham da figura 2 representa a entalpia livre da reacção padrão $\Delta G_T^0 (T)^{(1)}$ para a formação dos diversos óxidos presentes no minério. Este, mostra que perante as temperaturas atingidas no alto forno, o carbono pode reduzir os óxidos de ferro, de manganês, de silício e de fósforo, enquanto que Al_2O_3 , MgO , CaO não são reduzidos.

O carbono é introduzido nas cargas sob a forma de coque metalúrgico que deve ter uma porosidade e uma resistência suficientes ao esmagamento.

2.1.3. Fundentes

Permitem eliminar a ganga sob a forma de escória fusível. São calcários se a ganga for siliciosa ou aluminosa e inversamente. Certas misturas de minérios são autofundentes e não necessitam de adição.

2.2. Preparação das cargas

Os principais progressos realizados nos altos fornos modernos tiveram como objectivo a melhoria da sua produtividade, a reprodutibilidade da análise do metal produzido, a redução do consumo de coque por tonelada. Estas melhorias, muitas vezes consideráveis, foram obtidas graças a uma preparação cuidada das cargas.



ANEXO 03



<http://www.cgee.org.br/>

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

Ciência, Tecnologia e Inovação

Organização Social supervisionada pelo Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT



**Siderurgia no Brasil
2010-2025**

<http://www.cgee.org.br/busca/ConsultaProdutoNcomTopo.php?f=1&idProduto=6831>

SÉRIE DOCUMENTOS TÉCNICOS - NOVEMBRO 2010 - Nº 091

Segundo o CGEE – Siderurgia no Brasil – 2010 – 2015

“A produção brasileira de carvão é equivalente a 0,1% do total mundial.

No país, o maior consumo de carvão é justamente na produção de coque de alto-forno.

Deve ser salientado que, atualmente, todo o carvão para uso siderúrgico é oriundo do exterior, tendo a Austrália como principal fonte de suprimento.

As importações superam 13 milhões de toneladas ao ano.

Os seis milhões de toneladas de carvão produzidas no Brasil são predominantemente consumidas na geração de termoeletricidade.

As jazidas brasileiras conhecidas de carvão localizam-se na região Sul, sendo que 78% das reservas encontram-se no Rio Grande do Sul, seguido por Santa Catarina e menos de 1% no Paraná. Praticamente toda a produção de carvão mineral, no Brasil, é empregada para a geração de energia elétrica em centrais térmicas na Região Sul.

Ainda hoje, 95% do ferro primário produzido no mundo usa o altoforno a coque.

No Brasil, cerca de 75% do aço bruto é produzido em Usinas Siderúrgicas Integradas que utilizam altos-fornos a coque ”.



Carvão vegetal

Comentário : *Também está sendo usado carvão vegetal na produção de ferro gusa. Ver relato abaixo.*

O Globo - 13/05/12 <http://oglobo.globo.com/rio20/o-aco-que-engole-floresta-4888826#ixzz25tMdUkxO>



AÇAILÂNDIA, MA - *Fabricantes de aço e ferro-gusa instalados no entorno do polo de Carajás, na divisa do Pará com Maranhão, ainda usam em seus fornos carvão de mata nativa, parte dela extraída ilegalmente de terras protegidas, como a Reserva Biológica do Gurupi e terras indígenas da região. O carvão é usado para fabricar ferro-gusa, que posteriormente é vendido para grandes siderúrgicas do mundo todo.*

Posteriormente, na aciaria, o ferro-gusa líquido é transformado em aço por meio da injeção de oxigênio puro, sob altíssima pressão.

Segundo a CGEE – Siderurgia no Brasil – 2010 – 2015

Carvão vegetal - Contexto nacional

“ Como já mencionado, a siderurgia a carvão vegetal é uma peculiaridade da indústria siderúrgica brasileira, razão pela qual fica prejudicada a intenção de se discutir esta temática à luz da experiência internacional. De fato, os altos-fornos a carvão vegetal representam apenas 25% a 30% da produção brasileira.”

Embora existam usinas integradas a carvão vegetal no país, a maior parcela do ferro-gusa brasileiro, fabricado de carvão vegetal, é proveniente dos guseiros, que possuem mais de 160 altos fornos.”



Transformação do ferro gusa em aço

Para transformar a gusa em aço é preciso tirar uma parte do carbono, do silício, do manganês, e a totalidade do fósforo e impurezas.

Para isto é utilizado oxigênio puro ou o oxigênio presente no ar. Existem dois tipos de refinação, a ácida e a básica.

Na refinação ácida, a gusa de primeira fusão foi obtida de um minério de ferro rico em Si (2%) e pobre em P (0,07%), típicos dos minérios americanos.

Já na refinação básica temos o contrário, a gusa vem de um minério de ferro rico em P (2%) e pobre em Si (0,5%), típicos dos minérios europeus.

A seguir os principais métodos classificados quanto ao uso do oxigênio:

- Processo Thomas: oxidação do C da gusa pelo oxigênio do ar, processo quase obsoleto, sendo substituído pelo do oxigênio puro.
- **Processos L-D** (Linz - Donawitz), OLP (Oxigênio – Lança– Poeira) e Kaldo: oxidação da gusa por oxigênio puro.

Carbono : É necessário usar Carvão vegetal ou então Coque para retirar o Oxigênio do minério de ferro

Coque :



O **coque** é um tipo de combustível derivado do carvão betuminoso. O coque obtém-se do aquecimento da hulha (ou carvão betuminoso), sem combustão, num recipiente fechado. É utilizado na **produção de ferro gusa** (alto forno), sendo adicionado junto com o minério de ferro.



Todo o carvão para uso siderúrgico é oriundo do exterior, tendo a Austrália como principal fonte de suprimento.

A coqueificação ocorre a uma temperatura de 1300°C em ausência de ar durante um período de 18 horas, onde ocorre a liberação de substâncias voláteis.

O produto resultante desta etapa, o coque, é um material poroso com elevada resistência mecânica, alto ponto de fusão e grande quantidade de carbono.

"O coque, nas especificações físicas e químicas requeridas, é encaminhado ao alto-forno e os finos de coque são enviados à sinterização e à aciaria. O coque é a matéria prima mais importante na composição do custo de um alto-forno (60%)".

- Com o resfriamento lento da escória de alto forno formam-se microestruturas cristalinas onde predominam as fases minerais calcio-silicatos:

Melilita : $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \dots 2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$,

Merwinita : $3\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ und

Monticelita : $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$

Parte da Cal , CaO , também permanece não combinada.

ANEXO 04

Fabrcio Dzierva, Departamento de Engenharia Elétrica – UFPR

AÇO

Definição

Basicamente uma liga ferro-carbono com teor de carbono inferior a 1,8% em massa e susceptível de adquirir, por meio de tratamento mecânico e térmico, variadas propriedades, podendo conter em sua composição outros elementos como níquel, manganês, tungstênio, vanádio, cromo, silício, etc.



Minério de ferro: presente em aproximadamente 5% da crosta terrestre.

O ferro não é encontrado em estado puro na natureza mas em combinações químicas de metais contidos nas rochas.

Essas combinações químicas ocorrem misturadas com as “gangas”, compostas de silício, alumínio, cal e magnésio.

Os principais são: magnetita (Fe_3O_4) com cerca de 60% de ferro; hematita vermelha (Fe_2O_3) com cerca de 65% de ferro; ferro oolítico; siderita ou ferro espático (FeCO_3) com alto teor de manganês; FeS_2 .

- **Coque:** desempenha uma dupla função na elaboração da gusa: a de combustível e a de redutor. O coque provém da destilação do carvão mineral, que deve ser o mais puro possível para evitar resíduos como enxofre e fósforo. Como redutor absorve o oxigênio combinado com outros elementos.

- **Ganga:** Impurezas que ocorrem junto com o minério de ferro em estado bruto, compostas principalmente de silício, alumínio, cal e magnésio.

- **Carbono:** símbolo C, com massa atômica 12. É um metalóide sólido muito resistente ao calor, volatilizando-se em torno dos 3500 °C. O carbono tem a fundamental propriedade de ser solúvel em ferro fundido. O carbono pode ser encontrado basicamente em três estados, o diamante, grafita e o carvão.

- **Fundente:** pedra de cal ou magnésio adicionada a massa incandescente para separar o ferro da ganga.

O fundente com a ganga dá a escória, que por ser mais fusível e leve que o ferro se acumula sobre o metal líquido.

- **Escória:** uma espécie de vidro de qualidade inferior que é produto da mistura entre a ganga e fundente.

- **Gusa:** é a parte útil para a produção do aço, composta basicamente de ferro fundido com carbono entre 2,5% a 6,67%.

- **Aço de alto teor de carbono:** pouco utilizado por causa da sua grande fragilidade. Ferro + 1,8% a 2,5% de carbono

Processo de obtenção da gusa

Inicialmente tem-se o minério de ferro que é composto pelo metal (ferro) e pela ganga. Primeiro é necessário liberar o ferro usando um redutor (carvão) para eliminar o oxigênio do metal.

Para isto é necessário fornecer muito calor, fornecido pela própria queima do carvão.



O ferro, já em estado líquido, se acumula no fundo do alto-forno.

Para eliminar a ganga junta-se o fundente, o que nos dá a escória, que por ser mais leve, se acumula sobre o ferro.

Portanto, utilizando o processo de decantação, separa-se o ferro da escória.

Dentro do alto-forno tem-se a seguinte seqüência, como ilustra a figura 1:

- Introduz-se a carga, composta de minério de ferro, coque e fundente.
- Entre 300°C e 350°C temos a **dessecação**, onde o vapor de água contido na carga é liberado.
- Entre 350°C e 750°C ocorre a **redução**, onde o óxido de ferro perde o oxigênio.
- Entre 750°C e 1150°C temos a **carburação**, onde o ferro se combina com o carbono formando a gusa.
- Entre 1150°C e 1800°C ocorre a **fusão**, onde a gusa passa para o estado líquido
- Em torno dos 1600°C ocorre a **liquefação**, onde a gusa se separa da escória.

A **gusa** obtida pode ter três destinos:

a fundição dos lingotes, destinados às aciarias de segunda fusão;

a execução de grandes peças por vazamento direto nos moldes;

a fabricação do aço.

A gusa produzida pelo alto-forno ou gusa de primeira fusão pode ser de dois tipos: gusa branca ou fundição gris.

Elas são destinadas a produção do aço através do seu refino posterior.

A gusa branca tem como composição e característica:

C = 2,3% a 3%, P = 2%, Mn = 1,5%, Si = 0,6%, Fe = restante,
densidade = 7,4 kg/dm³ e ponto de fusão = 1200°C.

A fundição Gris tem como composição e característica:

C = 3% a 4,5%, P=0,08%, Mn = 1%, Si = 1,5% a 5%, S = 0,054% ; Fe = restante,
densidade = 7,4kg/dm³ e ponto de fusão = 1200°C



Referências

1. Andreas Ehrenberg - Hüttensand - Ein leistungsfähiger Baustoff mit Tradition und Zukunft -2 partes, Duisburg-Rheinhausen – (*Um eficaz material de construção, com tradição e com futuro*).
Beton-Informationen 4 · 2006
<http://www.beton-informationen.de/downloads/1-2006-04-01.pdf>

Beton-Informationen 5 · 2006
<http://www.beton-informationen.de/downloads/1-2006-05-01.pdf>

Beton-Informationen 2 · 2005
<http://www.beton-informationen.de/downloads/1-2005-02-01.pdf>

Beton-Informationen 5 · 2005
<http://www.beton-informationen.de/downloads/1-2005-05-01.pdf>
2. Schlacke - Ökologie und Vernunft - Institut für Baustoff Forschung - 2007
fehs@fehs.de ; <http://www.fehs.de/>
3. O aço que engole a floresta -13/05/2012
<http://oglobo.globo.com/rio20/o-aco-que-engole-floresta-4888826>
4. SCA-Slag Cement Association-6478 Putnam Ford Drive Suite 219 - Woodstock, GA 30189
info@slagcement.org ; <http://www.slagcement.org>
6. LAGA - Merkblatt: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen - Technische Regeln Mitteilung der Länder-arbeits-gemeinschaft -Abfall (LAGA) Nr. 20 - Stand 6. November 1997- <http://www.laga-online.de/>
7. Zementrohstoffe in Deutschland - Geologie, Massenbilanz, Fallbeispiele - 2002
<http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/UmweltundRessourcen/zementrohstoffe/Zementrohstoffe03.pdf>
8. Vdz – Verein Deutscher Zement –Zement Taschenbuch - 51^a edição 2008 -
<http://www.vdz-online.de/>
9. José Henrique Noldin Júnior - Contribuição ao estudo da cinética de redução de briquetes auto-redutores -DISSERTAÇÃO DE MESTRADO - DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA DOS MATERIAIS E METALURGIA -Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica - Rio de Janeiro – 2002
http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=3667@1
10. JEAN BARRALIS, GÉRARD MAEDER – Prontuário de metalurgia – Fundação Calouste Gulbenkian – 2010
11. V. S. Ramachandran – Concrete Admixtures Handbook – Properties, Science , and Technology- Noyes Publications – 2nd edition – 1995



12. Escoria de Alto Forno - ArcelorMittal Tubarão/BR -2010
http://www.cst.com.br/produtos/co_produtos/catalogo_produtos/escoria_forno/index.asp
13. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico – NT Carvão e Coque
http://www.abmbrasil.com.br/epss/arquivos/documentos/2011_4_19_11_18_10_21931.pdf
14. CGEE Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – Ciência Tecnologia e Inovação – Organização Social supervisionada pelo Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT
<http://www.cgee.org.br/> Siderurgia no Brasil - 2010-2025 - SÉRIE DOCUMENTOS TÉCNICOS - NOVEMBRO 2010 - Nº 09
<http://www.cgee.org.br/busca/ConsultaProdutoNcomTopo.php?f=1&idProduto=6831>
15. José Henrique Noldin Júnior
Contribuição ao estudo da cinética de redução de briquetes auto-redutores
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO -DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA DOS MATERIAIS E METALURGIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica Rio de Janeiro Setembro 2002
http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/3667/3667_1.PDF
16. José Eduardo Kattar e Nilton Jorge Almeida - CENTRO TECNOLÓGICO HOLDERCIM BRASIL - CIMENTO PORTLAND – Santo André 1999
17. Prof. Dr.-Ing Karl-Christian Thienel - Baustoffkreislauf – Eisenhuettenschlacken und Huettensand - Universitaet der Bundeswehr Muenchen
<http://www.unibw.de/bauv3/lehre/skripten/baustoffkreislauf-schlacken-und-huttensand-2010.pdf>
- 18- **PCA** – Portland Cement Association - **Cement Research Library** – 2008 Edition
Concrete Information : “Portland , Blended , and Other Hydraulic Cements”

+ + +