



e-Tec Brasil
Escola Técnica Aberta do Brasil

Siderurgia

José Nazareno Santos Silva



**INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
PARÁ
Campus Belém

Belém do Pará - PA
2011

Presidência da República Federativa do Brasil

Ministério da Educação

Secretaria de Educação a Distância

© Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Este Caderno foi elaborado em parceria entre o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará/IFPA-Belém e a Universidade Federal de Santa Maria para o Sistema Escola Técnica Aberta do Brasil – e-Tec Brasil.

Equipe de Elaboração – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará/IFPA-Belém

Reitor

Edson Ary de O. Fontes/IFPA-Belém

Coordenador Institucional

Erick Alexandre de Oliveira Fontes/IFPA-Belém

Coordenador de Curso

Oscar Jesus Choque Fernandez/IFPA-Belém

Professor-autor

José Nazareno Santos Silva/IFPA-Belém

Equipe Técnica

Carlos Lemos Barboza/IFPA-Belém

Fabiano Darlindo Veloso/IFPA-Belém

Gisely Regina Lima Rebelo/IFPA-Belém

Wyllen Soares Pinheiro/IFPA-Belém

Comissão de Acompanhamento e Validação Colégio Técnico Industrial de Santa Maria/CTISM

Coordenador Institucional

Paulo Roberto Colusso/CTISM

Coordenação Técnica

Iza Neuza Teixeira Bohrer/CTISM

Coordenação de Design

Erika Goellner/CTISM

Revisão Pedagógica

Andressa Rosemárie de Menezes Costa/CTISM

Francine Netto Martins Tadielo/CTISM

Marcia Migliore Freo/CTISM

Revisão Textual

Daiane Siveris/CTISM

Lourdes Maria Grotto de Moura/CTISM

Vera da Silva Oliveira/CTISM

Revisão Técnica

Valdir Bólico Araújo/CTISM

Ilustração

Ricardo Antunes Machado/CTISM

Diagramação

Gustavo Schwendler/CTISM

Leandro Felipe Aguiar Freitas/CTISM

Máira Rodrigues/CTISM

Máuren Fernandes Massia/CTISM

Ficha catalográfica elaborada por Simone Nazaré da Silva Coutinho,
CRB 875 – 2ª região, bibliotecária do IFPA – Campus Belém

S237 Silva, José Nazareno Santos.
Siderurgia / José Nazareno Santos Silva – Belém : IFPA : Santa Maria : UFSM, 2011.
110p.

I. Siderurgia II. Escola Técnica Aberta do Brasil. II. Título.

CDD: 669

Apresentação e-Tec Brasil

Prezado estudante,

Bem-vindo ao e-Tec Brasil!

Você faz parte de uma rede nacional pública de ensino, a Escola Técnica Aberta do Brasil, instituída pelo Decreto nº 6.301, de 12 de dezembro de 2007, com o objetivo de democratizar o acesso ao ensino técnico público, na modalidade a distância. O programa é resultado de uma parceria do Ministério da Educação, por meio das Secretarias de Educação a Distância (SEED) e de Educação Profissional e Tecnológica (SETEC), as universidades e escolas técnicas estaduais e federais.

A educação a distância no nosso país, de dimensões continentais e grande diversidade regional e cultural, longe de distanciar, aproxima as pessoas ao garantir acesso à educação de qualidade e ao promover o fortalecimento da formação de jovens moradores de regiões distantes dos grandes centros geográfica e ou economicamente.

O e-Tec Brasil leva os cursos técnicos a locais distantes das instituições de ensino e para a periferia das grandes cidades, incentivando os jovens a concluir o ensino médio. Os cursos são ofertados pelas instituições públicas de ensino, e o atendimento ao estudante é realizado em escolas-polo integrantes das redes públicas municipais e estaduais.

O Ministério da Educação, as instituições públicas de ensino técnico, seus servidores técnicos e professores acreditam que uma educação profissional qualificada – integradora do ensino médio e da educação técnica, – é capaz de promover o cidadão com capacidades para produzir, mas também com autonomia diante das diferentes dimensões da realidade: cultural, social, familiar, esportiva, política e ética.

Nós acreditamos em você!

Desejamos sucesso na sua formação profissional!

Ministério da Educação
Janeiro de 2010

Nosso contato
etecbrasil@mec.gov.br



Indicação de ícones

Os ícones são elementos gráficos utilizados para ampliar as formas de linguagem e facilitar a organização e a leitura hipertextual.



Atenção: indica pontos de maior relevância no texto.



Saiba mais: oferece novas informações que enriquecem o assunto ou “curiosidades” e notícias recentes relacionadas ao tema estudado.



Glossário: indica a definição de um termo, palavra ou expressão utilizada no texto.



Mídias integradas: sempre que se desejar que os estudantes desenvolvam atividades empregando diferentes mídias: vídeos, filmes, jornais, ambiente AVEA e outras.



Atividades de aprendizagem: apresenta atividades em diferentes níveis de aprendizagem para que o estudante possa realizá-las e conferir o seu domínio do tema estudado.



Sumário

Palavra do professor-autor	9
Apresentação da disciplina	11
Projeto instrucional	13
Aula 1 – Introdução à siderurgia	15
1.1 Conceitos básicos aplicados à siderurgia.....	16
1.2 Fabricação de coque.....	19
1.3 Sinterização.....	22
1.4 Pelotização.....	24
Aula 2 – Obtenção do ferro-gusa	31
2.1 Obtenção	31
2.2 Alto-forno.....	31
2.3 Partes que compõem o alto-forno.....	32
2.4 Funcionamento do alto-forno.....	33
2.5 Reações principais.....	34
2.6 Tratamento do ar e gases resultantes.....	39
2.7 Tratamento da lama.....	40
Aula 3 – Obtenção do ferro-esponja	45
3.1 Processos de redução direta do minério de ferro	45
3.2 Processo <i>Midrex</i>	46
3.3 Analogia entre os processos direto e indireto da redução do minério de ferro.....	49
Aula 4 – Obtenção do aço pelo processo LD	53
4.1 Origem do processo.....	54
4.2 Descrição do conversor.....	56
4.3 Operação do conversor LD.....	56
4.4 Matérias-primas utilizadas no conversor.....	58
4.5 Classificação dos aços quanto ao teor de oxigênio e sua aplicação.....	64

4.6 Reações que ocorrem no conversor.....	65
4.7 Importância da escória.....	66
4.8 Tratamento do gás obtido no conversor.....	68
Aula 5 – Obtenção de aços através do forno elétrico.....	75
5.1 Resumo histórico.....	75
5.2 Tipos de fornos elétricos (FE).....	75
5.3 Operações do forno elétrico.....	77
5.4 Desvantagens do forno elétrico.....	86
5.5 Forno panela.....	86
Aula 6 – Lingotamento estático, contínuo, classificação e nomenclatura dos aços.....	97
6.1 Lingotamento convencional.....	97
6.2 Lingotamento contínuo.....	100
6.3 Classificação dos aços quanto à composição química.....	104
6.4 Nomenclatura dos aços.....	105
Referências.....	109
Currículo do professor-autor.....	110

Palavra do professor-autor

Prezado(a) estudante:

Sentimo-nos gratificados em poder estar com você durante o estudo da disciplina **Siderurgia** do Curso de **Metalurgia do IFPA**, através do Programa Escola Técnica Aberta do Brasil (e-Tec), que será ministrada com aulas virtuais, visando habilitar profissionais capazes de desenvolver com competência as atividades que atendam exigências das indústrias siderúrgicas da nossa região.

O texto está enfatizando desde o histórico da siderurgia até aplicações das novas tecnologias utilizadas nas grandes siderúrgicas do país. Dessa forma, esperamos que vocês se sintam capazes de resolver as atividades desenvolvidas no decorrer do curso, adquirindo a visão necessária sobre as mais diversas áreas que a disciplina possa atingir, mostrando que, no ensino a distância, o aluno não fica restrito aos conteúdos curriculares, mas avança na busca de melhores resultados com participação mais ativa, e maior grau de interação.

José Nazareno Santos Silva



Apresentação da disciplina

O mundo atual vive uma fase de grande desenvolvimento, tanto econômico, quanto tecnológico. Um dos grandes indicadores de desenvolvimento econômico de um país é a produção de aço, pois o consumo desse material cresce na medida em que aumentam a construção civil, a fabricação de automóveis, a instalação de meios de produção de equipamentos industriais, etc.

A tecnologia da produção de aço tenderá a uma instrumentação mais aprimorada, fornecendo dados aos computadores que controlarão todas as fases da fabricação do aço e que corrigirão imediatamente qualquer variação durante o processo. O uso de robôs para as operações perigosas ou insalubres como desmontagens ou reparos dos revestimentos de fornos difundir-se-á com rapidez.

Outra previsão será a utilização de energia solar captada por satélites que efetuará a dissociação da água, para a obtenção de H_2 , para ser empregado na redução direta do minério.

O velho sonho dos metalurgistas – obter produtos acabados diretamente a partir do minério e de modo contínuo tornar-se-á realidade.

Apesar de ser uma visão futurista, mostra, no mínimo, o anseio de estudar um cenário siderúrgico sem os problemas da poluição proveniente do manuseio e da produção do coque e de carvão vegetal.

Não deixa de ser curioso notar que a siderurgia começou com a obtenção do ferro pelo processo direto e que, em sua lenta evolução, chegou-se aos altos fornos, portanto, a uma etapa intermediária de fabricação indireta do aço. Depois de algumas centenas de anos, procura-se completar o ciclo, almejando-se um processo realmente contínuo de obtenção do ferro, desde o minério até sua conformação mecânica final. (ARAÚJO, 2007).

Muitos se questionam por que, apesar de tanta atratividade, essa tecnologia ainda encontra resistência no caminho da comercialização. Talvez os insucessos de outros investimentos ocorridos anteriormente, a instabilidade da

siderurgia mundial, a escassez de capital, a falta de políticas governamentais ou o conservadorismo do setor, sejam as razões.

A verticalização mineral no Pará começa a se tornar realidade. Em 2009 a Vale apresentou um Projeto Siderúrgico a ser implantado em Marabá (**ALPA**) com previsão para entrar em operação em 2013. Esse projeto será destinado à obtenção de placas de aço e de produtos laminados à quente como bobinas e chapas que serão base para produtos automotivos como peças para indústria metal-mecânica, gerando 17 mil empregos no auge das obras de instalação do empreendimento e 3 mil postos de trabalho durante a fase de operação. (DIÁRIO DO PARÁ – 29/08/2009).

Está sendo apresentado um projeto de uma usina metalúrgica de ferro-ligas de Manganês em Marabá pertencente à Mineração Buritirama programada para entrar em operação até em 2015. A futura usina de ferro-ligas, consumidor intensivo de energia, é um empreendimento projetado no Pará, cuja implantação vai depender da construção da hidroelétrica de Belo Monte no Xingu. A indústria prevê também o uso, quando em operação, do transporte fluvial pela hidrovía do Tocantins, a partir de Marabá. Nessa perspectiva, está implícita a conclusão obrigatória do sistema de transposição do Reservatório de Tucuruí – as chamadas eclusas do Rio Tocantins – e a ampliação do Porto da Vila do Conde. Os dirigentes da empresa anunciaram que o empreendimento projetado deverá gerar cerca de 3 mil novos empregos no Pará. (DIÁRIO DO PARÁ, 18/02/2010).

Em face dessa situação vamos orientar os alunos para conhecerem os tipos de minério de ferro, os processos de aglomeração desse minério, a obtenção do ferro-gusa e ferro-esponja e, ainda, fornecer informações sobre a obtenção e o lingotamento do aço e suas aplicações.

Projeto instrucional

Disciplina: Siderurgia (carga horária: 60h).

Ementa: Conhecer a origem da siderurgia. Estudar a obtenção do ferro-gusa e ferro-esponja, para ser utilizados como matéria-prima na fabricação dos aços através do processo LD e forno elétrico e posterior lingotamento contínuo, determinando sua utilização.

AULA	OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM	MATERIAIS	CARGA HORÁRIA (horas)
1. Introdução à siderurgia	Conhecer a origem da siderurgia. Identificar as matérias-primas e produtos obtidos nos processos siderúrgicos. Conhecer as operações de sinterização e pelotização do minério de ferro. Identificar os equipamentos utilizados na sinterização e pelotização do minério de ferro.	Aulas on-line em ambiente virtual. Provocar o interesse e a interação dos alunos na busca dos conhecimentos.	10
2. Obtenção do ferro-gusa	Identificar as matérias-primas e produtos obtidos nos altos fornos. Conhecer as várias partes que compõem o alto-forno. Analisar as reações que ocorrem no alto-forno. Adquirir conhecimentos dos processos tecnológicos de redução indireta do minério de ferro e saber da importância em tratar os gases e a lama obtida no alto-forno, visando reconhecer a melhoria de qualidade ao meio ambiente.	Aulas on-line em ambiente virtual. Provocar o interesse e a interação dos alunos na busca dos conhecimentos.	15
3. Obtenção do ferro-esponja	Analisar as alternativas da redução do minério de ferro. Conhecer o processo <i>Midrex</i> para obtenção do ferro-esponja. Estudar as várias etapas na fabricação do ferro-esponja. Transformar o gás natural em redutor. Analisar as vantagens do processo de redução direta em comparação à indireta.	Aulas on-line em ambiente virtual. Provocar o interesse e a interação dos alunos na busca dos conhecimentos.	05

AULA	OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM	MATERIAIS	CARGA HORÁRIA (horas)
4. Obtenção do aço pelo processo LD	<p>Conhecer o conversor LD e suas vantagens em relação a outros processos.</p> <p>Identificar as etapas da fabricação do aço pelo processo LD.</p> <p>Analisar as reações de oxidação das impurezas que ocorrem dentro do conversor.</p> <p>Classificar os aços quanto ao teor de oxigênio e à sua aplicação.</p> <p>Reconhecer a importância do tratamento do gás gerado no conversor.</p>	<p>Aulas on-line em ambiente virtual.</p> <p>Provocar o interesse e a interação dos alunos na busca dos conhecimentos.</p>	10
5. Obtenção de aços através do forno elétrico	<p>Conhecer o processo de fabricação de aço em forno elétrico.</p> <p>Identificar os vários tipos de fornos elétricos.</p> <p>Analisar o refino oxidante e redutor na transformação da sucata em aço.</p> <p>Conhecer a importância da desoxidação e dessulfuração do aço.</p> <p>Conhecer as operações que ocorrem no forno panela e suas vantagens.</p>	<p>Aulas on-line em ambiente virtual.</p> <p>Provocar o interesse e a interação dos alunos na busca dos conhecimentos.</p>	10
6. Lingotamento estático, contínuo, classificação e nomenclatura dos aços	<p>Identificar o lingotamento estático e contínuo.</p> <p>Identificar os defeitos observados nos lingotes.</p> <p>Conhecer as vantagens e desvantagens do lingotamento contínuo em relação ao estático.</p> <p>Classificar os aços quanto ao teor de carbono e conhecer sua aplicação.</p> <p>Classificar os aços através de normas.</p>	<p>Aulas on-line em ambiente virtual.</p> <p>Provocar o interesse e a interação dos alunos na busca dos conhecimentos.</p>	10

Aula 1 – Introdução à siderurgia

Objetivos

Conhecer a origem da siderurgia.

Identificar as matérias-primas e produtos obtidos nos processos siderúrgicos.

Conhecer as operações de sinterização e pelotização do minério de ferro.

Identificar os equipamentos utilizados na sinterização e pelotização do minério de ferro.

Nesta aula, você estudará o histórico, conceitos aplicados à siderurgia, finalidade de se aglomerarem os finos de minério de ferro antes da sua utilização como matéria-prima nos altos fornos. Conhecerá as propriedades e características do sinter, pelotas e coque obtidos na indústria siderúrgica. Poderá acompanhar através do fluxograma mostrado na Figura 1.1 as várias unidades de uma usina siderúrgica integrada que será tema do nosso estudo nesta disciplina.

A Figura 1.1 apresenta o fluxograma completo de uma usina siderúrgica integrada mostrando cada unidade da usina.

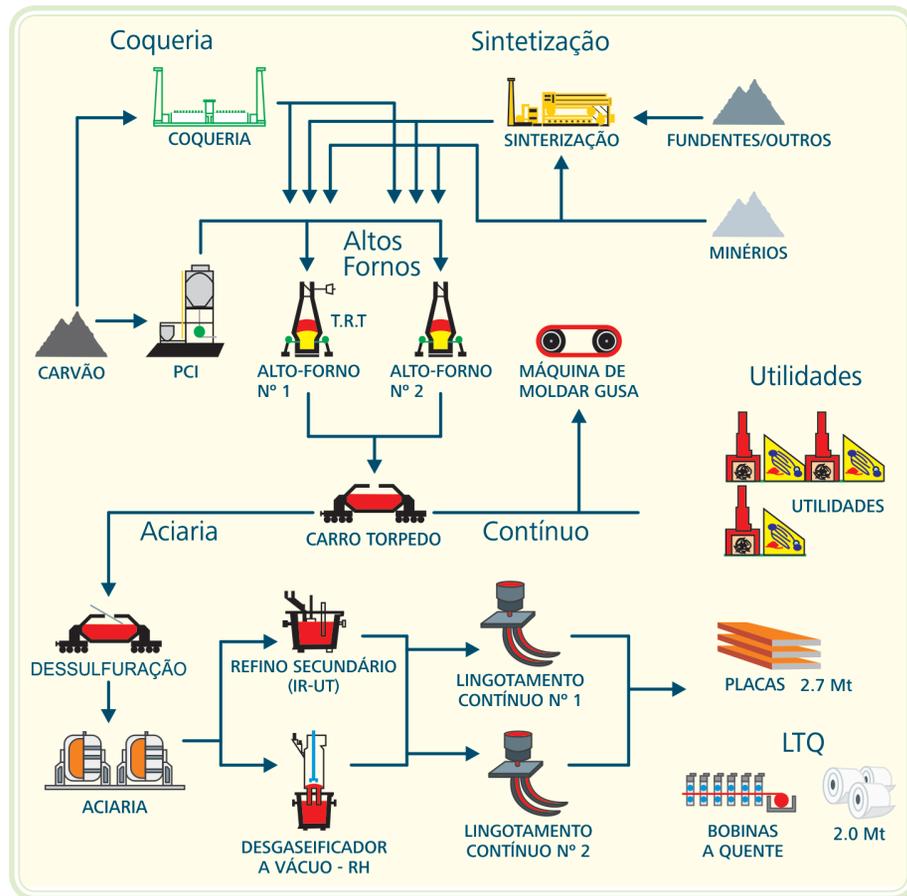


Figura 1.1: Fluxograma da Usina de Tubarão – Vitória – Espírito Santos

Fonte: www.abmbrasil.com.br/cim/.../Chiabi-Gestao-de-Seguranca.pps

O aço é o material mais utilizado na indústria. Ele é obtido a partir do ferro que é um dos metais mais comuns na crosta terrestre. Podemos encontrá-lo na natureza misturado com outros elementos em forma de minério. O aço é uma liga ferro com baixo teor de carbono. Apresenta-se em diversas formas e especificações, objetivando atender à demanda de variados setores como a indústria automobilística, construção civil, máquinas e equipamentos, eletrodomésticos, utilidades domésticas, embalagens, recipientes, etc.

Seria, obviamente, impossível fazer uma lista completa de tudo aquilo em que se usa aço, uma vez que podemos encontrá-lo em todo tipo de projeto. O aço é a base para um número infinito de produtos desenvolvidos pela indústria.

1.1 Conceitos básicos aplicados à siderurgia

Metalurgia – é a ciência e a tecnologia de extração dos metais a partir de seus minérios, transformando-os e utilizando-os industrialmente. No caso particular da metalurgia do ferro, dá-se o nome de **siderurgia**.

A metalurgia do ferro consiste, basicamente, na redução dos seus óxidos por meio de um redutor que, em geral, é um **combustível carbonoso**.

Dentre as diversas matérias-primas necessárias à produção do aço, a mais importante é o minério de ferro, tanto em quantidade, quanto em custo.

O Brasil possui uma das maiores reservas de minério de ferro do mundo: acima de 49 bilhões de toneladas; apenas a Índia e a Rússia podem equiparar-se ao nosso país.

O ferro ocorre na natureza, sob diversas formas de minerais. Entretanto, apenas algumas dessas têm valor comercial como fontes de ferro. Dentre esses, os diversos minerais formados por óxidos de ferro representam a grande maioria das fontes de ferro para a indústria siderúrgica. São eles:

- **Magnetita (Fe_3O_4)** – corresponde a aproximadamente 72% de ferro e 28% de oxigênio, de coloração cinza escura a preta, com densidade $5,16 \text{ g/cm}^3$. É altamente magnética, permitindo facilmente a exclusão de resíduos indesejáveis do minério (canga). A magnetita é minerada principalmente na Suécia.
- **Hematita (Fe_2O_3)** – corresponde à composição, aproximada de 70% de ferro e 30% de oxigênio, sua cor varia de cinzenta à avermelhada, tendo densidade de $5,26 \text{ g/cm}^3$. É o minério de maior emprego na siderurgia. As maiores jazidas brasileiras estão localizadas em Carajás no estado do Pará.

Em muitas jazidas, há certas proporções de material friável que se desagrega facilmente, produzindo finos que não podem ser utilizados diretamente no alto-forno ou nos processos de redução. Estes finos são aglomerados em processos de sintetização e pelletização, produzindo material de granulometria controlada e de excelente rendimento nos altos fornos.

Ganga – é constituída de certos óxidos presentes no minério que, durante o processo de redução se funde, formando a escória.

Escória – a escória resulta da fusão do material inerte do minério (ganga), dos fundentes e das cinzas do coque ou carvão que, em altas temperaturas, reagem entre si formando silicatos (CaO.SiO_2 ; FeO.SiO_2 ; $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2$) ou aluminatos ($\text{MgO.Al}_2\text{O}_3$; $\text{CaO.Al}_2\text{O}_3$; etc.).

A-Z

combustível carbonoso

Possui alto teor de carbono.

Ex: carvão vegetal, coque metalúrgico.

A escória nos processos metalúrgicos desempenha funções importantes como:

- Separar a maior parte das impurezas do metal.
- Proteger o metal do superaquecimento, por possuir baixa condutibilidade térmica.
- Conservar o calor do metal.

Fundente – em todas as operações redutoras de fusão torna-se necessária a utilização de um fundente. Muitas impurezas têm ponto de fusão acima da temperatura de operação do forno. Sua presença em estado sólido não permite a sua saída do forno, tornando a separação do metal um processo quase impossível. A função do fundente é tornar as impurezas mais facilmente fusíveis, combinando-se quimicamente com elas, formando um composto de ponto de fusão mais baixo que os constituintes da escória.

Desoxidante – em todos os processos há uma fase de refino em que as impurezas são oxidadas. No fim do período de oxidação, aparecerá uma série de óxidos: FeO, SiO₂, MnO, P₂O₅, Al₂O₃, MgO. O oxigênio pode permanecer, parte sob a forma livre, parte sob a forma de óxidos.

A-Z

lingoteira

Recipiente onde o metal líquido se solidifica.

Durante o resfriamento do metal na **lingoteira**, pode ficar presa grande quantidade de óxidos, tornando o aço frágil. Para evitar isso, realiza-se a desoxidação que consiste em adicionar ao aço líquido um elemento que tenha afinidade com o oxigênio.

Material refratário – é uma substância infusível às mais altas temperaturas que se espera atingir em serviço. Essa definição não é completa, porque são exigidas muitas outras propriedades de um refratário em serviço, porém a infusibilidade é sem dúvida, a mais importante. Material refratário ideal é o que resiste ao calor, mudanças bruscas de temperaturas, pressão, combinação química, sendo, ao mesmo tempo mau condutor de calor e eletricidade. Não se conhece nenhum material que preencha todos esses requisitos.

Os refratários são essenciais nos processos de operações metalúrgicas, sendo usados em todos os fornos e recipientes que envolvem temperaturas elevadas.

O tipo de reatividade química dos refratários serve para a sua classificação em ácidos, básicos e neutros. O refratário ao ser usado para um dado propó-

sito, deve pertencer a uma classe não reativa quimicamente com as substâncias com que deva entrar em contato, quando em serviço.

Os principais constituintes dos refratários são: SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO , todos os óxidos são infusíveis nas temperaturas comuns na metalurgia, porém tornam-se mais ou menos ativos quando juntos uns com outros.

Carvão vegetal – é um tipo de combustível sólido e também redutor proveniente da destilação da matéria orgânica vegetal (madeira) na ausência de oxigênio.

Hoje, estudos sobre a possibilidade de fabricação de carvão a partir do babaçu, sabugo de milho e de bagaço de cana, estão sendo desenvolvidos, abrindo novas e promissoras perspectivas para o Brasil, ainda carente de combustível sólido.

Coque – é o resíduo carbonoso que se obtém da coqueificação de certas hulhas. A coqueificação é a decomposição por efeito do calor. Realiza-se por aquecimento do combustível isolado do contato do ar, mantendo o combustível isolado em retortas de destilação que recebem calor de uma fonte externa.

É um produto sólido, poroso, de cor cinza. Suas características físicas e químicas variam conforme o carvão empregado.

Ferro-esponja – é um ferro fabricado por um processo de redução direta do ferro de seus minérios, a baixas temperaturas (900°C), por intermédio do gás CO , H_2 , sem que haja fusão da matéria prima. É relativamente ferro puro. Serve como matéria-prima para a fabricação do aço, substituindo a sucata.

1.2 Fabricação de coque

O coque é utilizado como combustível e redutor nos altos fornos. Sua fabricação acontece da seguinte forma:

Durante os primeiros 150°C , realiza-se a secagem do carvão que consiste no desprendimento da água de umidade; até cerca de 300°C realiza-se o desprendimento da água de desidratação. Uma vez desidratado o carvão começa a amolecer progressivamente, passando por uma fase de verdadeira fusão, nítida no intervalo de 350 a 550°C , variando de um carvão para outro.

Nessa fase, dá-se intenso desprendimento de matérias voláteis, o que faz com que a massa em fusão aumente consideravelmente de volume, embora alguns carvões comecem a sofrer uma contração seguida de expansão. Em consequência desta simultaneidade da fusão e do desprendimento gasoso, a massa, ao solidificar-se, assume uma estrutura esponjosa, característica do coque.

Terminada a fase de fusão pastosa, a massa esponjosa vai se consolidando progressivamente, endurecendo cada vez mais, embora continue o desprendimento de vapores mais pesados. Tem-se então a fase de coqueificação propriamente dita. Em torno de 800°C o coque já está completamente solidificado, assumindo um aspecto muito escuro e sem brilho; mas acima de determinada temperatura começa a haver uma verdadeira cristalização ou grafitização do carbono do coque e que aumenta com a temperatura, conferindo-lhe a cor cinzenta e um aspecto brilhante e dureza cada vez mais elevada. Esta é a fase da hiper-coqueificação.

Todos esses gases e vapores que se desprendem durante a coqueificação são recolhidos e resfriados; os gases simples continuam como gases, mas os vapores se condensam num líquido viscoso (o alcatrão) e numa solução aquosa de compostos amoniacais (licor amoniacal).

A coqueificação se realiza em grandes câmaras que medem de 12 a 13 metros de comprimento e 3,5 a 4,0 m de altura, com paredes de alvenaria, dispostas paralelamente, de tal modo que, entre duas sucessivas, forme-se um sistema vertical de canais de chamas que as aquecem. Dezenas delas são dispostas em bateria e ao conjunto dessas células, dá-se o nome de **coqueria**, unidade industrial para a fabricação de coque em larga escala como mostra a Figura 1.2.

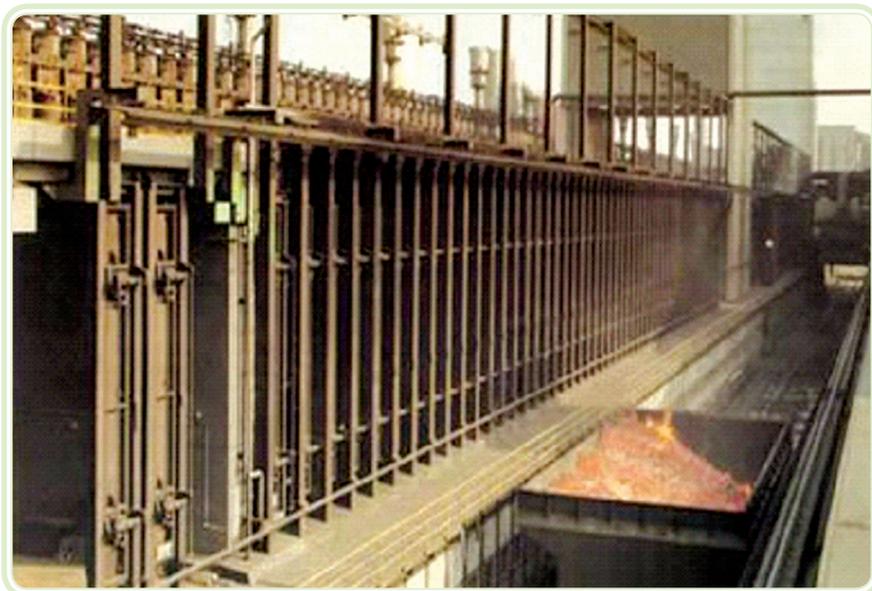


Figura 1.2: Bateria de coque

Fonte: www.dema.puc-rio.br/download/IEMAaulaAco.ppt

O coque é descarregado incandescente, numa temperatura de 1000 a 1100°C (Figura 1.3) e deve ser apagado imediatamente para evitar que se consuma por combustão com o ar. Para isso, o vagão cheio de coque, tão logo termina a descarga da retorta, é puxado até um túnel de comprimento igual ao do vagão (torre de extinção) e recebe uma descarga de água.

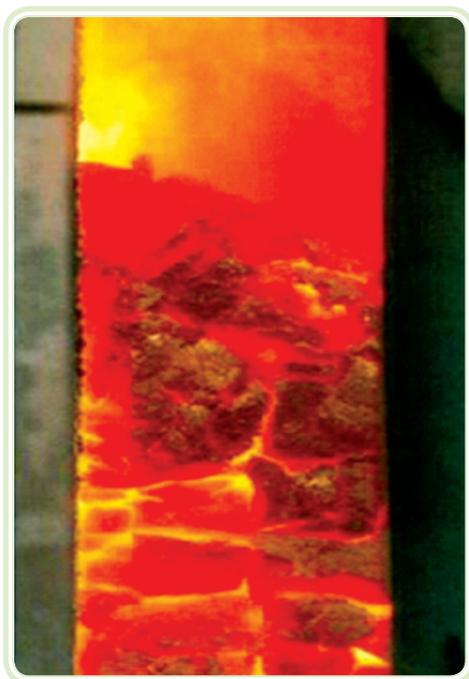


Figura 1.3: Coque incandescente pronto para ser descarregado

Fonte: www.dema.puc-rio.br/download/IEMAaulaAco.ppt

1.3 Sinterização

A lavra, classificação, manuseio e transporte do minério de ferro geram uma quantidade elevada de partículas finas e ultrafinas cuja aplicação direta na indústria siderúrgica é impraticável.

O desenvolvimento dos processos de aglomeração possibilitou que os finos de minério de ferro, antes considerados rejeitos de lavra, passassem a ter valor econômico ao se agregarem essas partículas com tamanho e qualidade que possibilitassem sua aplicação direta nos fornos siderúrgicos na forma de sinter e pelotas.

Da carga do alto-forno exige-se uniformidade e, principalmente, isenção de finos, faixa granulométrica estreita e suficiente resistência mecânica para assegurar boa permeabilidade à coluna de carga.

Os minérios não são carregados nos altos fornos tal como são recebidos das minas. Têm sido cada vez mais preparados antes do uso, por causa das modernas técnicas de redução.

O minério de hematita (Fe_2O_3) retirado da mina apresenta pedaços grandes que necessitam ser britados para ser utilizado no alto-forno. A britagem desse minério gera partículas finas que, somadas as já existem na mina ao natural, aumenta as dificuldades no processo de redução para se obter o ferro-gusa. Estes finos são separados e aglomerados em massas maiores, através da sinterização ou pelletização, que têm por finalidade melhorar a permeabilidade da carga metálica no alto forno, ou seja, fazer com que o contato esta e o gás redutor (CO), seja o melhor possível e assim consiga baixar o consumo do "coke rate" aumentando a velocidade de redução da carga.

A-Z

coke rate

Consumo de coque/tonelada de ferro-gusa.

Um bom sinter deve ter mais de 60% de ferro, o mínimo de enxofre e fósforo, boa resistência mecânica. Deve resistir a temperaturas elevadas e aos esforços no interior do forno sem amolecer.

No processo de sinterização os finos de minério, o coque (abaixo de 3 mm), o calcário e os finos de retorno são levados separadamente ao silos de mistura. De lá, são descarregados por meio de mesas dosadoras, ou de esteiras alimentadoras, dotadas de balanças automáticas sobre uma correia transportadora que os leva aos tambores da mistura.

Os vários materiais a sinterizar são misturados com os finos de retorno, adicionados à umidade, rolados em tambor para homogeneização e nucleação, com a finalidade de dar-lhes a permeabilidade adequada à subsequente operação de queima e, então, a mistura é distribuída uniformemente sobre a grelha por meio de uma calha vibratória ou, de preferência, de um rolo giratório.

Antes, para proteção, é colocada sobre a mistura, uma camada de sinter já produzida nas dimensões de 15 a 25 mm, numa espessura uniforme de 25 a 40 mm (falsa grelha).

As vantagens de se utilizar a falsa grelha são:

- As barras da grelha não estarão expostas a temperaturas elevadas.
- O bolo de sinter não ficará aderente à grelha.
- Grande parte da poeira arrastada pelos gases queimados fica retida e, conseqüentemente, é melhorada a eficácia dos coletores de pó e prolongada a vida do ventilador.

A carga é depositada em uma camada de 300 a 700 mm de espessura uniforme sobre essa falsa grelha passando, a seguir, sob uma coifa de ignição. Uma vez iniciada a queima do combustível contido na camada superior da mistura, a combustão propaga-se de cima para baixo, com uma velocidade de 1-3 cm/min, graças a aspiração do ar através da grelha. O ar, ao atravessar os poros da mistura fornece o oxigênio necessário para a combustão; os gases queimados servem principalmente para o preaquecimento do material a ser sinterizado. Na zona de combustão, a temperatura atinge, durante cerca de 1 minuto, 1000 a 1300°C, pouco abaixo do ponto de fusão dos minerais.

Então, as partículas se unem pelas zonas de contato em pedaços maiores. Devido à maior movimentação a temperaturas elevadas, íons ou moléculas difundem-se nos cristais vizinhos e causam a aglomeração ou o crescimento dos grãos. Terminada a queima, resulta um material poroso que depois é quebrado no tamanho adequado, resfriado e peneirado como mostra o fluxograma da Figura 1.4.

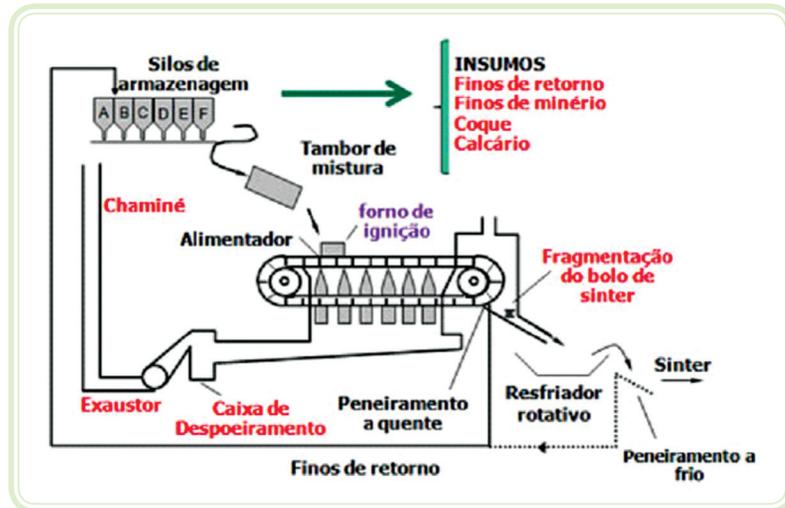


Figura 1.4: Fluxograma de sinterização

Fonte: www.dema.puc-rio.br/download/iemaaulaaco.ppt

1.4 Pelotização

É um processo de aglomeração na forma esférica denominadas pelotas, obtidas pelo rolamento (em tambores, cones ou discos) das partículas finamente moídas e umedecidas e depois submetidas à queima, à temperatura entre 1250°C – 1320°C, quando então a pelota é consolidada pelo intercrescimento dos grãos e reforçada pela fase escória, resultante das impurezas do minério e dos aglomerantes eventualmente adicionados (bentonita ou cal) como mostra o fluxograma da Figura 1.5.

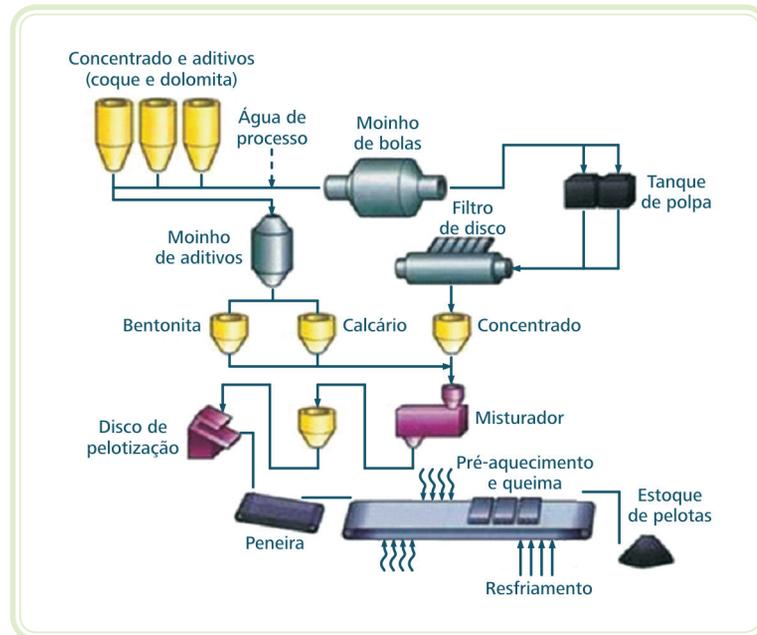


Figura 1.5: Fluxograma de pelotização

Fonte: www.dema.puc-rio.br/download/iemaaulaaco.ppt

Enquanto o material a sinterizar tem apenas 10% abaixo de 170 *mesh*, o destinado à pelletização tem mais de 75% abaixo de 250 *mesh*.

A-Z

mesh

Abertura da peneira em n° de divisões por polegada linear.

Na pelletização distinguem-se três etapas:

- Obtenção da granulometria adequada.
- Preparação da pelota crua.
- Endurecimento da pelota.

O tamanho das partículas vai de 180 *mesh* a 85% menor que 325 *mesh* como mostra a Figura 1.6.



Figura 1.6: Pelotas pronta para ser carregada no alto-forno

Fonte: www.dema.puc-rio.br/download/iemaaulaaco.ppt

As diferenças fundamentais entre os processos de sinterização e pelletização são apresentadas no Quadro 1.1.

Quadro 1.1: Diferenças fundamentais entre os processos de sinterização e pelletização

Sinter	Pelotas
Aproveitamento de finos de mineração abaixo de 8 a 0,25 mm	Aproveitamento dos finos de mineração abaixo de 0,5 mm
Pouca resistência mecânica	Elevada resistência
Fácil degradação durante o transporte	Baixa degradação no transporte
Tamanho do sinter: 5 a 100 mm em pedaços irregulares	Tamanho da pelota: 10 a 12 mm de formato esférico
25 a 50% de finos de retorno	5 a 10% de finos de retorno
Queima do combustível em contato com o minério	Aquecimento pelos gases quentes produzidos fora do leito de pelletização

Fonte: Araújo, 2007

1.4.1 Preparação de pelotas cruas

Tambores – de 2,5 a 3,5 metros de diâmetro e comprimento entre 2,5 a 3 vezes o diâmetro, inclinação de 2 a 5%, com uma velocidade de 80 a 170 m/min, o que corresponde a 10 a 20 rpm e uma produção máxima de 120 t/h de pelotas cruas. É o método mais antigo; tem a desvantagem de necessitar de um peneiramento das pelotas na extremidade de descarga a fim de mantê-las na faixa granulométrica desejada, o que exige maior resistência das mesmas, recirculando-se as partículas menores.

A qualidade da pelota crua, sua velocidade de crescimento e seu tamanho são controlados pela alimentação, umidade e grau de enchimento do tambor.

Cones – semelhantes aos tambores, têm a sua superfície lateral tronco-cônica. Seu diâmetro varia de 3 a 4 metros para a produção de 800 a 900 t/dia.

Discos – de 1,6 a 8,0 metros de diâmetro, inclinação de 25 a 65°, girando entre 10 a 30 rpm, o que imprime uma velocidade periférica de 30 a 90 m/min e atinge uma produção máxima de 150 t/h. Permitem uma classificação das pelotas devido ao seu bordo regulável. O material depositado no prato inclinado descreve uma trajetória elíptica, recebendo chuveiros de água para a nucleação. As bolinhas mais leves tendem a subir para o centro do disco, e as mais pesadas, acumulam-se na borda como mostra a Figura 1.7.

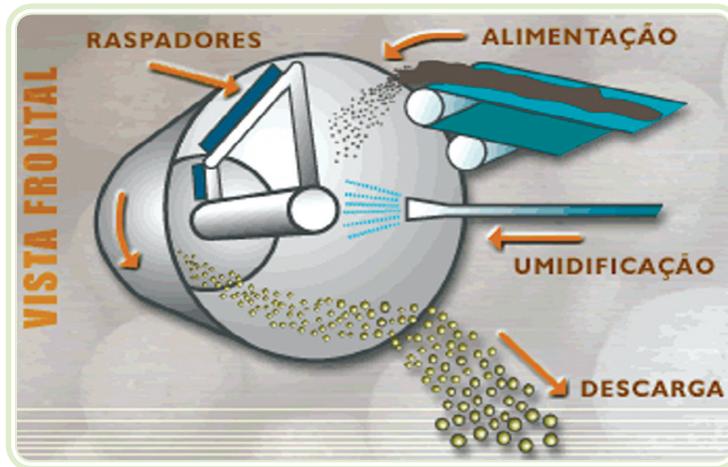


Figura 1.7: Preparação de pelotas

Fonte: http://www.infomet.com.br/site/img/siderurgia/02/2a_pelotizacao_01.gif

1.4.2 Aglomerantes

Devem desempenhar três funções:

- Dar à pelota crua condições de resistir ao transporte e manuseio subsequentes até chegar ao forno de endurecimento.
- Conseguir boa resistência ao choque térmico ao entrar no forno.
- Eventualmente, servir para formar compostos ligantes como $\text{CaO.Fe}_2\text{O}_3$, $\text{MgO.Fe}_2\text{O}_3$ e outros correspondentes à fase escória, resultante da combinação com a ganga do minério.

Como aglomerante usam-se 5 a 10 kg de bentonita por tonelada.

1.4.3 Queima das pelotas

Como as pelotas cruas são muito sensíveis mecanicamente, é necessário submetê-las a um aquecimento até aproximadamente 1300°C , durante o qual ocorre o crescimento dos grãos e reações entre os ácidos do minério e as bases das adições, formando eutéticos de baixo ponto de fusão.

Resumo

Os estudos dessa aula mostraram que o ferro é um dos metais mais comuns na crosta terrestre e que o aço é a base para um número infinito de produtos desenvolvidos pela indústria; que o ferro é extraído de jazida, que passa depois pelo processo de sinterização e pelotização antes de ser pro-

cessado no alto-forno para, então, ser transformado em ferro-gusa que é a matéria-prima necessária para a fabricação do aço; como acontece a fabricação do coque, um mineral que junto com o carvão vegetal é usado como combustível e redutor nos altos fornos.



Atividades de aprendizagem

1. Coloque (V) nas verdadeiras e (F) nas falsas:

- () O carbono que se incorpora ao gusa provém do combustível.
- () O enxofre que se incorpora ao gusa é proveniente do carvão vegetal.
- () A escória é obtida apenas através da fusão da ganga do minério.
- () O sinter é um material poroso que se apresenta em forma de esfera.
- () Os finos de minério são utilizados nos altos fornos apenas como pelotas.
- () A função mais importante do fundente é baixar o ponto de fusão da escória.
- () O fundente utilizado nos altos fornos é a cal.
- () A mistura para a fabricação do sinter é constituída apenas de finos de minério e coque.

2. Marque a alternativa **CORRETA**.

- a) O coque é obtido a partir da coqueificação do carvão vegetal.
- b) A escória básica em contato com refratário básico ataca mais que a escória ácida em contato com o mesmo refratário básico.
- c) A permeabilidade da carga não tem nenhuma importância na produtividade do alto-forno.
- d) As pelotas apresentam elevadas resistências mecânicas.
- e) Todas as alternativas estão incorretas.

3. A escória é importante na obtenção do ferro-gusa, pois:
- a) Tem alto valor comercial.
 - b) Protege a soleira docadinho do forno.
 - c) Permite reação química na interface com o metal.
 - d) Ajuda a evaporar o ferro-gusa.
4. Marque a alternativa **INCORRETA**:
- a) A preparação das pelotas cruas através de tambores é o método mais antigo. Tem a desvantagem de necessitar de um peneiramento das pelotas na extremidade de descarga a fim de mantê-las na faixa granulométrica desejada, o que exige maior resistência das mesmas, recirculando-se as partículas menores.
 - b) Pelotização é um processo de aglomerado de partículas ultrafinas de minério na forma esférica, obtida pelo rolamento em discos. As partículas são submetidas à queima, à temperatura entre 1250°-1320°, quando, então, as pelotas são consolidadas.
 - c) O tempo de permanência do metal e da escória , influi no desgaste dos refratários.
 - d) Refratários a base de SiO₂ são considerados básicos.
5. Determine o teor de ferro no minério de hematita (Fe₂O₃) com 80% de óxido.
6. Quais as características que o sinter deve apresentar para que seja considerado de boa qualidade?
7. Justifique a necessidade de se aglomerar o minério de ferro na forma de sinter ou pelotas.

Aula 2 – Obtenção do ferro-gusa

Objetivos

Identificar as matérias-primas e produtos obtidos nos altos fornos.

Conhecer as várias partes que compõem o alto-forno.

Analisar as reações que ocorrem no alto-forno.

Adquirir conhecimentos dos processos tecnológicos de redução indireta do minério de ferro e saber da importância em tratar os gases e a lama obtidos no alto-forno, visando reconhecer a melhoria de qualidade ao meio ambiente.

2.1 Obtenção

Ferro-gusa é o produto da redução do minério de ferro em alto-forno que contém elevado teor de carbono, devido ao contato próximo com o coque ou carvão vegetal os quais atuam como combustível e redutor simultaneamente.

Geralmente o ferro-gusa tem de 3,0 a 4,5% de carbono e uma grande quantidade de impurezas, por isso, não é utilizado industrialmente, devendo ser purificado antes da sua utilização. As impurezas principais são: carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre.

2.2 Alto-forno

É um aparelho metalúrgico destinado à fusão redutora do minério de ferro. De funcionamento contínuo e é constituído de um recinto único. Caracteriza-se pelo fato de que, em funcionamento, fica em contato com a carga e os gases, produzindo grandes reações entre eles.

Um alto-forno

- Só recebe carga sólida.

- Só serve para fusão, não efetuando refino.
- Só recebe carga porosa de modo a deixar passar pelos gases.
- Trabalha com os gases em contracorrente com a carga.
- Permite grande reações entre a carga e o gás.
- Utiliza como combustível coque ou carvão de madeira.

Os produtos obtidos no alto-forno são: gusa, escória, gás e poeiras.

O alto-forno é construído sobre fundações e sustentado por colunas de aço. Tem uma forma circular de vários diâmetros com cerca de 30 metros de altura. Construído de tijolos refratários e reforçado por uma carcaça metálica de aço na parte externa, como podemos observar na Figura 2.1.

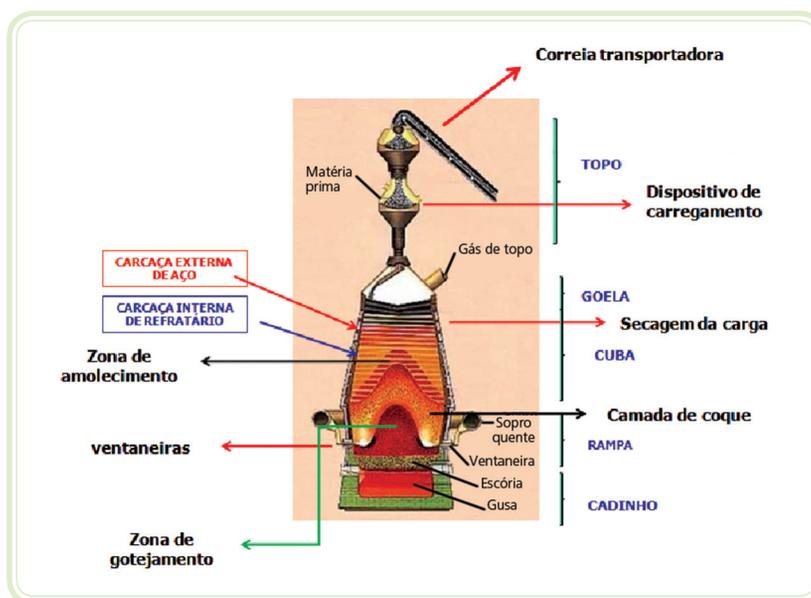


Figura 2.1: Corte do alto-forno

Fonte: <http://www.eeimvr.uff.br/psmetal.htm>

2.3 Partes que compõem o alto-forno

- **Cadinho** – é a parte mais baixa do alto-forno. Sua função é coletar o gusa e, por cima deste, a escória à medida que se forma.
- **Rampa** – está colocada sobre o cadinho e tem a forma tronco-cônica. É a zona de fusão dos materiais.

- **Ventre** – região cilíndrica sobre a rampa. Em alguns altos-fornos não há ventre, a rampa une-se diretamente à cuba.
- **Cuba** – tem a forma de uma grande seção tronco-cônica, com a base maior apoiada sobre o ventre (ou o cadinho).
- **Goela** – é a parte que está localizada acima da cuba. É revestida internamente de placas de desgastes que protegem o refratário do impacto da carga durante o enforamento.
- **Topo** – está localizado na parte superior do forno, onde se localizam os dispositivos de carregamento (cone grande, cone pequeno, distribuidor, dutos de gás, portas de explosão, sangradouros) e as plataformas de acesso a todos esses equipamentos.
- **Ventaneiras** – está localizada a 1/3 do cadinho. Seu número depende do diâmetro do forno. São feitas de cobre eletrolítico. Como estão expostas as temperaturas mais altas utiliza-se água de caldeira em circulação para sua refrigeração. É pelas ventaneiras que é insuflado o ar pré-aquecido para a queima do combustível, a fim de fornecer calor às reações químicas e fusão do ferro.

2.4 Funcionamento do alto-forno

O alto-forno é um trocador de calor à contracorrente. Os materiais como minério de ferro, pelotas, sinter, coque ou carvão de madeira, e fundente (calcário), são carregados alternadamente, pelo topo do alto-forno. Através da correia transportadora, aquecem-se e se reduzem ao contato de uma corrente ascendente de gás redutor quente.

Durante o processo de redução, transformam-se nos seguintes produtos: ferro-gusa, escória, gás de alto-forno e poeira. A redução dos óxidos de ferro se processa à medida que o minério, o agente redutor (carvão ou coque) e os fundentes descem em contracorrente em relação aos gases provenientes da queima do carbono com o oxigênio do ar aquecido soprado pelas ventaneiras.

Durante esse processo, a carga vem descendo no interior do forno, enquanto os gases resultantes da combustão do coque (ou carvão de madeira) na altura das ventaneiras, ao ascenderem através da coluna de carga, reduzem o minério e preaquecem os materiais. Durante o aquecimento, a composição

A-Z

calcinação

É o processo de aquecer a altas temperaturas, sem contudo atingir seu ponto de fusão, de forma a conseguir sua decomposição química e consequente eliminação dos produtos voláteis. A calcinação também é usada para a eliminação da água de cristalização.

dos integrantes da mistura vai se alterando (secagem e **calcinação**) até que se realizam as reações de redução, quando o oxigênio combinado com o ferro do minério passa, sob a forma de óxidos de carbono, a fazer parte dos gases. O processo de redução é acompanhado de outras reações químicas como a formação de carbonetos e fusão da ganga e dos fundentes que constituirão a escória.

A característica do movimento ascendente dos gases e descendente do material é de suma importância para o trabalho do alto-forno.

As proporções dos materiais empregados variam em função da prática operacional. Um exemplo seria: para uma carga de 1,7 t de minério, 0,65 t de coque ou carvão vegetal, 0,25 t de calcário e 1,8 a 2,0 t de ar, obtém-se 1 t de gusa, 200 a 400 kg de escória e 2,5 a 3,5 t de gás de alto-forno, normalmente usado para aquecimento em diversas partes de uma usina siderúrgica, por conter alto teor de CO₂.

Uma boa marcha do forno, isto é, alta produção com baixo consumo de combustível só é conseguida quando os gases ascendentes são aproveitados ao máximo, ou seja, quando deixam o alto-forno com o teor de CO₂ o mais alto e a temperatura a mais baixa possível.

Para isto, é importante que a permeabilidade da carga em toda a seção do forno seja uniforme, o que só é viável quando a carga tem uma boa granulometria. Se houver formação de caminhos preferenciais na periferia do revestimento ou no eixo do forno, tanto o seu calor sensível como a sua ação redutora não serão utilizados com eficiência.

É necessário que a carga do alto-forno apresente uma boa uniformidade e, principalmente, isenção de finos, faixa granulométrica estreita e suficiente resistência mecânica para assegurar boa permeabilidade à coluna de carga. O minério de ferro deve ter boa **reducibilidade** e elevado teor em ferro, para se obter baixo consumo de coque ou carvão vegetal.

A-Z

reducibilidade

É influenciada pela sua micro-porosidade, seu grau de oxidação e a natureza do ligante entre os grãos de óxidos.

2.5 Reações principais

O oxigênio do ar que é injetado preaquecido pelas ventaneiras reage com o carbono do combustível (carvão ou coque), gerando uma grande quantidade de calor para o processo e ainda um gás composto de CO, CO₂, H₂, CH₄, H₂O e N₂.

Segundo as reações:



Aproximadamente a 1 metro do nível das ventaneiras já não haverá mais oxigênio, e o gás estará formado integralmente de CO_2 que, em contato com o carbono incandescente, forma o CO. Assim:



Em resumo, a reação que ocorre frente às ventaneiras pode ser representada pela reação:



Em sua marcha ascendente através do forno o (CO) reage com os óxidos de ferro segundo as reações indiretas.



Acima de 1070°C a redução dos óxidos de ferro é concluída pelo carbono sólido incandescente, segundo as reações:



A 800°C começa a decomposição do calcário, segundo a reação:



A cal reage com parte da ganga e pequena parte dos óxidos de ferro e manganês não reduzidos para começar a formar a escória; o ferro reduzido absorve carbono, baixando seu ponto de fusão. Ambos gotejam pelos inters-

tícios do coque incandescente e caem no cadinho como pode ser observado na Figura 2.2.

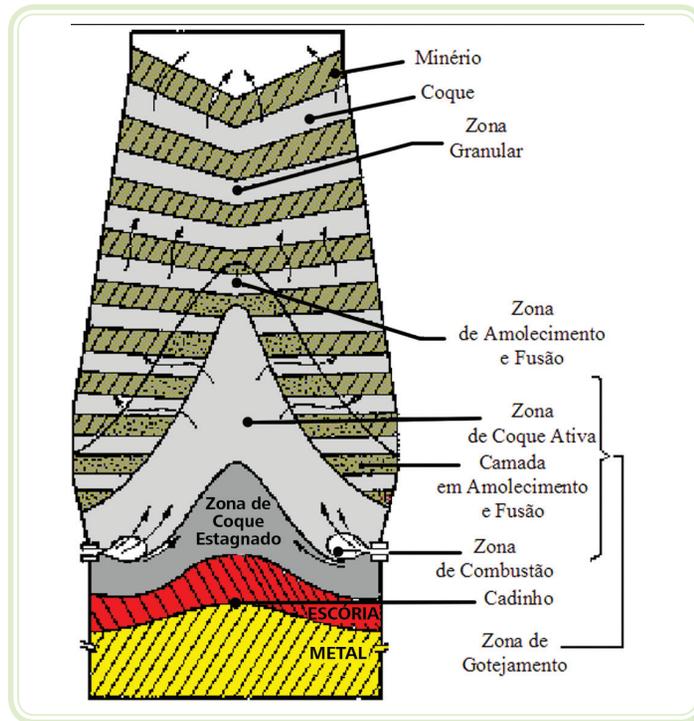


Figura 2.2: Zonas do alto-forno

Fonte: www.dema.puc-rio.br/download/IEMAaulaAco.ppt

O metal líquido no cadinho é então vazado em carro torpedo ou derramado em lingoteiras para solidificar como está ilustrado na Figura 2.3.

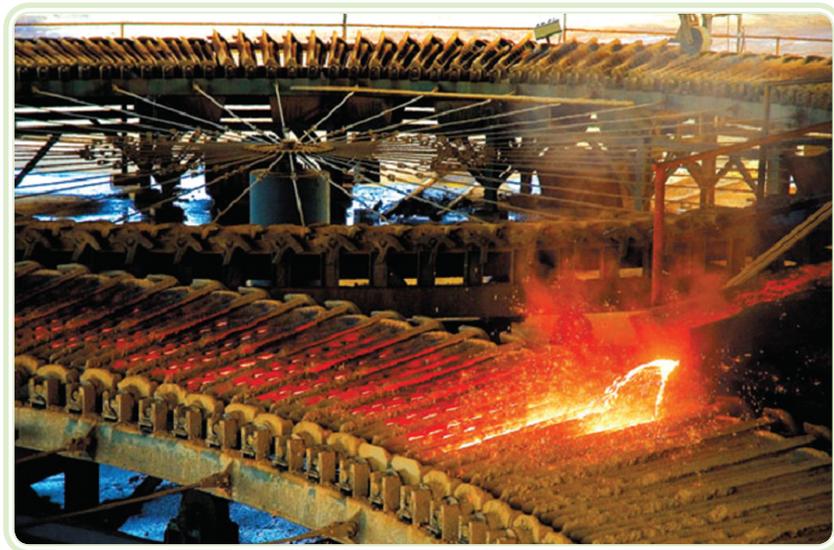


Figura 2.3: Lingotamento do gusa

Fonte: www.sinobras.com.br

Álcalis – são metais alcalinos (sódio e potássio) que se volatilizam parcialmente durante seu processamento no alto-forno; o restante passa a escória. Esses elementos provêm, principalmente, da cinza do combustível. Os álcalis depois de se volatilizarem, podem depositar-se nas regiões mais elevadas e menos quentes do forno, atacando o revestimento refratário ou formando cascões nas paredes.

Entre os efeitos nocivos dos álcalis nos altos fornos, destacam-se:

- Formações de cascões.
- Descida irregular da carga.
- Ataque ao revestimento refratário.
- Aumento das perdas térmicas do forno.

O cascão reduz a seção transversal do forno, resultando no aumento da velocidade dos gases, na conseqüente maior temperatura de topo e em maior arrasto de poeira. A região de maior probabilidade de ataque dos refratários silicaluminoso é a faixa de 1000 a 1400°C.

A escória resulta da fusão do material inerte do minério (ganga), dos fundentes e das cinzas do coque que, chegando as zonas mais quentes do forno, (região das ventaneiras), sem ser reduzidos reagem entre si e formam, principalmente: silicatos (CaO.SiO_2 , 2CaO.SiO_2 , FeO.SiO_2) e aluminatos ($\text{MgO.Al}_2\text{O}_3$, $\text{CaO.Al}_2\text{O}_3$, etc.).

A temperatura de fusão da escória depende de sua composição química. Assim, uma escória com 60% de sílica, 15% de alumina e 23% de cal começa a fundir a 1160°C; porém, mesmo com um superaquecimento de 400°C ou 500°C, ainda permanece viscosa. Por outro lado, uma mistura com 47% de sílica, 18% de alumina e 35% de cal inicia sua fusão a 1295°C e está inteiramente líquida a 1400°C.

Os óxidos de silício, de alumínio e de cálcio, isoladamente fundem a temperaturas elevadas como 1710°C, 2760°C e 2050°C respectivamente.

A combinação desses para a formação de silicatos ou aluminatos, resulta em compostos que têm um ponto de fusão muito mais baixo, da ordem de

1200°C a 1400°C. A sua formação quase sempre requer a adição à carga do forno de fundentes, contendo CaO para se obter determinada composição da escória.

A-Z

fluidez

Capacidade de escoar.

escória viscosa

Difícil de sair do forno.

Uma das propriedades mais importantes de uma escória é a sua **fluidez**. Uma **escória viscosa**, muito espessa, dificulta a operação do alto-forno, agarra-se ao revestimento, escorre lentamente e pode, eventualmente, colar-se ao coque na rampa, dificultando a normal distribuição da corrente gasosa.

A viscosidade da escória depende de sua composição e da temperatura. Com estudos desenvolvidos durante muitos anos, conseguiu-se verificar que a viscosidade da escória de alto-forno, depende da relação entre o teor de CaO + MgO e a soma SiO₂ + Al₂O₃.

Uma escória, na qual a relação CaO + MgO/SiO₂ + Al₂O₃ se aproxima da unidade, é fluida quando no estado de fusão e solidifica rapidamente numa massa petrificada com fratura opaca. Aumentando-se ainda mais o teor de cal, a escória perde sua fluidez, torna-se espessa. Esta basicidade mais alta torna a escória mais dessulfurante, porém mais viscosa.

A proporção da cal (CaO) tem importância especial para a remoção do enxofre. No trabalho em altos fornos a carvão de madeira, esta importância é secundária, pois aquele combustível contém baixíssimo teor de enxofre. O teor elevado desse elemento no coque exige uma maior quantidade de cal, por isso, a escória de altos-fornos básicos possui uma temperatura de fluidez mais elevada que as escórias ácidas dos altos-fornos a carvão vegetal. É necessário, portanto, trabalhar a temperaturas mais altas, aumentando o consumo de coque.

A menor temperatura permissível no cadinho é de 1370°C, sendo que 1700°C é a temperatura ideal de trabalho, onde se obtém boa fluidez e corrida fácil, para assegurar teores normais do gusa dentro de suas faixas desejadas, com consumo de coque o mais baixo possível.

A basicidade da escória é medida pela relação CaO + MgO/SiO₂ + Al₂O₃.

Quando for maior que 1 é básica e quando menor que 1 é ácida. Nos altos fornos à coque a escória é básica e o seu volume é de mais ou menos 320 kg/t de gusa.

A relação entre o CO e CO₂ nos gases de topo é, em geral, considerada um bom índice de eficiência da redução no forno. Se alta, a eficiência da redução é baixa, o que ocasiona o aumento do consumo de combustível; se baixa, a eficiência será alta.

Para se obterem melhores condições de redutibilidade, a relação CO/CO₂ deve ser entre 1,3 a 1,7.

2.6 Tratamento do ar e gases resultantes

O ar é préaquecido através de regeneradores. Ele é utilizado no alto-forno a uma pressão de 1 a 2 kg/cm², numa temperatura que varia de 650 a 1300°C. O forno consome de 4 a 5 t de ar para 1 t de gusa produzido. A umidade do ar representa uma perda de calor apreciável na operação do forno. Quando esta umidade é muito alta, deve-se retirá-la por condensação.

A corrente de ar, passando através do forno sofre certas modificações químicas e sai no topo como uma mistura de nitrogênio (N₂), gás carbônico (CO₂), monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂), vapor d'água (H₂O) e poeira. O teor de CO no gás de alto-forno é de 22 a 27%, fazendo com que este gás possa ser utilizado para diversas operações de aquecimento.

O gás, para ser utilizado, passa por um processo de limpeza das poeiras que contém. É levado pelo tubo de descida ao coletor de poeira, entra pela parte superior num tubo cônico cujo diâmetro vai se alargando progressivamente.

A primeira fase da depuração, no coletor de pó, submete a corrente gasosa a uma súbita desaceleração. A velocidade cai acompanhada de uma inversão de sentido do movimento; as poeiras mais pesadas depositam-se no fundo do recipiente. O pó é retirado do fundo do coletor por meio de um sistema de válvula dupla (para evitar a perda de pressão).

Para uma remoção mais completa, é necessário utilizar a via úmida, fazendo com que as partículas menores tornem-se mais pesadas, o que permite a sua separação.

Para isso necessita-se de que as gotas de água tenham dimensões semelhantes às das partículas, e que o tempo de contato entre o gás e a água seja o mais longo possível. As torres de lavagem e os **Venturi** cumprem bem este objetivo.

A-Z

Venturi

Tipo de lavador de gás que se destaca pela sua alta eficiência de coleta.

As torres de lavagem são reservatórios cilíndricos que contêm em seu interior chicanas de madeira, bandejas de grelhas cerâmicas, anéis de *Rasching*, ou mesmo vidro quebrados, de modo a criar um percurso mais acidentado e demorado para que o líquido de lavagem, borrifado por meio de chuveiros no topo da torre possa encontrar o gás que sobe em contra corrente.

A-Z

Nm³

Unidade de volume (normal metro cúbico).



Para saber mais e socializar os reforços dos conhecimentos adquiridos nesta aula, acompanhe a execução do vídeo através do *link* youtube alto-forno, desta forma seu estudo será mais proveitoso e prazeroso. <http://www.youtube.com/watch?v=UtMy4ZY3jgc>

O gás limpo contém menos de 0,01 g de material sólido por Nm³. Todo o processo pode ser visto na Figura 2.4.

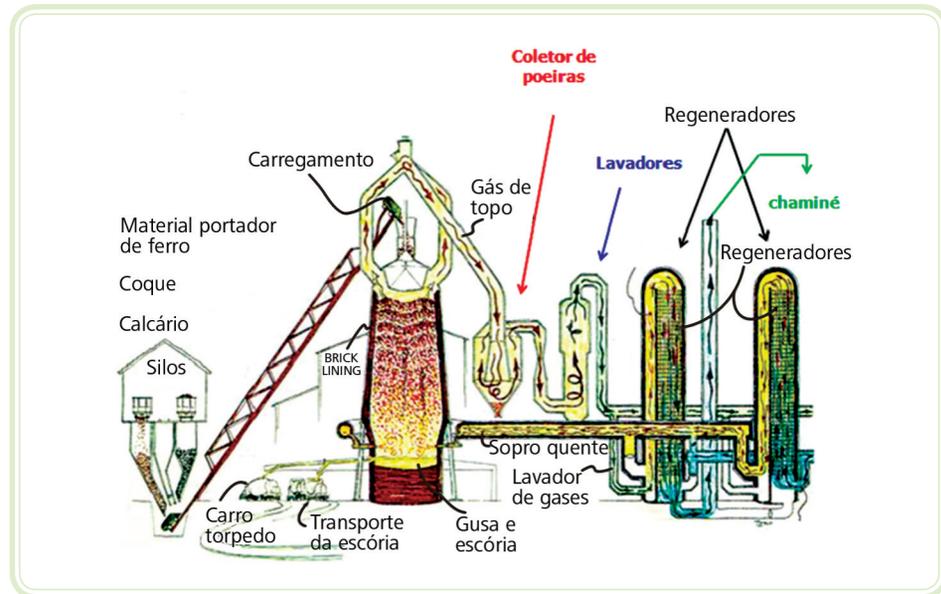


Figura 2.4: Tratamento do gás no alto-forno

Fonte: www.dema.puc-rio.br/download/IEMAaulaAco.ppt

2.7 Tratamento da lama

Um índice de 30 a 50% da poeira contida no gás é removido nos lavadores. Para recuperar a poeira, leva-se a lama aos espessadores, que são tanques circulares de concreto, com fundo cônico e em cuja parte central gira lentamente um eixo com braço. A água entra pela parte central e sai por um vertedouro circular na circunferência do tanque. Cada braço móvel tem raspadores dispostos de modo a empurrar o sedimento para o centro do reservatório cônico. A lama, com 40% de sólidos, é bombeada e levada a um sistema de filtros. A água retorna ao espessador e o bolo de filtragem, com 25% de umidade é levado à sinterização.

Resumo

Os estudos desta aula mostraram que o alto-forno é um trocador de calor à contra-corrente construído por uma carcaça metálica de aço revestida de tijolos refratários; e que o cadinho é a parte mais baixa onde é depositado o gusa, e, por cima deste, a escória à medida que se forma. Mostraram ainda as matérias primas e produtos obtidos assim como a maioria das reações químicas que acontecem no interior do alto forno em uma usina siderúrgica.

Mostraram também que a poluição ambiental exige um compromisso com o meio ambiente, daí a importância do tratamento do gás e poeiras obtidos no alto-forno.

Atividades de aprendizagem



1. Indique a alternativa **INCORRETA**.
 - a) Os altos-fornos de grande produção utilizam como combustível o carvão vegetal.
 - b) A permeabilidade da carga utilizada nos altos-fornos influencia na produtividade do forno.
 - c) Os altos-fornos a coque trabalham com escória básica.
 - d) O coque apresenta resistência mecânica mais elevada que o carvão vegetal.
2. No forno (A) obteve-se uma escória cuja relação $\text{CaO/SiO}_2 = 0,8$ e no forno (B) $\text{CaO/SiO}_2 = 0,9$. Com base nesses dados assinale a alternativa **CORRETA**.
 - a) O forno (A) apresenta menor acidez que o forno (B).
 - b) O forno (A) e (B) apresentam escórias básicas.
 - c) A escória (A) apresenta uma quantidade maior de CaO em relação à SiO_2 .
 - d) A escória (A) é mais ácida do que a (B).

3. Em relação aos altos-fornos, podemos **AFIRMAR**:

I – O fósforo que se incorpora ao gusa é proveniente do coque.

II – A função mais importante do fundente é baixar o ponto de fusão da escória.

III – O carbono que se incorpora ao gusa provém do combustível.

IV – O ferro-gusa obtido em altos fornos à coque apresenta baixo teor de enxofre.

V – A escória básica obtida nos altos fornos, possui uma temperatura de fluidez mais elevada que as escórias ácidas.

VI – A relação CO/CO_2 no gás de topo do alto-forno quando tende a baixar, mostra que está aumentando o consumo de combustível.

Estão corretas:

a) Somente I, III, IV e VI.

b) Somente II, V e IV.

c) Somente II, III, IV e V.

d) Somente II, III e V.

4. Em relação aos altos-fornos é correto afirmar que:

a) A permeabilidade da carga não influencia na produtividade do forno.

b) A até $800^\circ C$ a redução do Fe_2O_3 acontece apenas pela presença do carbono presente no combustível segundo à reação $FeO + C \rightarrow Fe + CO$.

c) O alto-forno que utiliza coque trabalha com temperatura mais elevada do que aquele que usa carvão vegetal.

d) Escória básica em contato com refratário básico ataca mais que a escória ácida em contato com o mesmo refratário básico.

5. Analise as alternativas.

I – A calcinação do minério de ferro para eliminar os materiais voláteis no alto-forno ocorre à temperatura de 150°C.

II – O volume de escória no alto-forno à coque é menor que o alto-forno a carvão vegetal.

III – A relação CO/CO_2 no gás de topo do forno fornece índice para saber a eficiência de redução da carga.

IV – O alto-forno à carvão vegetal trabalha com escória básica.

V – A função do fundente ($CaCO_3$) no alto-forno é baixar o ponto de fusão da escória.

Estão corretas:

a) Somente I e V.

b) Somente I e IV.

c) Somente III e IV.

d) Somente III e V.

6. O alto-forno é um aparelho muito sensível e, para manter sua boa *performance*, o operador deve conhecer bem todos os seus parâmetros. Com base nisso, quais os cuidados que se deve ter com as matérias-primas que irão compor o leito de fusão?

7. Explique o tratamento que o gás sofre ao sair do alto-forno.

Aula 3 – Obtenção do ferro-esponja

Objetivos

Analisar as alternativas da redução do minério de ferro.

Conhecer o processo *Midrex* para obtenção do ferro-esponja.

Estudar as várias etapas na fabricação do ferro-esponja.

Transformar o gás natural em redutor.

Analisar as vantagens do processo de redução direta em comparação à indireta.

3.1 Processos de redução direta do minério de ferro

O fluxograma da Figura 3.1 evidencia as duas formas de redução do minério de ferro: indireta obtida em alto-forno e direta em reator.

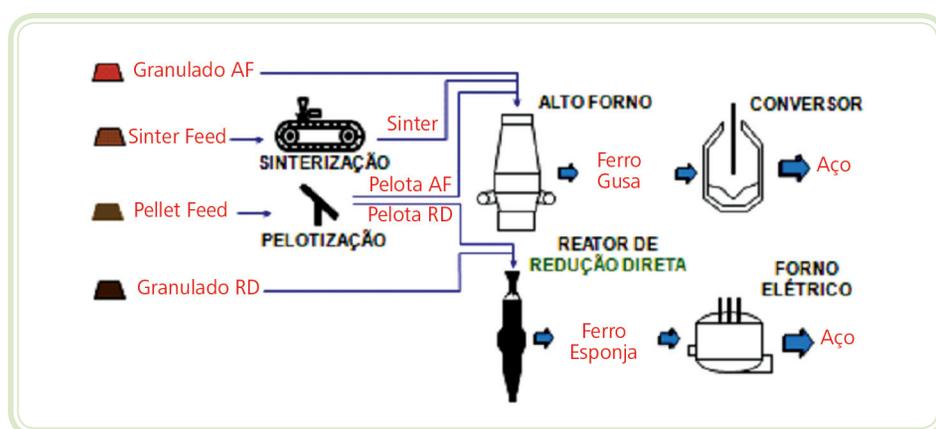


Figura 3.1: Fluxograma da redução do minério de ferro

Fonte: www.scribd.com/doc/.../Apuntes-Siderurgia-Generalidades-1

Os processos de redução direta são processos metalúrgicos para obtenção de ferro a partir de seus minérios, sem que haja a fusão da carga metálica

durante o processo. O produto de redução direta de minérios de ferro é denominado ferro-esponja que tem como objetivo substituir o gusa sólido ou a sucata utilizados como matérias-primas na fabricação de aços.

A redução direta encontra várias limitações, como:

- A obtenção de energia barata.
- A oferta de sucata de alta qualidade nos países industrializado.

Por causa desses fatores, a participação da redução direta na produção mundial de aço é inferior a 9%.

Dos vários processos de redução direta, estudaremos agora o processo *MIDREX* por ser responsável por mais de 65% da produção mundial de **DRI**. O reator opera à pressão ambiente, utilizando um gás redutor mais rico em CO que outros.

A-Z

DRI

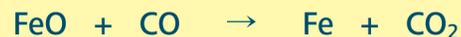
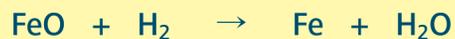
Directed Reduced Iron – é o ferro reduzido direto.

3.2 Processo Midrex

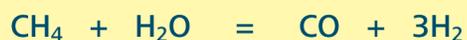
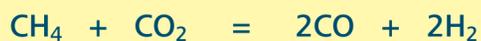
Foi desenvolvido na década de 60 pela *Midland-Ross*, em Portland, Oregon, EEUU. A carga metálica (minério ou pelotas) é carregada em forno de cuba que tem as seguintes zonas: preaquecimento, redução e resfriamento através de tubos de descida que, para eliminar a fuga de gases do processo, utilizam a injeção de gás inerte, evitando as válvulas de vedação.

O gás redutor, 95% de H₂ e CO, a uma temperatura entre 760 a 930°C penetra no forno de cuba através de orifícios na parte inferior da zona de redução, subindo em contracorrente à carga, retirando o oxigênio do minério granulado ou em forma de pelotas, conforme as reações:





O gás de goela parcialmente exaurido, contém 70% de CO e hidrogênio. Ao sair do forno, passa por um lavador onde é resfriado para condensar a água e separar as poeiras arrastadas. A maior parte desse gás é misturada com gás natural, pré-aquecida a 400°C e levada à unidade do “reformador”. Pela ação do catalisador (pentóxido de vanádio) a mistura de gases forma CO e H₂, conforme as reações



e, a temperatura de 900°C, contendo mais de 95% de CO e H₂, é reciclada para o forno de redução. O gás natural deve conter menos de 15 ppm de enxofre, para evitar o “envenenamento” do catalisador.

O excesso de gás de goela é queimado para aquecer a unidade do “reformador” e os gases queimados, a seguir aproveitados no recuperador de calor, preaquecendo o ar de combustão dos queimadores da referida unidade do “reformador” e, também, para aquecer o gás. Assim, o consumo de energia baixa.

O forno de cuba tem duas zonas independentes:

- Redução, onde o óxido de ferro em forma de pelotas é aquecido e tem o seu oxigênio removido pelo gás contendo hidrogênio e monóxido de carbono.
- Resfriamento, onde o gás esfria o ferro-esponja obtido e aumenta o seu teor de carbono.

As reações são as seguintes:

REDUÇÃO:



CARBONETAÇÃO:



O grau de metalização é de 92%, e o tamanho do produto, de 6 a 20 mm.

O ferro-esponja pode ser utilizado como tal, ou sob a forma de briquetado a quente. A Figura 3.2 mostra o processo completo.

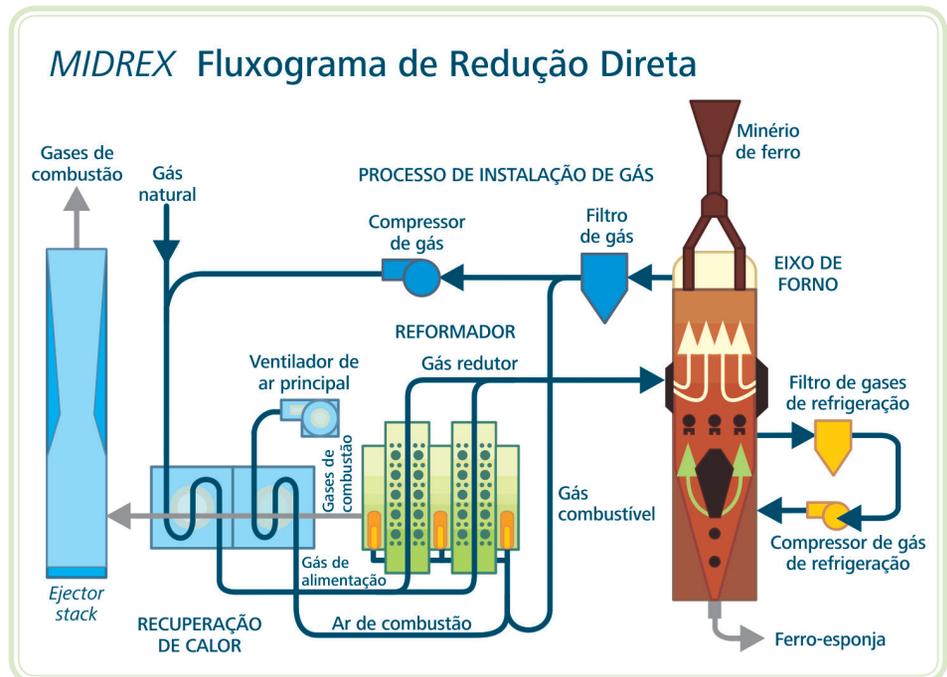


Figura 3.2: Processo Midrex

Fonte: www.scribd.com/doc/.../Apuntes-Siderurgia-Generalidades-1

3.3 Analogia entre os processos direto e indireto da redução do minério de ferro

São vantagens:

- Menor número de operações unitárias: redução e forno elétrico versus coqueria, sinterização, alto-forno, conversor e às demais unidades auxiliares.
- Menor investimento total: o custo das unidades de redução de fabricação do aço é praticamente igual. A diferença está na sinterização e coqueria que excedem largamente o custo da usina geradora de eletricidade do processo de redução direta.
- Não há manuseio de metal líquido: o ferro-esponja pode ser estocado, permitindo que o forno elétrico opere independentemente da redução direta. Uma usina convencional exige que a aciaria esteja locada ao lado do alto-forno.
- Flexibilidade no volume operacional: para se adaptar às condições do mercado, a redução direta pode trabalhar até a 30% de sua capacidade, enquanto o alto-forno não funciona bem abaixo de 80%.
- Sistema de gases mais simples, especialmente nas unidades de redução direta trabalhando com gás natural; a usina convencional tem que tratar e utilizar os gases do alto-forno, da coqueria e do conversor.
- Menos rejeito sólido: com redução direta/forno elétrico gera-se apenas uma escória, enquanto que com alto-forno/conversor são produzidas duas, além de pó de coletor e moinha de coque.
- Maior flexibilidade no emprego de sucata: com redução direta/forno elétrico pode-se trabalhar entre 0 a 100% de sucata, enquanto com alto-forno/conversor só até 30%.
- Menor tempo de implantação: com redução direta/forno elétrico, entre 2 e 4 anos e com alto-forno/conversor, entre 5 a 6 anos.
- O rápido aumento do lingotamento contínuo resultou na diminuição de sucata gerada internamente na usina de aço, fazendo que o forno elétrico passe a comprar maiores quantidades de sucata de obsolescência.

Apesar de tanta atratividade, a redução direta ainda encontra resistência no caminho da comercialização. Talvez os insucessos de outros investimentos ocorridos anteriormente, a incerteza da siderurgia mundial, a escassez de capital, a falta de políticas governamentais ou o conservadorismo do setor sejam as razões.

Por outro lado, os custos elevados do redutor gasoso e os resultados pouco convincentes com o emprego de redutores sólidos, limitam a utilização da redução direta aos países que tenham gás natural em excesso.

Resumo

Nessa aula apresentaram-se conhecimentos sobre a elaboração do ferro-esponja pelo processo *Midrex*, a partir das matérias primas disponíveis até a obtenção dos produtos. Conheceram-se as reações químicas que ocorrem no interior do forno, na redução das pelotas e na reforma do gás natural em gás redutor para ser utilizado no forno *Midrex*.

Também analisam-se as vantagens do processo de redução direta em comparação à indireta.



Atividades de aprendizagem

1. Assinale a alternativa **INCORRETA**:

- a) A aplicação de recursos em novas tecnologias para a redução direta do minério de ferro tem como objetivo baixar o custo do aço e tornar o processo mais limpo.
- b) O preço relativamente reduzido é uma vantagem do ferro-esponja.
- c) Os novos processos de redução direta do minério de ferro elimina totalmente o uso da coqueria.
- d) O processo *Midrex* utiliza o gás natural como redutor sem nenhum tratamento de reforma.

2. A composição do gás utilizado como redutor no processo *Midrex* é

- a) 30% CO, 50% H₂, outros.

b) 90% CH₄, 10% C₂H₆.

c) 25% CO, 20% CO₂, 30% H₂, 25% H₂O.

d) 50% CO, 30% H₂, outros.

3. O surgimento dos chamados “novos processos de produção de ferro primário”, tem como vantagem(ns)

I – Eliminar a coqueria.

II – Reduzir o minério de ferro utilizando carvão vegetal.

III – Diminuir o consumo de coque.

IV – Menor impacto ambiental.

V – Substituir o uso de sucata na fabricação dos aços.

Está(ao) correta(s):

a) Somente I.

b) Somente IV e V.

c) Somente IV.

d) Somente I, IV e V.

4. Como se obtém o gás redutor utilizado no processo *Midrex*?

5. Descreva de forma resumida a obtenção do ferro-esponja pelo processo *Midrex*.

Aula 4 – Obtenção do aço pelo processo LD

Objetivos

Conhecer o conversor LD e suas vantagens em relação a outros processos.

Identificar as etapas da fabricação do aço pelo processo LD.

Analisar as reações de oxidação das impurezas que ocorrem dentro do conversor.

Classificar os aços quanto ao teor de oxigênio e a sua aplicação.

Reconhecer a importância do tratamento do gás gerado no conversor.

Aciaria – é a unidade de uma usina siderúrgica com a função de produzir aço em forma de produtos semiacabados (tarugos, **lingotes**, placas, etc.).

Nessa unidade da fábrica, a matéria prima é transformada em aço através de um processo metalúrgico que envolve calor.

Aço é toda liga ferro-carbono com teor de carbono, variando de 0,008 a 2,0%, maleável e que apresenta em sua composição química elementos como o silício, manganês, fósforo e enxofre, resultante do processo de fabricação e em porcentagens pequenas.

A composição química de um aço é parâmetro muito importante. Quando o aço não estiver conforme a composição estabelecida (fora da faixa), e suas propriedades não forem próprias para o fim a que elas foram projetadas, o aço é desclassificado e precisa ser sucateado, causando prejuízo a empresa.

A Figura 4.1 mostra o fluxograma de produção de aço através do processo LD e forno elétrico.

A-Z

lingotes

É uma massa de metal, que após ter sido aquecida a uma temperatura superior ao seu ponto de fusão é vertida num molde, tomando uma forma que torna mais fácil o seu manuseamento, geralmente uma barra ou um bloco.

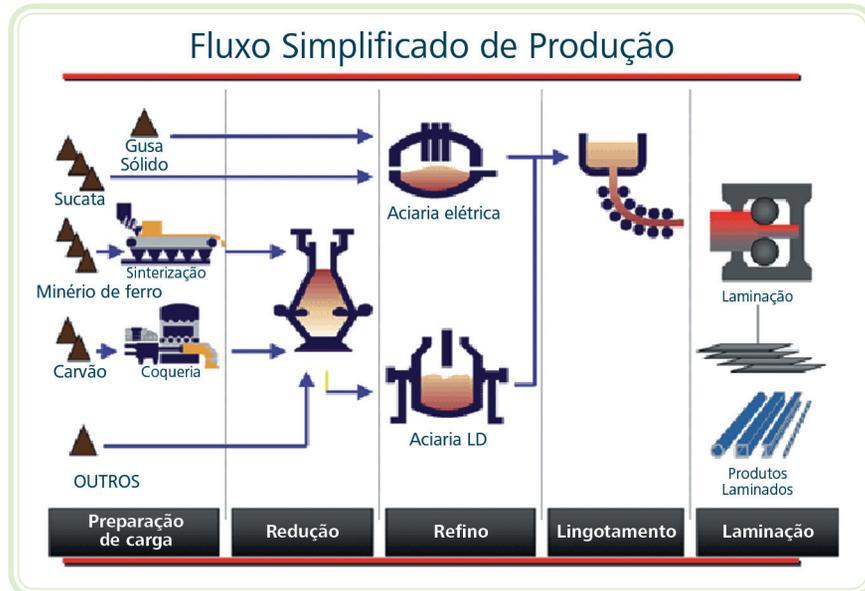


Figura 4.1: Fluxograma de produção de aço

Fonte: http://www.ibs.org.br/siderurgia_usos_fluxo.asp

4.1 Origem do processo

A utilização do oxigênio puro para a transformação do gusa em aço foi conseguida por Sir Henry Bessemer em 1856, porém as dificuldades em dispor do oxigênio puro, em quantidades industriais, não permitiram a realização prática da ideia. Somente depois do desenvolvimento das grandes instalações para a produção do oxigênio é que a ideia foi novamente retomada por vários metalurgistas.

Vários trabalhos experimentais foram realizados na Usina de Linz na Áustria durante a década de 40. A primeira corrida, de 15 t, foi realizada pelo professor Robert Durrer em outubro de 1949. Os resultados foram tão satisfatórios que, em dezembro de 1949, foi decidida a instalação de uma aciaria LD com conversores de 35 t, iniciando sua operação em dezembro de 1952, data que marca o nascimento do processo LD.

O nome LD vem das iniciais "L" da cidade Austríaca Linz e "D" de Durrer, o professor que desenvolveu o processo.

A primeira aciaria LD fora da Áustria entrou em operação em agosto de 1954, na usina de *Dominion Foundries* no Canadá, e a *MClouth Steel Corp* nos EUA. Em 1957, uma série de outras usinas entrou em operação, nas

Américas, Ásia e Europa. A primeira instalação no Brasil foi a Belgo Mineira em 1957, seguida da Companhia Siderúrgica Nacional, Cosipa.

A grande produtividade, custos mais baixos nas instalações em comparação com outras aciarias, nenhum consumo de combustível, consumo de refratários e mão de obra menor, são fatores que contribuíram para a rápida evolução do processo que hoje é responsável por mais de 70% da produção mundial de aço.

As vantagens do processo LD:

- Rapidez da transformação do gusa em aço.
- Reaproveitamento da sucata de recirculação (gerada dentro da própria usina) que corresponde a 23% do aço bruto. Essa sucata é isenta das impurezas, o que não ocorre com a sucata externa (ferro velho) que pode conter uma série de elementos contaminantes.
- Comparando com a aciaria S-M, o investimento inicial é da ordem de 40% e o custo operacional, 50% menor.

O oxigênio é introduzido no processo LD das seguintes formas:

- Por cima** – através de uma lança suspensa localizada na boca do conversor.
- Pelo fundo** – através de tubeiras constituídas de dois tubos concêntricos onde o O_2 é introduzido pelo tubo interno e um hidrocarboneto (gás natural ou óleo combustível) como resfriador, pelo tubo externo.
- Combinados** – normalmente injetando oxigênio por cima através de uma lança, e o gás inerte pelo fundo do conversor, pelas tubeiras, para agitar o banho. Existem usinas que injetam parte do oxigênio (20% a 40%) por cima e o restante pelas tubeiras do fundo, junto com cal em pó que entra em contato direto com o banho. Os resultados seriam reações mais rápidas e completas, menor teor de FeO na escória, menores perdas térmicas, comparados com o LD convencional, conforme mostra a Figura 4.2.

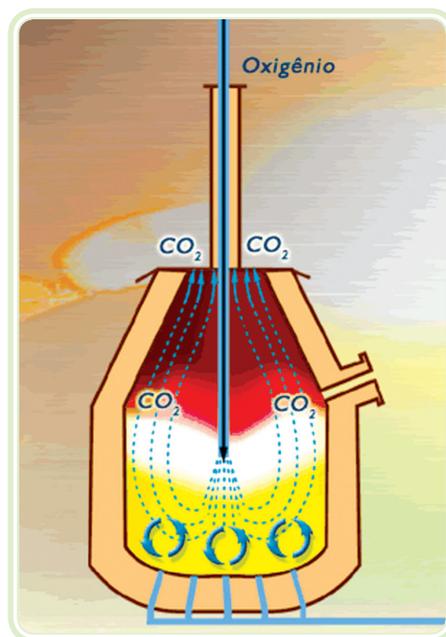


Figura 4.2: Conversor LD

Fonte: Rizzo, 2006

4.2 Descrição do conversor

O conversor LD é um recipiente de forma cilíndrica montado em munhões, capaz de girar completamente em torno de um eixo horizontal, e é acionado por um conjunto de motores e redutores. A carcaça de aço tem uma forma – base fechada de forma côncava, uma seção cilíndrica intermediária (barril) e uma seção cônica onde está o canal de vazamento que permite a separação do aço e da escória durante o vazamento.

Uma coifa coletora de gás refrigerada a água, é instalada exatamente acima da boca do conversor, na posição vertical. A lança de oxigênio consiste de três tubos concêntricos de aço sem costura, terminando em um bocal de cobre eletrolítico, por onde flui o oxigênio. A ponta da lança contém 3 a 5 dutos em forma de venturi, para obter a velocidade supersônica. A inclinação dos bocais é de 7 a 10° em relação ao eixo da lança e à vazão, da ordem de 7 a 11 m³/seg e possui movimento na vertical.

4.3 Operação do conversor LD

O conversor é girado em direção ao lado de carregamento, como mostra a Figura 4.3. A sucata é carregada por uma calha através da ponte rolante, seguindo-se o gusa líquido. Normalmente a única fonte de calor para o pro-

cesso é fornecida pela oxidação do gusa líquido, e isso limita a quantidade de sucata carregada. A carga metálica geralmente varia de 70 a 75% de gusa líquido. O restante é constituído da mistura de vários tipos de sucata. Colocado na posição vertical, introduz-se a lança de oxigênio até a altura pré-determinada (0,8 a 1,0 metro distante do metal líquido).



Figura 4.3: Carregamento do gusa líquido no conversor LD

Fonte: Novo milênio – Histórias e lendas de Cubatão

4.3.1 Sequência de operação

A Figura 4.4 ilustra a sequência de operação do conversor LD.

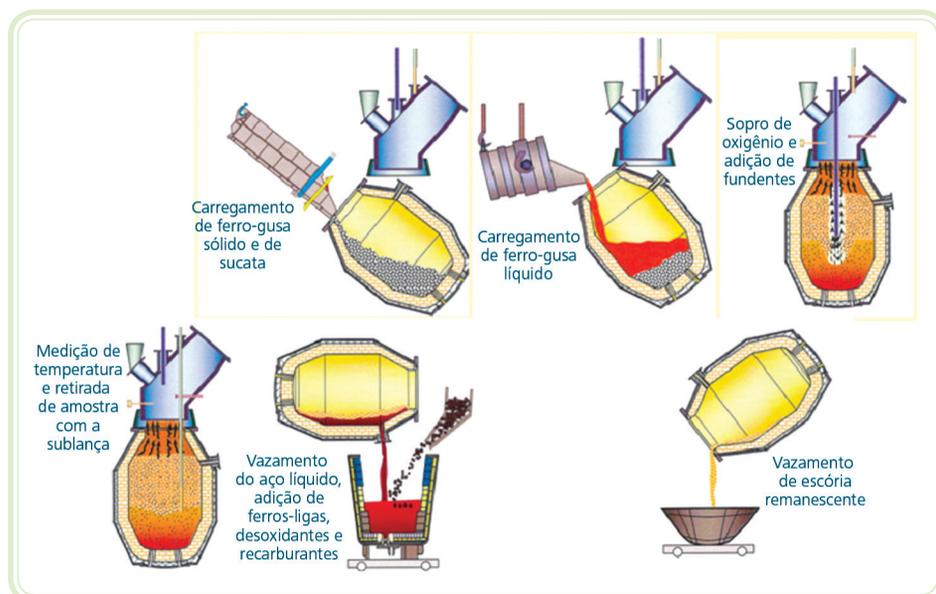


Figura 4.4: Sequência de operação do conversor LD

Fonte: Rizzo, 2006

- a) Carregamento de sucata.
- b) Carregamento do gusa líquido.
- c) Início do sopro de oxigênio.
- d) Vazamento do aço.
- e) Vazamento da escória.

Após a ignição que ocorre depois de alguns segundos, faz-se o carregamento por meio de silos montados sobre o conversor de materiais escorificantes tais como cal e fluorita que são utilizados para formar uma escória básica. Esses fundentes com peso conhecido são liberados gradualmente para o interior do conversor.

O tempo de sopro de oxigênio de alta pureza (99,5%) varia de 17 a 18 minutos, e o tempo total da corrida varia aproximadamente de 36 a 40 min, como indica a Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Tempo total da corrida	
Operação	Tempo em min
Carga	5
Sopro	18
Fim do sopro a vazamento	6
Vazamento	5,5
Retirada da escória	2,5

O rendimento em aço produzido em relação aos materiais carregados é da ordem de 90%. O consumo de oxigênio é aproximadamente de 57 N/m³ por toneladas de aço.

4.4 Matérias-primas utilizadas no conversor

As principais matérias-primas utilizadas na fabricação do aço pelo processo LD são o gusa líquido, gusa sólido, sucatas de aço e ferro fundido, cal, fluorita e oxigênio.

4.4.1 Gusa líquido

Constitui a parte predominante da carga metálica sendo o seu conteúdo térmico, em termos de composição química e temperatura responsável por quase todo o calor gerado no processo.

A proporção de gusa líquido na carga do conversor depende:

- De sua composição química e temperatura.
- Da qualidade do aço a ser produzido.
- Da qualidade da sucata utilizada no processo.
- Das partes das dimensões do conversor.

Normalmente varia entre 70% para grandes conversores produzindo aços baixo carbono; a 85 a 90% para pequenos conversores produzindo aço de alto carbono

O gusa é vazado do alto forno a uma temperatura de aproximadamente 1450°C, até chegar a estação de gusa na aciaria há uma perda de 135°C.

Dentre os elementos indesejáveis presentes no gusa líquido, o mais problemático é sem dúvida, o enxofre. Durante o refino oxidante, a reação de dessulfuração é prejudicada, e o aço no final de sopro contém cerca de 60% do enxofre carregado. Assim, a produção de aços com teores de enxofre da ordem de 0,015% exigiria a utilização de um gusa líquido com teor na faixa de 0,015 a 0,025%. observa-se, entretanto, que a obtenção de um gusa líquido com teores de enxofre no alto-forno reduz bastante a produtividade desse equipamento, tornando essa operação antieconômica, quando comparada aos menores custos envolvidos no tratamento de dessulfuração do gusa feito no próprio carro torpedado.

O teor de enxofre tolerado nos aços é de no máximo de 0,05%. A presença dessa impureza é facilmente notada ao microscópio, pois forma inclusões de sulfeto que são visíveis mesmo antes de qualquer ataque.

O enxofre combina-se com o manganês e com o ferro formando sulfeto de manganês (MnS) e sulfeto de ferro (FeS). O de manganês solidifica-se a 1600°C e o de ferro a 1000°C no eutético com o ferro.

Como o enxofre tem maior afinidade com o manganês do que com o ferro, na solução sólida dos dois sulfetos haverá predominância do de manganês, sempre que a percentagem deste seja suficientemente alta. O contrário se dará se o teor de manganês for baixo ou insuficiente.

O sulfeto de manganês (MnS) se solidifica em temperatura alta, próxima à de solidificação do próprio aço e, à temperatura em que se lamina o metal, esse composto é relativamente plástico, o que faz com que ele se deforme e se alongue no sentido em que o material é trabalhado. Sua presença no aço não é, por isso muito nociva.

Quando se forma o sulfeto de ferro (FeS), verifica-se que acima de 988°C pode ocorrer a fusão do eutético Fe-FeS.

Se o aço for deformado acima dessa temperatura, isto é, se for laminado, irá se romper com surpreendente facilidade. É a fragilidade a quente.

Aços com teores proposadamente alto de enxofre (0,1 a 0,20%) a fim de facilitar a usinabilidade das peças, têm que possuir na sua composição química um teor de manganês elevado, da ordem de 1,65% aproximadamente, para evitar a formação do FeS.

O gusa líquido deve ser transportado para aciaria com o mínimo de perdas de calor. Este transporte é realizado pelo carro torpedo que possibilita a dessulfuração em instalação própria, através da injeção de CaC_2 e gás inerte submergido por uma lança como mostra a Figura 4.5.

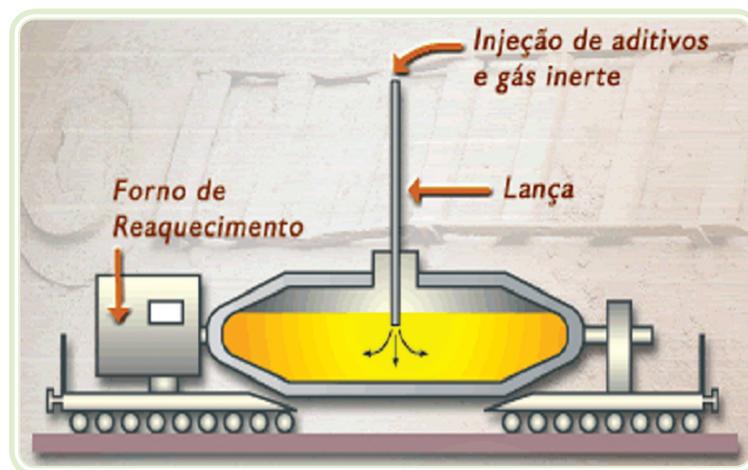


Figura 4.5: Dessulfuração do gusa no carro torpedo

Fonte: Rizzo, 2006

A reação que ocorre é a seguinte:



4.4.2 Sucata

A utilização de material refrigerante na carga do conversor LD é imprescindível para o controle de temperatura do metal do final de sopro. Sob o ponto de vista de rendimento, é mais vantajoso utilizar uma maior proporção de sucata de aço, uma vez que o seu teor em ferro é superior ao do gusa, e a do ferro fundido, que são outras possíveis adições refrigerantes.

A sucata de aço pode ser classificada de acordo com sua composição química, dimensões, densidade e seu grau de contaminação.

As dimensões da sucata devem ser tais que permitam a sua completa fusão durante o tempo de sopro e, portanto, a sucata pesada de retorno (lingotes sucitados, lingotes curtos, sucatas de placas) deve ser previamente preparada.

4.4.3 Cal

Na fabricação de aços pelo processo LD, a característica essencial das reações de refino é a oxidação parcial do carbono, manganês, silício, fósforo, enxofre e outros elementos residuais de carga metálica.

A adição de cal é então necessária para neutralizar os óxidos ácidos formados nas reações de oxidação que, de outra maneira, atacariam violentamente o revestimento básico do conversor e para a obtenção de um índice de basicidade (CaO/SiO_2) adequado, imprescindível a uma boa dessulfuração e desfosforação.

Por outro lado, deseja-se que a dissolução da cal seja a mais rápida possível, de maneira a manter a trajetória de composição da escória em condições de alta basicidade a maior parte do tempo. Por isso, a cal deve ser acionada no início do sopro do oxigênio.

4.4.4 Fundente

A função mais importante do fundente é o abaixamento do ponto de fusão da escória; outra função importante é a sua influência sobre a viscosidade da escória. A diminuição dessa viscosidade facilita a impregnação da cal pela escória e dificulta a formação da camada composta de silicato.

A fluorita, constituída basicamente de fluoreto de cálcio, é utilizada como fundente da cal para acelerar a sua dissolução e aumentar a fluidez da escória muito viscosa.

4.4.5 Cal dolomítica

A utilização da cal dolomítica foi iniciada em 1962-1963, e o seu consumo varia de 0 a 50% do peso da cal carregada. A sua utilização visa principalmente à redução do consumo de refratário, além da dissolução da cal.

Normalmente a cal dolomítica contém de 30 a 40% de MgO, 50 a 60% de CaO, 2 a 4% de Fe₂O₃ e 2% de SiO₂.

4.4.6 Oxigênio

O processo LD utiliza oxigênio de elevada pureza, a fim de manter os teores de nitrogênio do aço dentro dos limites exigidos para a boa qualidade do produto. O valor mínimo aconselhável é de 99% de O₂, sendo ideais valores na faixa de 99,7 a 99,8% com restante constituído de argônio e cerca de 50 ppm de nitrogênio.

É importante a altura da lança em relação ao metal líquido. Lanças muito próximas permitem que haja oxidação direta do ferro no metal. O oposto faz aumentar em muito o teor de FeO na escória. Ambos os extremos resultam em menores rendimentos metálicos e enfatizam a importância do controle da altura da lança que deve ser de 0,8 a 1,0 metro do metal líquido.

4.4.7 Ferros-ligas e desoxidantes

Os ferros-ligas e desoxidantes são materiais utilizados para acertos de composição química do aço e para retirar parte do oxigênio contido no metal. É necessário e fundamental que os rendimentos das adições dos ferros-ligas sejam os mais elevados possíveis. Esse rendimento depende de vários fatores. Os principais são a oxidação do banho e a quantidade de escória que cai na panela. Uma operação bastante eficiente é quando esta adição é feita na panela de vazamento com injeção de gás argônio sob pressão pelo fundo como indica a Figura 4.6.

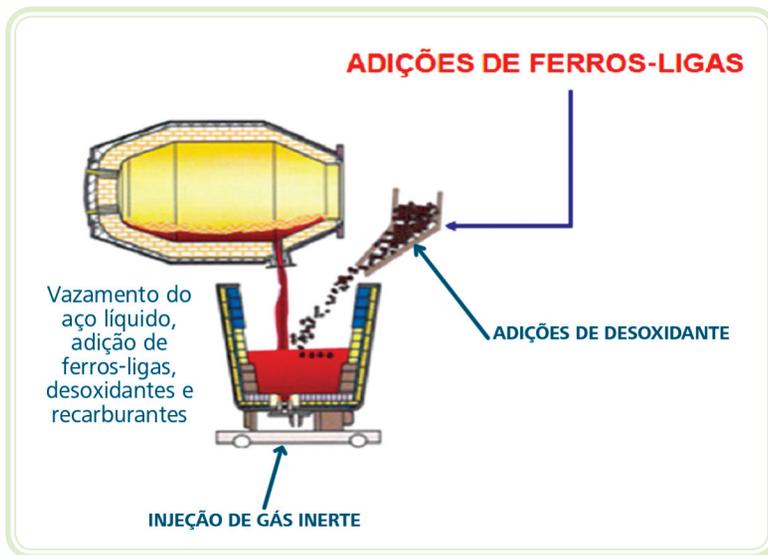


Figura 4.6: Adições de ferros-ligas

Fonte: Rizzo, 2006

4.4.8 Refratários

A carcaça de aço do conversor LD é revestida com uma camada de tijolos refratários à base de magnésio.

O número de corridas conseguidas com revestimento refratário depende não só da qualidade do material utilizado e das técnicas de reparo adotadas, mas também da prática operacional.

As principais causas de desgaste dos refratários do conversor LD são:

- Ataque pela escória.
- Desgaste mecânico devido ao carregamento de sucata pesada.
- Temperatura de fim de sopro.
- Resfriamento acentuado do conversor durante as paradas de operação.

Para diminuir o consumo de refratário do conversor é feita a adição de cal dolomítica, para que haja uma saturação da escória em MgO.

4.5 Classificação dos aços quanto ao teor de oxigênio e sua aplicação

4.5.1 Aços efervescentes

São aqueles em que apresentam baixo teor de carbono (abaixo de 0,08%) e um teor de oxigênio acima de 200 ppm. Com isso a desoxidação continua na lingoteira, com a evolução de CO e CO₂, e a superfície do lingote permanece líquida durante certo tempo. Essa fervura pode ser interrompida por meios mecânicos (adições de placas pesadas de gusa) ou químicos (adições de alumínio).

Os aços efervescentes têm:

- **Melhor superfície** – a efervescência impede a aderência de óxidos às paredes da lingoteira; menor perda na tesoura do **laminador desbastador**, pela quase ausência de bolsa de solidificação, ausência de elementos muito oxidáveis capazes de causar inclusões muito duras (SiO₂ ou Al₂O₃).
- **Menor custo com desoxidante** – pela sua melhor superfície, os aços efervescentes são mais indicados para trefilação, embutimento profundo e esmaltação.

A-Z

laminador desbastador

Componente da linha de tiras a quente, a qual permitiu integrar a produção da usina de aço líquido ao produto acabado.

4.5.2 Aços semiacalmados

São aqueles em que se procurou combinar as vantagens da boa superfície dos aços efervescentes, com a redução de segregação. Para isso, a efervescência foi interrompida pela adição de alumínio. Devido à desoxidação, o aço apresenta um teor de oxigênio entre 100 e 200 ppm. São utilizados na fabricação de chapas grossas para a construção naval.

4.5.3 Aços acalmados

São totalmente desoxidados e apresentam teor de oxigênio abaixo de 100 ppm.

Para a transformação de um aço efervescente em semiacalmado ou acalmado deve-se adicionar um desoxidante, como o alumínio ou silício que retirará uma certa quantidade de oxigênio do aço conforme as reações que seguem:



4.6 Reações que ocorrem no conversor

A oxidação das impurezas ocorre através do sopro de oxigênio que se combina primeiramente com o ferro formando FeO, segundo a reação



O óxido de ferro (FeO) combina com outros elementos.

4.6.1 Silício e manganês

No início do sopro de oxigênio, o silício e o manganês da carga metálica juntamente com uma pequena quantidade de ferro são oxidados, formando uma escória ácida. Esses dois elementos (Si e Mn) são oxidados a níveis muito baixos antes que 1/3 do sopro tenha sido completado. Nesse intervalo de tempo, o teor de silício no metal já está a menos de 0,01% enquanto que o teor total de manganês é reduzido de aproximadamente 75% como mostra as reações:



Com o prosseguimento do sopro, esta escória inicial de silicato é gradualmente convertida para uma escória altamente básica pela dissolução da cal adicionada no processo.

4.6.2 Fósforo

O teor de fósforo no metal mostra pouca variação até que as reações do silício e do manganês tenham-se completado. Começa então uma rápida tendência de queda, reduzindo-se a um nível em que permanece até o final de sopro.



A remoção do fósforo é favorecida por uma escória fluida, reativa com alta basicidade e alta concentração de FeO.

4.6.3 Carbono

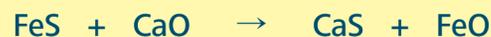
Durante a primeira parte do sopro, a queda do carbono é muito lenta. Contudo, assim que o silício e o manganês desaparecem, e a eliminação do fósforo tenha iniciado, a oxidação do carbono torna-se predominante.



A redução do carbono prossegue a uma velocidade constante até que atinja níveis em torno de 0,1 a 0,15%. Nessa faixa, a velocidade de queda do carbono diminui, enquanto que o teor de oxigênio no metal e a quantidade de FeO na escória mostram rápidas elevações. Tal fato se explica por que a concentração de carbono no banho, próximo ao final da corrida não é suficientemente alto para proteger o ferro de oxidação excessiva. Por isso, aços fabricados em conversores LD de baixo carbono apresentam teores de oxigênio mais elevados, além de volume de FeO maior na escória.

4.6.4 Enxofre

A remoção do enxofre é favorecida pelas mesmas condições necessárias à eliminação do fósforo. Entretanto, é de difícil previsão. Ele requer um excesso de cal além da quantidade necessária para controlar a basicidade da escória. Essa condição ocorre próximo ao meio do sopro e atinge o ponto ótimo próxima ao seu final, quando o máximo de cal está em solução. O enxofre, presente no metal como sulfeto de ferro (FeS), reage com a cal para formar sulfeto de cálcio que é facilmente dissolvido pela escória básica.



O melhor caminho para minimizar os problemas da remoção do enxofre é limitar o enxofre na carga que entra.

4.7 Importância da escória

Durante o processo de elaboração do aço, a escória é um material necessário apesar de ser nulo o seu valor comercial. A sua função é controlar a composição química do aço durante a sua fabricação, proporcionando reações químicas na região de contato entre eles (na interface metal/escória).

É composta basicamente de óxidos, tais como: CaO, SiO₂, FeO, MnO, MgO, Al₂O₃, e de outros constituintes que não são óxidos.

4.7.1 Características da escória

Escória oxidante – é aquela que possui alto potencial de oxigênio, ou seja, é a escória que oferece oxigênio e consegue oxidar outros elementos que ficam em contato com ela, através de uma reação química de oxidação.

Escória redutora – é aquela que tem escassez de oxigênio. Esta escória tem a característica de tirar oxigênio (desoxidar) dos óxidos que se encontram em contato com ela através de uma reação química de desoxidação, pois é rica em composto que tem afinidade com o oxigênio.

4.7.2 Características quanto à composição química

Escória básica – quando a quantidade de CaO dividida pela quantidade de SiO₂, for maior que 1.

Exemplo: Quantidade de CaO = 55%
Quantidade de SiO₂ = 20%

Logo: CaO/SiO₂ = 2,75

Essa escória é básica, pois o resultado dessa divisão é maior que 1. Observe que quanto mais CaO na escória, a tendência é que ela seja mais básica.

Escória ácida – da mesma forma, a escória é ácida se quando dividida a quantidade de CaO pela quantidade de SiO₂, o resultado da divisão for menor do que 1.

O valor obtido desta divisão é denominado de **basicidade** e constitui um item importante para qualificar a escória.

4.7.3 Características físicas da escória

Fluidez da escória – entende-se por fluidez a capacidade de escoar, por exemplo, quando derramada. Assim, o óleo é mais fluido que a graxa de lubrificação. Por sua vez, a água é mais fluida que o óleo, e por fim, a graxa tem menor fluidez entre os três.

A fluidez da escória é muito importante, pois quanto mais fluida ela for, melhor ela reagirá com o metal. Essa característica da escória pode ser obtida por adição de certas substâncias como a fluorita, e também pelo aumento de temperatura do sistema meta/escória.

A escória do processo LD deve ter um alto grau de fluidez e basicidade para absorver e reter as impurezas da carga como o fósforo e o enxofre.

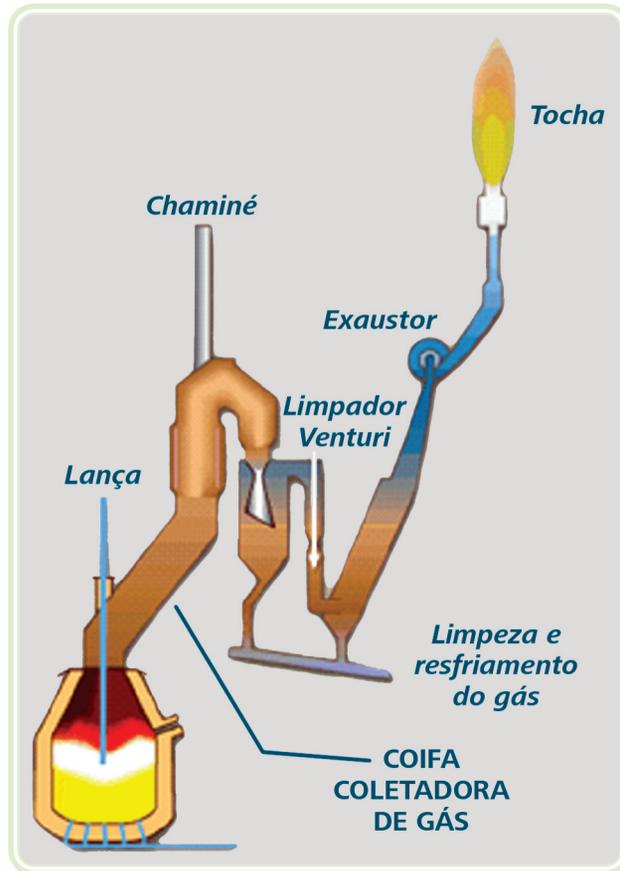
É necessário que uma escória básica seja formada o mais cedo possível para proteger o revestimento do conversor e promover um rápido refino da corrida.

O óxido de ferro (FeO) na escória proporciona as condições oxidantes necessárias ao refino da carga. Entretanto, escórias com teores de ferro excessivamente altos diminuem o rendimento metálico, reduzem a vida do revestimento e geralmente tendem a tornar o controle do processo mais difícil.

4.8 Tratamento do gás obtido no conversor

Os produtos poluentes gerados em uma usina siderúrgica são um risco para a poluição atmosférica. As siderúrgicas buscam processos para o tratamento destes gases que podem tornar-se um grande problema quando não são devidamente tratados. A atmosfera é diretamente afetada, gerando problemas para o meio ambiente e para o homem, isto é, a emissão dos gases forma chuva ácida, contamina os lençóis freáticos, desenvolve problemas respiratórios – quando o ar é muito poluído influencia no aquecimento global, afetando a qualidade de vida do ser humano, dentre outros. Daí a importância em se tratar o gás gerado no conversor LD.

O sistema de limpeza do gás obtido no conversor LD consiste numa chaminé de resfriamento, tendo na sua extremidade inferior uma coifa de captação. A chaminé é um trocador de calor onde, no interior dos tubos que as constituem, circula água de caldeira. Resfriados a uma temperatura de 1000°C, os gases vão a um lavador de dois estágios. No primeiro, o gás é saturado com água introduzida pelos jatos e sua temperatura baixa a 80°C. No segundo, as partículas menores são coletadas, e o gás passa, por uma torre de separação e por um exaustor, deixando a instalação com menos de 100 mg de poeiras por Nm³. A lama é levada a um espessador e decantada como mostra a Figura 4.7.



Para saber mais e socializar os reforços dos conhecimentos adquiridos nesta aula, acompanhe a execução do vídeo através do youtube CST aciaria. Desta forma, seu estudo será mais proveitoso e prazeroso.
<http://www.youtube.com/watch?v=b4Jj8Wzn8s8>

Figura 4.7: Esquema de limpeza dos gases

Fonte: Rizzo, 2006

Resumo

Nessa aula apresentaram-se a importância da descoberta do processo de oxidação para a fabricação do aço, os elementos mais comuns na sua composição e o que a presença de cada um deles significa para sua resistência mecânica. Analisaram-se as reações químicas que ocorrem no interior do conversor durante a oxidação das impurezas. Evidenciou-se que para produzir aço uma grande quantidade de gás é obtida no processo, e que este precisa ser tratado para evitar a poluição atmosférica.



Atividades de aprendizagem

1. A oxidação das impurezas no processo LD acontece devido a
 - a) 18 minutos de sopro de ar sob pressão.
 - b) 18 minutos de sopro de oxigênio puro.
 - c) 45 minutos de sopro de ar sob pressão.
 - d) 45 minutos de sopro de oxigênio puro.
2. Sobre a fabricação de aço, através do processo LD, podemos afirmar que:
 - a) O carbono é oxidado formando CO.
 - b) O tempo de sopro do oxigênio é de aproximadamente 18 minutos.
 - c) O tempo de operação de uma corrida em um conversor LD é de aproximadamente de 40 min.
 - d) A cal é utilizada como carga para neutralizar os óxidos ácidos formados.
 - e) Todas as respostas estão corretas.
3. A proporção de gusa líquido utilizado como carga em um conversor LD depende.
 - a) De sua composição química.
 - b) De sua temperatura.
 - c) Da qualidade da sucata.
 - d) Do tipo de aço que se quer fabricar.
 - e) De todas as alternativa citadas.

4. Na fabricação de aços pelo processo LD, para o controle de temperatura do metal no final de sopro, é imprescindível a utilização de.

- a) Ferro-gusa líquido no mínimo 80% da carga.
- b) Cal, e esta deverá ser adicionada no início do sopro.
- c) Sucata de aço.
- d) Cal dolomítica.

5. Correlacionar:

- | | |
|--------------|--|
| (1) carbono | () É uma impureza difícil de ser eliminada durante o processo de fabricação do aço. |
| (2) silício | () Se alto, o volume de escória será maior porque devemos utilizar uma maior quantidade de CaO durante a fabricação de aços através do processo LD. |
| (3) manganês | () Fragiliza o aço a frio. |
| (4) fósforo | () Se baixo, dificilmente se consegue uma boa escória. |
| (5) enxofre | () Durante a sua oxidação, para a fabricação de aços com teores menores que 0,10 a 0,15%, acontece o aumento do teor de FeO na escória. |

A sequência correta é:

- a) 4, 2, 5, 3, 1
- b) 5, 2, 4, 1, 3
- c) 2, 5, 4, 3, 1
- d) 5, 2, 4, 3, 1

6. Para neutralizar os óxidos ácidos formados no início das reações de oxidação das impurezas através do processo LD, é feita a adição de
- a) cal.
 - b) fluorita.
 - c) calcário.
 - d) minério de ferro.
7. A adição de fluorita durante o processo de fabricação de aços tem a finalidade de:
- a) Aumentar o ponto de fusão da escória.
 - b) Diminuir a fluidez da escória.
 - c) Acelerar as reações do processo.
 - d) Baixar o ponto de fusão da escória.
8. A sequência de operação de um conversor LD é:
- a) Carregamento de sucata, gusa líquido, sopro de O_2 , retirada da amostra e temperatura, vazamento do aço e depois da escória.
 - b) Carregamento do gusa líquido, sucata, sopro de O_2 , retirada da amostra e temperatura, vazamento do aço e depois da escória.
 - c) Carregamento de sucata, gusa líquido, sopro de O_2 , retirada da amostra e temperatura, vazamento da escória e depois do aço.
 - d) Carregamento do gusa líquido, sucata, sopro de O_2 , retirada de temperatura e amostra, vazamento da escória e depois do aço.

9. Analisando as alternativas abaixo. Podemos afirmar:

I – O fósforo é um elemento que se reduz por simples oxidação no conversor LD.

II – Os aços baixo carbono obtidos no conversor LD, são classificados como efervescentes.

III – A injeção de gás inerte pelo fundo do conversor, proporciona menor teor de FeO na escória.

IV – Os aços acalmados possuem baixo teor de oxigênio, apresentando menores propriedades mecânicas.

V – Sempre que o teor de manganês estiver elevado no aço, o enxofre se combinará primeiro com o Fe formando FeS e não MnS.

Estão corretas:

a) Somente I e IV.

b) Somente II e III.

c) Somente I e V.

10. Dado o valor de $\text{SiO}_2 = 20\%$ e $\text{CaO} = 40\%$, esta escória é:

a) Básica.

b) Neutra.

c) Ácida

d) Não tem nenhuma relação.

Aula 5 – Obtenção de aços através do forno elétrico

Objetivos

Conhecer o processo de fabricação de aço em forno elétrico.

Identificar os vários tipos de fornos elétricos.

Analisar o refino oxidante e redutor na transformação da sucata em aço.

Conhecer a importância da desoxidação e dessulfuração do aço.

Conhecer as operações que ocorrem no forno panela e suas vantagens.

5.1 Resumo histórico

Em 1878, W. Siemens fundiu aço em um pequeno cadinho pela primeira vez, por meio de um arco voltaico. Suas experiências na época tiveram apenas caráter científico, devido ao custo elevado de energia elétrica.

Em 1888, Paul Héroult obteve uma patente com o forno elétrico a arco. Pela possibilidade de controlar a temperatura do banho e as condições de oxidação e de redução da escória, bem cedo se reconheceram as vantagens do aço através desse processo que contribui hoje com 30% da produção mundial.

5.2 Tipos de fornos elétricos (FE)

- **Forno a arco indireto** – o arco voltaico se faz entre os eletrodos. A transmissão de calor ao material é conseguida pela irradiação, pois os eletrodos não mergulham na carga. O arco indireto é relativamente estável e constante, porém, o consumo de energia é maiores que nos fornos a arco direto, pois apenas uma parte da energia irradiada atinge o material a fundir. Este tem a forma cilíndrica e é constituído de uma carcaça em chapa de aço revestida internamente de material refratário. Durante a operação esta carcaça gira em torno de seu eixo.

- **Forno a arco direto** – a Figura 5.1 mostra esse tipo de forno onde o arco se faz entre um dos eletrodos e o material carregado o qual deve necessariamente, ser um condutor de eletricidade. A transmissão de calor é feita diretamente à carga.
- **Forno a indução** – de baixa e alta frequência, onde o calor é gerado pela resistência, a passagem da corrente induzida pelo campo magnético de uma bobina na qual passa uma corrente alternada.
- **Forno de resistência** – a geração de calor se dá através do efeito *joule*, passagem da corrente elétrica em resistência, ocorre a transformação em energia térmica. É usado em tratamentos térmicos, sinterização de pós e fusão de materiais não ferrosos.

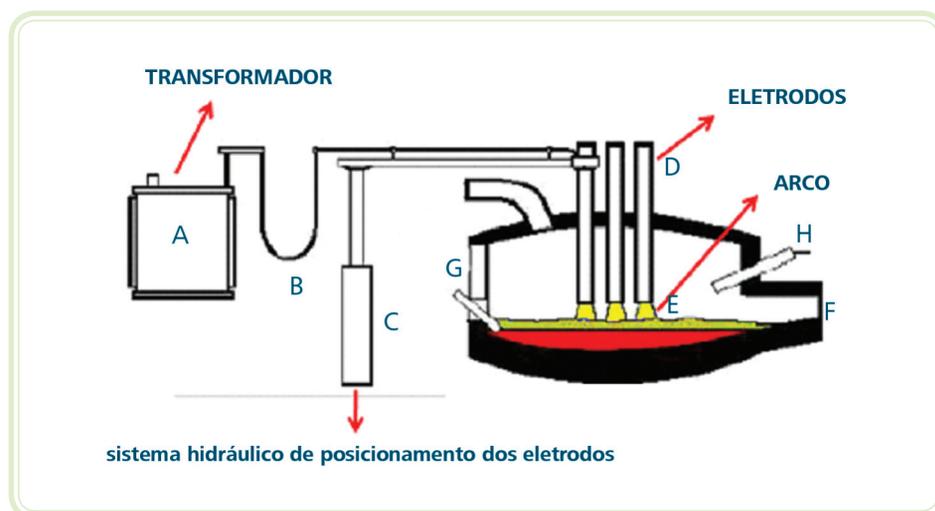


Figura 5.1: Forno elétrico a arco direto

Fonte: Apostila de introdução à engenharia metalúrgica de Nestor Cezar Heck / UFRGS – DEMET

Nesse forno a transformação de energia térmica é feita pelo arco voltaico trifásico. A corrente elétrica alternada passa por transformadores que baixam a voltagem para níveis de 80 a 250 V normalmente usados e é levada aos eletrodos de grafite, por meio de terminais flexíveis de cobre.

Os eletrodos de grafite penetram no forno através de aberturas nas abóbadas e podem ser movimentados verticalmente para cima e para baixo, graças a um sistema de regulação; o arco se faz entre os eletrodos e a carga que constitui o ponto neutro, ocorrendo fortes variações de corrente durante toda a fusão tendo como consequência a variação do comprimento do arco.

No forno elétrico a arco indireto, isso não acontece, pois neste a distância entre as pontas dos eletrodos, entre as quais se faz o arco, permanece praticamente constante.

No forno elétrico a arco direto, o arco voltaico entre as pontas dos eletrodos e a carga, bem como os numerosos arcos secundários nos pontos de contato dos pedaços de sucata, estão continuamente sujeitos a fortes variações, devido à fusão dos materiais. Desde o curto circuito entre dois eletrodos através de um pedaço de metal, até a extinção completa do arco, há uma contínua variação, que se faz sentir em bruscas oscilações de carga na rede de distribuição de energia.

5.3 Operações do forno elétrico

A operação do forno elétrico a arco compreende as seguintes fases:

- Preparação da carga e carregamento.
- Fusão da carga.
- Refino oxidante.
- Refino redutor.
- Vazamento.

5.3.1 Preparação da carga e carregamento

A sucata é estocada em um pátio. É absolutamente necessário sua separação de acordo com sua composição, o que conduz à existência de vários lotes, bem separados uns dos outros. Quanto maior for a variedade de aços produzidos, mais diversificada será a sucata e maior superfície de pátio será necessária. Antes de se efetuar o carregamento da sucata no forno, é necessário proceder a uma inspeção do estado das paredes, soleiras e abóbada desse forno. Terminada a inspeção, os eletrodos são levantados, a fim de não expô-los a choques mecânicos durante o carregamento.

A sucata deve ser preparada de forma a permitir:

- Tempo de fusão mínimo.
- Pedacos que não provoquem quebra de eletrodos.
- Formação rápida de um banho líquido sobre a soleira, protegendo-a da ação direta dos arcos.
- Ausência de contato dos eletrodos com corpos não condutores que são a causa de rupturas dos eletrodos e por isso precisam ser eliminados do carregamento.

O aspecto físico da sucata é muito importante. A sucata pode ter densidade aparente muito baixa. É importante balancear corretamente a carga, para se evitar a necessidade de muitos carregamentos que comprometem a produtividade.

O carregamento da sucata é feito em cestos apropriados que se abrem no fundo, permitindo a descida da carga no forno elétrico.

Na parte mais baixa do cestão deverá ficar a sucata leve, a fim de amortecer a queda dos pedaços maiores, protegendo a soleira. A seguir, peças grandes e depois novamente sucata leve para facilitar a abertura do arco voltaico, e ao ser atravessada rapidamente pelos eletrodos, protege a abóbada (e reduz a emissão de ruídos) a sucata mais pesada deverá ficar diretamente debaixo dos eletrodos para fundir mais rapidamente e evitar que, durante a fusão, caia sobre os eletrodos partindo-os. O desenho esquemático da Figura 5.2 mostra como deve ser a distribuição da carga no cesto de carga fria.

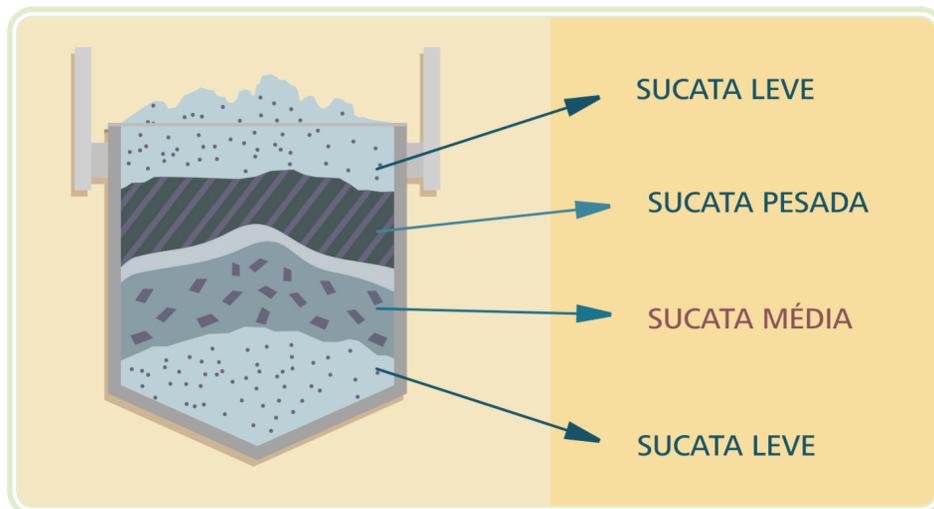


Figura 5.2: Distribuição da sucata no cestão de carga fria

Fonte: CTISM

Na prática normal, de 100 t de sucata resultam em 90 t de aço. As perdas ocorrem pelo:

- Metal levado à escória sob a forma de óxidos.
- Ferro volatilizado no arco e coletado no sistema de despoeiramento.
- Aço perdido no vazamento ou lingotamento.

5.3.2 Fusão da carga

Efetuada o carregamento e recolocada a abóbada, fecham-se as portas do forno e baixam-se os eletrodos até tocar na carga, ligando-se o arco.

Durante os primeiros 10 min, os eletrodos fundem a carga colocada diretamente sobre eles. Recomenda-se nessa fase, trabalhar com voltagem mais reduzida, até que os eletrodos abram caminho na sucata e assim protejam as paredes da irradiação do arco voltaico.

A seguir, aplica-se voltagem e corrente máxima a fim de fundir o mais rapidamente possível. Gradualmente, os eletrodos vão descendo até que quase tocam a soleira onde, pouco a pouco, vai se formando um poção de metal líquido, a qual tem função de proteger a soleira da perfuração do arco.

Durante a fusão, a chama em torno dos eletrodos é forte e altamente oxidante (azulada). Se a cor da chama mudar para amarelo indica a formação de pontes de sucata. Essas devem ser desalojadas, para evitar que caiam de uma só vez, prevenindo o risco de quebrar os eletrodos e danificar a soleira. Os forneiros vão empurrando a sucata ainda não fundida, que estavam perto das paredes, para dentro do banho, por meio de barras de aço. Antes de a carga estar completamente fundida reduz-se a voltagem do arco e jogam-se algumas pás de cal sobre o banho, para proteger a abóbada da irradiação

Já que o carregamento do forno é feito em vários cestões, é importante determinar o momento exato para se efetuar o carregamento subsequente. Se o carregamento for efetuado muito tarde, uma grande quantidade de energia se perderá por irradiação para as paredes e abóbadas, durante o período com o banho plano.

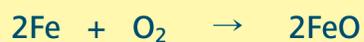
Se o carregamento for efetuado muito cedo, a operação será interrompida justamente durante o período em que a maior potência está sendo aplicada é a melhor estabilidade do circuito foi alcançada. Por outro lado, devido à fusão incompleta, peças de sucata ficarão acima do nível da abóbada após o novo carregamento, produzindo sucata alta.

Terminada a fusão, normalmente se deseja que o teor de carbono no aço esteja 0,25% acima do teor da análise final desejada para que, com a evolução de CO decorrente da oxidação do carbono, ocorram a agitação e eliminação de gases dissolvidos.

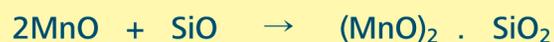
5.3.3 Refino oxidante

Considera-se a fusão como concluída quando o banho está horizontal e a primeira amostra é retirada para a determinação do teor de carbono.

O refino oxidante é conseguido introduzindo-se no banho, minério de ferro, ou carepa de laminação e ou soprando oxigênio. O oxigênio introduzido no banho irá oxidar os elementos químicos de interesse, eliminando-os parcialmente em forma de óxidos como indicam as reações:



O manganês se oxida através das reações:



Estes óxidos formados passam à escória.

O fósforo é um elemento indesejável no aço e, embora cause nele endurecimento um pouco menor que o carbono, ele confere uma cristalização grosseira, causando-lhe uma grande fragilidade.

As reações de oxidação do fósforo são as seguintes:



Vários fatores exercem influência sobre estas reações, como:

- Temperatura do banho.
- Fluidez da escória.
- Basicidade da escória.
- Teor de carbono no aço.

5.3.3.1 Influência da temperatura na desfosforação

A oxidação do fósforo ocorre intensamente a uma temperatura baixa, já que com a elevação da temperatura, começa a haver a oxidação preferencial do carbono contido no aço. O fósforo é eliminado desde o início da fusão, quando o metal que começa a fundir entra em contato com a escória básica oxidante, razão pela qual a cal é introduzida desde o princípio da fusão, juntamente com a carga.

5.3.3.2 Influência da fluidez da escória na desfosforação

Como regra geral, uma escória é tanto mais reativa quanto mais fluida for. Quando se adiciona fluorita no processo, a cal se fluidifica consideravelmente, e as reações de desfosforação acontecem com mais intensidade.

5.3.3.3 Influência da basicidade da escória

Como já foi visto, a basicidade é a relação entre a quantidade de CaO e SiO₂. Quanto maior for a quantidade de CaO em relação à sílica, maior será a basicidade da escória. Esse índice é importante, pois para que o óxido de fósforo (P₂O₅) possa passar para a escória, formando o fosfato de cálcio (P₂O₅ CaO), é necessário que esta contenha uma quantidade de cal livre e suficiente ou seja, um índice de basicidade adequado. Em princípio, podemos dizer que dentro de certos limites, quanto mais elevada for a quantidade de cal, melhor será a desfosforação.

Os principais objetivos da fase oxidante são: o acerto do teor de carbono e a eliminação do fósforo, o que só se consegue se o carbono for levado ao teor desejado antes que o **banho** atinja temperaturas excessivamente altas (cerca de 1600°C). Esta condição sofre grande influência do teor inicial de carbono. Se na carga fria o teor de carbono é alto, grande quantidade de oxigênio e tempo é necessária para queimá-lo. A temperatura do banho sobe excessivamente, a desfosforação é prejudicada, aumentando o tempo de corrida.

Quando a fase de oxidação está terminada, procede-se à remoção da escória, o que se consegue por escoamento natural, inclinando ligeiramente o forno, ou por meio de raspadores.

A remoção da escória é necessária, pois na fase seguinte do processo é a desoxidação (fase redutora), os óxidos formados durante a fase de oxidação retidos na escória são desoxidados e retornam ao metal. Esse fenômeno é chamado de reversão, e o mais prejudicial é a reversão do fósforo, pois a impureza que está na escória na forma de (P₂O₅CaO) é desoxidada e o

A-Z

banho

Metal líquido, ou seja, fundido.

fósforo volta a fazer parte do metal. O principal cuidado para evitar isto é a máxima remoção da escória oxidada para, então, elaborar uma nova escória para a fase redutora.

5.3.4 Refino redutor

A fase do refino redutor tem por finalidade:

- A desoxidação do metal.
- A eliminação do enxofre.
- Acerto final de composição.
- Acerto de temperatura.

a) Elaboração da nova escória

Após a retirada da escória oxidante é constituída nova escória no interior do forno através de novas adições de cal, e um carburante. Devido a alta temperatura do banho, o carbono do carburante reage com o Ca do CaO formando CaC₂ (carbureto de cálcio) que é um composto altamente redutor (desoxidante) conforme as reações:



b) Desoxidação da escória

A escória oxidante se caracteriza, principalmente pela presença de muito FeO e de outros óxidos. A formação de CaC₂ pela adição de carburante é o primeiro passo para a redução desses óxidos. A desoxidação da escória pode ser completada pela adição de outros desoxidantes como o alumínio e o silício.

Durante essa fase, principalmente quando se trabalha carburando a escória é importante estar sensível à eventual carburação do banho, pois devido a grande flutuação do nível de oxidação da escória e do metal, tais condições resultam em variados rendimentos do C no banho, elevando o teor deste no metal.

5.3.4.1 Desoxidação do metal

O metal, não tendo sido desoxidado, é rico em oxigênio. Apesar da ação dos desoxidantes como o C e o CaC_2 , que reduzem os óxidos da escória, o oxigênio do metal (também combinado com o ferro) tende a re-oxidar a escória, procurando atingir um novo equilíbrio.

O produto da desoxidação pelo Al, Si, Mn, enfim com a exceção do C, são óxidos (Al_2O_3 , SiO_2 , MnO) que, a princípio, devem ser eliminados para a escória por diferença de densidade (os óxidos são mais leves). Porém, as partículas menores, devido a sua baixa velocidade de ascensão acabam retidos no metal. Esse residual é denominado inclusões.

5.3.4.2 Dessulfuração do aço

O enxofre é um elemento extremamente nocivo no aço, agindo em particular, sobre a propriedade de transformação mecânica do metal (laminação, forjamento). Um aço com teor de enxofre muito elevado é afetado de fragilidade a quente e não pode ser laminado ou forjado sem trincar.

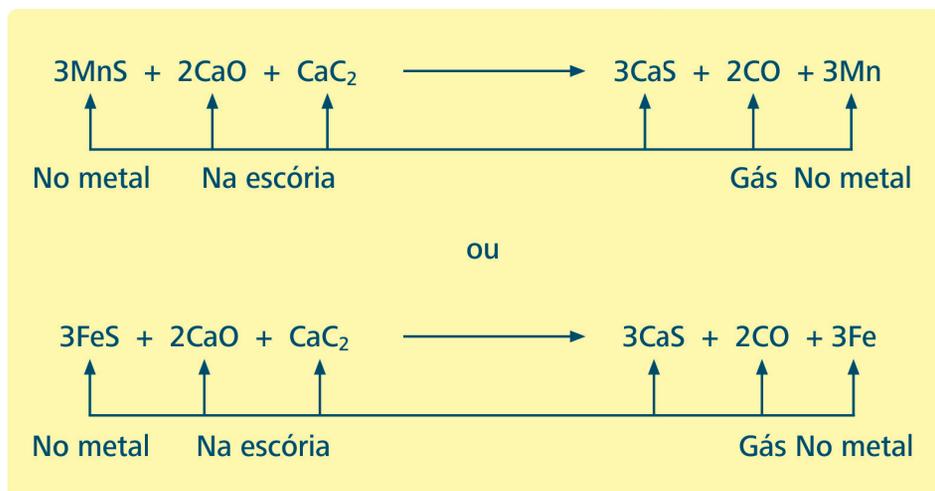
A dessulfuração é, portanto uma fase essencial da elaboração do aço. É realizada ao mesmo tempo da desoxidação. Se ela for executada, em presença de escória suficientemente básica (bastante cal), obtém-se um aço com enxofre baixo.

São condições necessárias para dessulfuração:

- Operar em presença de escória bem desoxidada (escória redutora).
- Operar em presença de escória básica (necessidade de cal livre para remoção de maior quantidade de S).
- A escória deve estar suficientemente fluida, para intensificar as reações com o banho metálico.
- Ter presença de Mn.
- Ter agitação conveniente escória-metal.

Mecanismo da dessulfuração – o S encontra-se no metal na forma de MnS (sulfeto de manganês) ou , em menor proporção, na forma de FeS (sulfeto de ferro).

A eliminação desses sulfetos do metal se efetiva fazendo-os reagir com a cal livre (CaO ou CaC₂), segundo as reações:



Dentre as condições necessárias para a dessulfuração, verificamos que a escória bem desoxidada tem importância muito grande, pois o sulfeto de cálcio (CaS) tem facilidade de reagir com o FeO ou MnO acarretando a reversão do S, ou seja, para uma dessulfuração efetiva, o baixo teor de FeO e MnO são necessários. Outra condição imprescindível dessas reações é a presença abundante da cal (alta basicidade), sem a qual não ocorreriam as reduções do MnS e do FeS.

5.3.4.3 Acerto de composição química

Após a desoxidação, geralmente o aço não tem a composição desejada. O acerto final definitivo consiste em incorporar os elementos que lhe faltam, como, C e Mn que tenham sido consumidos parcialmente durante a desoxidação.

5.3.5 Vazamento

Durante o vazamento do forno é interessante realizar um jato bem compacto, sem dispersões, para que a superfície de contato com a atmosfera seja mínima relativamente ao metal que se esco.

A-Z

rinsagem

É uma agitação do metal fundido.

Para se obter um metal com baixo nível de oxigênio, é necessária a desoxidação na panela através de desoxidante como o alumínio ou ferro-manganês. Essa operação é realizada quando o metal já se encontra na panela, aí se inicia a operação de **rinsagem** que consiste em insuflar pelo fundo um gás que não reage com o metal (nitrogênio ou argônio) por um *plug* poroso, objetivando a homogeneização de temperatura e da composição química, assim como a eliminação de alguns gases nocivos ao aço como o hidrogênio. Ao terminar a operação e confirmada a temperatura, o aço está pronto para ser lingotado.

5.4 Desvantagens do forno elétrico

- Um único forno não é bastante para alimentar um lingotamento contínuo, em corridas sequenciais.
- Uma instalação econômica não ultrapassa a 1,5 Mt/ano.
- Como a sucata, pela sua própria natureza, é extremamente diversificada, é quase impossível imaginar-se um modelo matemático do controle de carga, ao contrário do que ocorre com os sistemas de sopro com oxigênio.

5.5 Forno panela

Uma das mais importantes características dos programas de desenvolvimento da fabricação do aço, nas últimas décadas, tem sido o esforço para melhorar a qualidade dos produtos. Para tanto, várias alternativas de métodos de refino têm sido introduzidas com o objetivo de produzir materiais de qualidade, até então, impossíveis de serem obtidos por métodos convencionais. De maneira geral, a medida que aços de qualidade sejam necessários, diversas operações complementares devem ser realizadas: descarburização, desgaseificação, ajuste do teor de carbono, ajuste do teor de vários elementos de liga, eliminação de resíduos indesejáveis, ajuste de temperatura. Isto se consegue através do refino secundário do aço no forno panela.

O forno panela foi criado no Japão em 1971. É um processo de rinsagem causada pelo borbulhamento de gás inerte, adições de elementos de liga e dispositivos de aquecimento que permitem executar o refino desoxidante na própria panela de vazamento, pela elaboração de uma nova escória, pelo controle de temperatura e acerto final da composição química do aço.

O equipamento substitui integralmente o refino desoxidante feito no forno elétrico convencional, conforme mostram os fluxogramas da Figura 5.3.

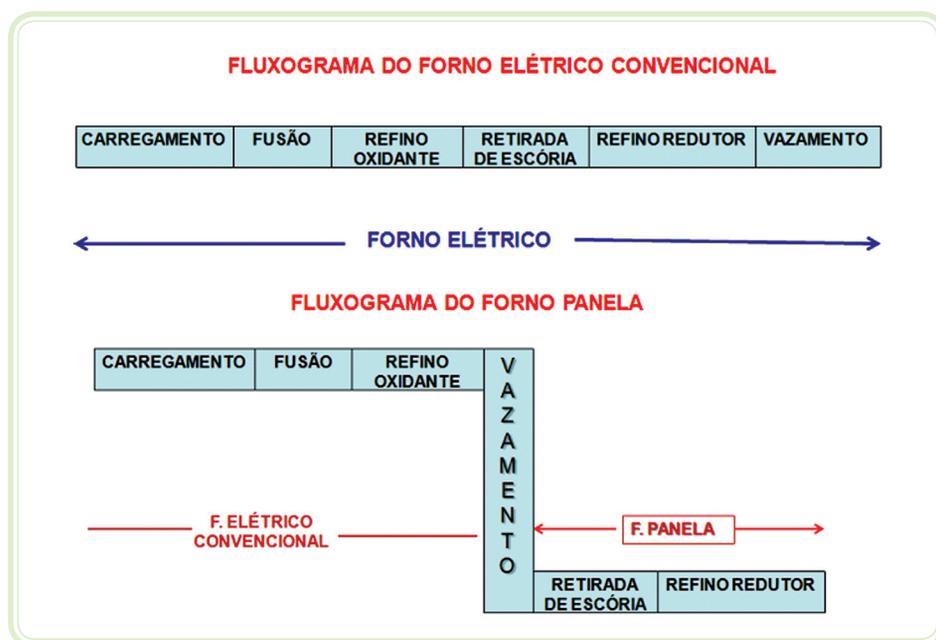


Figura 5.3: Fluxogramas da fabricação de aço através do forno elétrico convencional e o forno painel

Fonte: CTISM

Pelo fluxograma, percebe-se que a fase de refino redutor fica aumentada no forno painel. Esse fato contribui para o ajuste de todos os fatores que sofrem variação de corrida a corrida, como temperatura de vazamento, nível de oxidação, homogeneização, eficiência de dessulfuração e basicidade da escória.

Devido ao prolongamento do tempo de refino, e da rinsagem contínua durante todo o processamento do metal, é necessário que o refratário seja básico, isso porque a escória que sobrenada o banho é básica. Um refratário ácido seria rapidamente consumido na linha da escória.

5.5.1 O equipamento

O forno painel é basicamente composto pelas seguintes partes:

- Abóbada refrigerada.
- Trole de movimentação.
- Painel básica com dispositivo para rinsagem do metal.

- Cabine de comando.
- Sistema de aquecimento por eletrodos.
- Outros acessórios.

5.5.2 Operações básicas do forno panela

- a) No *plug* da panela é conectada a mangueira para rinsagem do aço com o gás inerte (nitrogênio ou argônio).
- b) A panela é basculada para a retirada da escória oxidante do forno.
- c) O trole recebe a panela com o aço líquido.
- d) A panela é conduzida pelo trole para baixo da abóbada.
- e) Através da cabine de comando, o operador baixa a abóbada assentando-a sobre a borda da panela e aciona os eletrodos, ligando o forno.
- f) Depois de ligado o forno, inicia-se o processo de refino redutor do aço que consiste na adição de uma nova escória (desoxidante) e de ligas, terminando com o acerto da composição química do aço.
- g) Após processado o refino do aço, a abóbada e os eletrodos são levantados, permitindo o deslocamento do trole com a panela, liberando-a para o lingotamento.

5.5.3 Objetivos e vantagens do forno panela

A elaboração de aço do forno elétrico compreende cinco fases: carregamento, fusão, refino oxidante, refino redutor e vazamento.

A função do forno panela é substituir a fase do refino redutor, reservando o forno elétrico apenas para a fusão e o refino oxidante. Essa substituição leva ao processo vantagens significativas em termos de qualidade do produto, custo e produção.

5.5.4 Objetivos na área metalúrgica

- Remoção de gases devido à intensa rinsagem durante o tratamento no forno panela.
- A desoxidação é mais eficiente devido à melhor remoção da escória oxidante e à fase redutora ser maior e melhor trabalhada do que no forno elétrico convencional.
- A boa remoção da primeira escória e a elaboração da nova com basicidade adequada e relativa agitação devido à rinsagem prolongada, proporcionam uma dessulfuração mais eficaz.
- A rinsagem de 30 min permite uma perfeita homogeneização química no banho, evitando a segregação no aço, a temperatura homogênea em todo o metal, o que permite maior controle de temperaturas no lingotamento em menor nível de inclusões.

5.5.5 Objetivos na área da produção

- Consegue-se um melhor acerto na composição química, resultando em menor perda de corridas fora de faixa.
- Aumento da produtividade, devido à possibilidade de transferência de o refino redutor ser direto na panela.

5.5.6 Objetivos econômicos

- Menor desvio por composição química.
- Menor perda no lingotamento contínuo.
- Maior rendimento nas adições de ferros-ligas.
- Menor consumo de energia.
- Menor consumo de eletrodos.

5.5.7 O processo no forno panela

Após o ajuste do carbono na faixa desejada e uma desfosforação satisfatória, o metal e a escória são vazados para a panela no final da fase oxidante. Uma prévia desoxidação pode ser feita durante o vazamento, visando atenuar o nível de oxidação.

5.5.8 Remoção da escória

O forno panela proporciona o refino redutor ao metal, ou seja, são adicionados os desoxidantes a fim de eliminar o oxigênio presente na fase metal-escória.

A remoção das escórias é uma operação necessária para evitar a presença de P_2O_5 durante a fase de redução, e assim, evitar a reversão do mesmo para o aço.

A remoção da escória deve ser feita com bastante cuidado, pois em grande parte, depende dela o êxito da desfosforação.

5.5.9 Rinsagem

Durante o processo de tratamento do metal no forno panela, é feito um borbulhamento de gás inerte (gás que não reage com o metal) pelo fundo da panela, através de um *plug*. Essa operação é chamada de rinsagem e tem por objetivo proporcionar os seguintes efeitos no metal:

- Facilitar a dissolução e a homogeneização das adições.
- Evitar a atmosfera oxidante na superfície líquida do interior da panela.
- Eliminar gases do metal.
- Homogeneizar a temperatura e a composição química.
- Agitar a interface metal-escória, proporcionando maior eficiência da desulfuração.

5.5.10 Refino redutor

Tão logo a panela chegue às instalações de tratamento do metal, é retirada uma amostra para análise química, a fim de se conhecer o teor de carbono.

Se o processo no forno elétrico ocorrer como se espera, este teor deve estar ligeiramente inferior a composição desejada.

No princípio do tratamento, o metal se encontra desprotegido, pois a escória oxidante foi retirada. É necessária a elaboração de uma nova escória, e esta é obtida adicionando-se cerca de 7 kg de CaO/t de aço no interior da panela. A nova escória precisa ser carburada, o que se consegue, adicionando um carburante que tem por finalidade obter um caráter redutor com formação de CaC₂ (carbureto de cálcio).

Além da formação do CaC₂, que é um composto altamente redutor, a carburação proporciona os seguintes efeitos:

- Desoxidação da escória remanescente da remoção, apesar de todo o cuidado para a remoção total da escória proveniente do forno elétrico uma pequena parte dela acaba sobrando na panela. Parte da carburação consegue anular o caráter oxidante da escória.
- A essa altura do processo, o metal continua oxidado, apesar da nova escória. Esta escória em contato com o metal tende a ser desoxidada. A carburação protege a escória dessa tendência, desoxidando o metal que está em contato com ela. Essa condição não pode ser mantida por muito tempo, pois isso diminui gradativamente o potencial redutor da nova escória que acaba por ser oxidada pelo metal. Daí a necessidade da desoxidação do metal. Essa desoxidação proporciona também um melhor rendimento e rápida homogeneização das adições de ferros-ligas que é feita na rinsagem.

A dessulfuração acontece ao longo de toda a fase de refino na panela, estando o metal em contato com a escória básica e redutora.

O enxofre encontra-se no metal combinado com o manganês e parcialmente com o ferro, formando sulfeto de manganês e sulfeto de ferro. Esses sulfetos são eliminados para a escória, reagindo com o cálcio livre que está na forma de CaO₂ ou CaO.



A dessulfuração no forno panela é mais eficiente do que a no forno elétrico convencional, porque:

- O tempo de refino é no mínimo cinco vezes maior do que no forno elétrico convencional.
- A escória é mais redutora, devido à remoção das escórias oxidantes ser feita com mais facilidade.
- A agitação da interface metal-escória pela rinsagem favorece a dessulfuração.

Em função da última análise química, são calculadas as adições para o acerto final de composição, a fim de se obter a composição especificada.



Para saber mais e socializar os reforços dos conhecimentos adquiridos nesta unidade acompanhe a execução do vídeo através do *link* youtube Sinobras – vídeo Institucional 2009. Desta forma seu estudo será mais proveitoso e prazeroso.
<http://www.youtube.com/watch?v=-ZREd5z0LVU>

Com a composição química e a temperatura dentro da faixa especificada, o metal está pronto para o lingotamento. O forno panela é desligado, a abóbada é levantada e o trole é deslocado, afastando a panela do equipamento. É desconectada a mangueira de rinsagem e a panela fica à disposição da ponte rolante que a transportará para a área de lingotamento.

O período de tratamento do metal do forno panela é de aproximadamente 30 minutos.

Resumo

Nesta aula apresentou-se o processo de fabricação de aço através do forno elétrico. Analisaram-se as reações químicas de oxidação e redução que ocorrem durante a transformação da sucata em aço, e a importância da desoxidação e dessulfuração do metal, as operações que ocorrem no forno panela e suas vantagens.



Atividades de aprendizagem

1. Durante o processo de tratamento do aço no forno panela, é feito a injeção de gás inerte pelo fundo da panela por um *plug* (rinsagem). Essa operação tem por objetivo:
 - a) Facilitar a dissolução e a homogeneização das adições.
 - b) Eliminar gases do aço.
 - c) Homogeneizar a temperatura e a composição química.

d) Agitar a interface metal-escória, proporcionando maior eficiência da desulfuração (remoção de S).

e) Todas estão corretas.

2. A liga Fe-Mn é adicionada no olho da rinsagem provocada pela sopro de um gás inerte sob pressão, no fundo da panela, com aço líquido. Dessa forma, procura-se:

a) Aumentar o volume de escória.

b) Uma melhor homogeneização e um melhor rendimento da liga.

c) Apenas uma melhor homogeneização.

d) Apenas um melhor rendimento da liga.

3. A escória oxidante tem na sua composição _____ FeO.

a) pouco

b) bastante

c) absolutamente nada

d) escassez de

4. Marque a alternativa **CORRETA**.

a) O refratário se desgasta mais intensamente quando a temperatura do metal for mais alta.

b) A irradiação do arco influi no desgaste do refratário.

c) O tempo de permanência do metal e da escória influi no desgaste de refratários.

d) Escória básica em contato com refratário básico ataca menos que a escória ácida em contato com o mesmo refratário básico.

e) Todas estão corretas.

5. Na fabricação de aços em forno elétrico a principal retirada da escória ocorre ao final do(a)

- a) fusão.
- b) refino oxidante.
- c) refino redutor.
- d) vazamento.

6. Marque a alternativa que torna as frases **CORRETA**:

A fase de refino oxidante no forno elétrico necessita de escória _____, com basicidade _____. Durante a fase oxidante, ocorre normalmente a _____ e a eliminação de impurezas, como _____

- a) básica, maior que 1, redução do carbono; enxofre.
- b) básica, maior que 1, redução do carbono, fósforo.
- c) ácida, menor que 1, redução do carbono, enxofre.
- d) ácida, maior que 1, redução do fósforo, enxofre.

7. Existem certas condições necessárias para que a desfosforação ocorra com eficiência.

I – A escória deve ser básica.

II – A escória deve ser ácida.

III – A temperatura do banho deve ser alta.

IV – A temperatura do banho deve ser baixa.

V – A escória deve ser fluida.

Estão corretas:

- a) Somente I, III e V.
- b) Somente I, IV e V.
- c) Somente II, III e V.
- d) Somente II, IV e V.

Aula 6 – Lingotamento estático, contínuo, classificação e nomenclatura dos aços

Objetivos

Identificar o lingotamento estático e contínuo.

Identificar os defeitos observados nos lingotes.

Conhecer as vantagens e desvantagens do lingotamento contínuo em relação ao estático.

Classificar os aços quanto ao teor de carbono e conhecer sua aplicação.

Classificar os aços através de normas.

6.1 Lingotamento convencional

Depois de completado o trabalho de refino do aço, a corrida é vazada em uma panela dotada de válvula e um sistema de movimentação do tampão ou válvula de gaveta. Essa operação visa transformar o aço líquido em produtos sólidos. Antes de cada utilização, a panela é aquecida, para evitar um choque térmico violento no revestimento, e também para evitar um resfriamento rápido do aço líquido.

O lingotamento pode ser direto ou indireto. No primeiro caso, enche-se cada lingoteira individualmente, mediante a aberturas sucessivas da válvula, tomando-se a precaução de manter o jato bem centrado. No lingotamento indireto, enchem-se vários lingotes ao mesmo tempo, através de um canal central, adotando-se o princípio dos vasos comunicantes como ilustra a Figura 6.1.

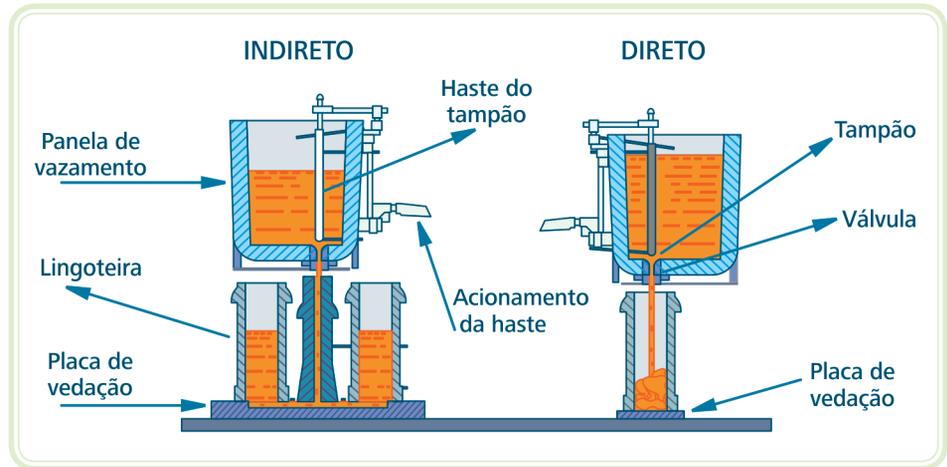


Figura 6.1: Lingotamento indireto e direto dos aços

Fonte: Araújo, 2007

As vantagens do lingotamento indireto são:

- Menor turbulência no molde.
- Menores vazões de lingotamento.
- Ausência de borrifos.
- Temperaturas de final de lingotamento mais elevadas.
- Proteção do aço no molde contra atmosfera.

Para proteção interna das lingoteiras e melhoria da superfície dos lingotes, usam-se tintas à base de grafite, alcatrão, melão ou outro produto comercial com esta finalidade. Pintura é feita em suspensão em água, a fim de evitar a aderência de óxidos às paredes e reduzir a oxidação das gotas frias (o que impediria a sua reabsorção pelo metal líquido que sobe na lingoteira).

Para o vazamento direto, as lingoteiras são postas sobre placas de ferro fundido, (assentos), com 250 a 330 mm de espessura, colocadas sobre a área de lingotamento. A vedação entre a lingoteira e o assento pode ser feita com um cordão de amianto. Não se recomenda o uso de argila refratária, devido ao risco de inclusões e da umidade.

6.1.1 Defeitos nos lingotes

Durante o enchimento da lingoteira e posterior solidificação do lingote, podem aparecer vários defeitos, tanto internos como externos.

6.1.1.1 Defeitos internos

- **Rechupe** – por ser insuficiente o volume de metal líquido para alimentar o volume do lingote.
- **Óxidos incrustados** – compostos de elevado ponto de fusão como Al_2O_3 , Cr_2O_3 que ficam retidos no lingote.
- **Inclusões** – ocorrem pelas reações no interior do próprio aço, através da oxidação do Si, do Mn, ou do Al adicionados no final da corrida durante a solidificação do lingote.
- **Segregação** – o aço é uma liga de ferro-carbono que contém, como impurezas normais vários outros metais e metalóides. No aço fundido todos esses elementos estão dissolvidos e distribuídos de modo praticamente uniforme. Essa homogeneidade, porém, não permanece quando o aço solidifica, porque as impurezas, especialmente o P e o S, não sendo tão solúveis no metal sólido, tendem em grande parte a se deslocarem para a região que por último se solidifica, no caso, o centro do lingote ou da peça. A parte central é a última a solidificar-se, não só porque o esfriamento é mais lento nessa região, também, porque as impurezas (especialmente o P) que para aí afluem, baixam o ponto de solidificação do metal. Ao acúmulo de impurezas nessa região dos lingotes e de certas peças fundidas, dá-se o nome de segregação.

6.1.1.2 Defeitos externos

- **Gotas frias** – causadas pela solidificação, nas paredes da lingoteira, de borrifos de aço que, não sendo imediatamente refundidos pela massa de metal líquido ascendente, oxidam-se na superfície e causam defeitos na laminação ou forjamento.
- **Bolhas** – nos aços acalmados são devidas principalmente a uma reação local durante o vazamento, causada pela umidade, oxidação ou excesso de pintura na lingoteira.
- **Dobras e ondulações** – são ondulações que formam-se pela oxidação do metal líquido durante sua solidificação.

- **Trincas** – elas se produzem entre 1200°C a 1300°C, quando a ductilidade é fraca. São formadas devido ao resfriamento, quando a delgada camada solidificada que já se destacou da parede da lingoteira não é suficientemente resistente à pressão do aço ainda líquido e é forçada contra as paredes da lingoteira.
- **Porosidade** – são bolhas pequenas que podem ser resultado de CO ou H₂ presos durante a solidificação. Em muitos casos, a causa da porosidade está na lingoteira. Além da umidade, sujeira e trincas são locais onde a água e os gases ficam presos, sendo depois absorvidos pelo aço.

6.2 Lingotamento contínuo

6.2.1 Histórico

A função básica do lingotamento contínuo é de interligar a aciaria aos processos de transformação mecânica, transformando o aço líquido em semi-produtos sólidos ou produtos acabados.

O processo fundamenta-se na extração de calor contido no aço líquido vazado no molde resfriado à água, e resfriamento secundário, provocando uma solidificação progressiva, da superfície para o núcleo.

É bastante antigo o desejo de lingotar diretamente o tarugo destinado à laminação de barras, eliminando-se o pesado e custoso laminador desbastador, bem como aumentar o rendimento total em produtos de aço.

Durante muitos anos, grande número de pesquisadores dedicou-se a desenvolver a técnica de vazamento e entre 1930 e 1940, Siegfried Junghans, na Alemanha, conseguiu lingotar continuamente. De início o latão e o alumínio, e depois, o próprio aço. Junghans observou que a velocidade de lingotamento era controlada pela possibilidade da formação de uma casca ou pele solidificada no interior do molde. No caso de uma lingoteira normal, isto é obtido pelo contato prolongado entre a parede e o metal vazado. No lingotamento contínuo Junghans fez o molde com uma velocidade três vezes superior. A primeira máquina para placas operou na Rússia, em 1951, e a pioneira na produção de tarugos foi a da *Barrow Stell* na Inglaterra, em 1952.

O lingotamento contínuo representa mais de 90% da produção japonesa e já passa de 50% da brasileira. Calcula-se que na próxima década a participação do lingotamento contínuo na produção mundial do aço será de 93%

(o restante serão os grandes lingotes de forja e os maiores tubos sem costura). O desenvolvimento prossegue com o vazamento de placas finas (entre 10 e 55 mm de espessura) ou mesmo de tiras, entre 1 e 10 mm.

6.2.2 O lingotamento contínuo compreende as seguintes operações:

- Fluxo do metal líquido através de um distribuidor para alimentar o molde.
- Formação de uma casca solidificada, no molde em cobre, resfriado a água.
- Extração contínua da peça.
- Remoção de calor do núcleo ainda líquido, por meio de chuveiros de água de resfriamento.
- Corte no comprimento desejado e remoção das peças, conforme ilustra a Figura 6.2.

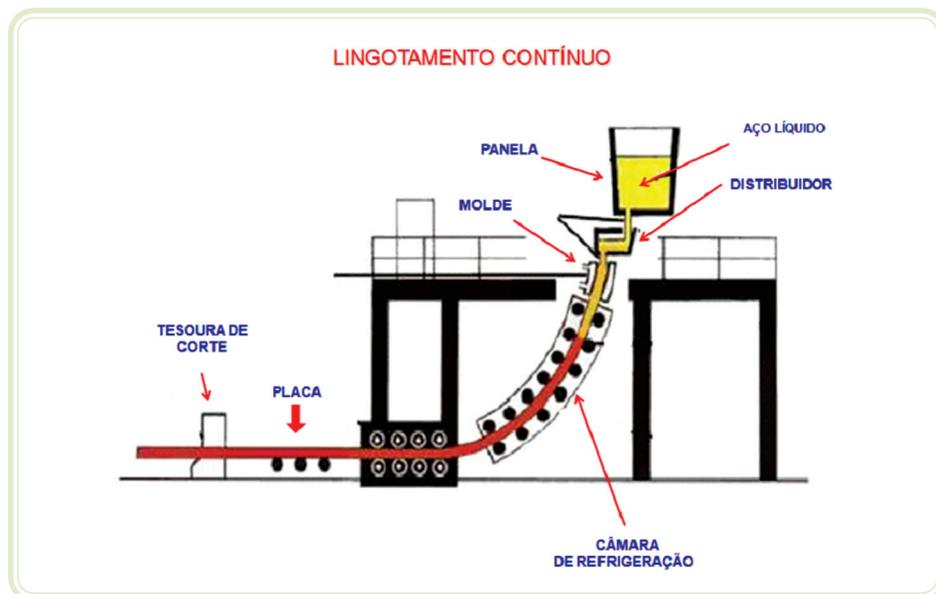


Figura 6.2: Máquina de lingotamento contínuo

Fonte: Apostila de Introdução à engenharia metalúrgica de Nestor Cezar Heck / UFRGS – DEMET

A-Z
forno-poço
Forno de reaquecimento
dos lingotes.

Vantagens do lingotamento contínuo:

- Aumento substancial no rendimento e na transformação do metal líquido em produtos semiacabados.
- Extinção de muitos custos da ala de vazamento, incluindo lingoteiras, cabeças quentes, pontes, estripadores de lingote.
- Eliminação do **forno-poço** e laminador desbastador.
- Melhoria da qualidade interna do aço, resultante de uma solidificação mas rápida.
- Melhor superfície da peça, eliminando as escamas e dobras, consequentes do vazamento e da laminação primária.

No caso do aço, o lingotamento contínuo não é fácil, pois sua temperatura de fusão é alta, a condutibilidade é baixa, o calor específico é elevado e o gradiente de solidificação lento. Além disso, o aço líquido dissolve quase todos os outros metais e o carbono ataca ou corrói os materiais refratários com os quais entra em contato. Assim, o desenvolvimento do lingotamento contínuo tem sido conseguido pela produção de equipamento robusto, capaz de resistir a altas temperaturas, ao ataque e à erosão pelo aço líquido e, ao mesmo tempo, capaz de permitir a rápida extração de calor, de modo que a solidificação possa se realizar de maneira razoavelmente rápida e controlada.

O aço é transferido para a calha de distribuição, em vazamento pelo fundo das panelas. A calha intermediária serve para manter um volume determinado de aço, alimentando o molde, através do conjunto de válvula e tampão nela instalado.

O distribuidor é, pois, uma caixa revestida de refratário, projetada para fornecer uma corrente de metal líquido em baixa velocidade, isenta de escória e exatamente posicionada sobre o molde.

É necessária uma atmosfera protetora entre a panela intermediária e o molde, para reduzir o quanto possível a oxidação do aço.

Durante a passagem do metal pelo molde de cobre, solidifica-se uma crosta periférica, e o núcleo permanece líquido. Este núcleo é levado à solidificação depois de deixar o molde, pelo resfriamento de água diretamente no produto obtido (placa, vergalhão, etc.). O ritmo de produção é controlado pela velocidade dos roletes extratores.

Nos preparativos para o lingotamento, uma barra falsa é inserida na máquina, desde os rolos extratores até o interior do molde. A barra falsa funciona como assento de lingoteira e serve de base de apoio para o metal que se solidifica inicialmente.

O lingotamento contínuo é, portanto, um processo no qual o metal sai da máquina sob a forma de uma barra (ou placa) já sólida externamente.

O comprimento do molde deve ser suficiente para que a casca solidificada tenha resistência própria, bastante para não se romper ou inchar demasiadamente, por força da pressão ferrostática da zona líquida central. Ao emergir a barra da parte inferior do molde, um comprimento de 500 a 800 mm é o comum para a grande maioria das instalações.

O propósito da oscilação do molde é evitar o atrito e a colagem da pele solidificada à face interna da lingoteira de cobre, o que poderia causar o rompimento da crosta ainda fina, pelo aparecimento de esforços de tração naquela região (ajudada ainda mais pela pressão de ferrostática). Caso esses esforços excedam à coesão do aço em solidificação, há a ruptura da pele e poderá ocorrer um sangramento de aço líquido. Para reduzir a tendência do aço de agarrar à parede do molde, Ian Halliday desenvolveu em 1959, na Inglaterra, o estripamento negativo, em que o molde tem um movimento descendente ainda mais rápido que a peça, o que causa um ligeiro esforço de compressão na casca, permitindo assim, fechar quaisquer rupturas incipientes e diminuir a porosidade, aumentando a resistência da casca, antes da barra emergir do molde. Portanto, em momento algum, o molde se desloca com a mesma velocidade que a barra.

Para iniciar uma corrida, a barra-falsa é inserida no molde e entre os dois colocada uma vedação (cordão de amianto), de modo a permitir a acumulação do volume inicial do aço líquido e iniciar a formação da pele solidificada.

Depois que o molde encher até a altura desejada, a barra-falsa vai sendo extraída gradualmente, no mesmo ritmo em que o aço líquido vai vazando

na lingoteira de cobre. O comprimento desta e a velocidade de lingotamento são escolhidos de tal modo, que a espessura da casca solidificada, ao deixar o molde, seja capaz de resistir às pressões do metal ainda líquido. Para evitar a colagem da pele ao molde, ele é submetido a um movimento oscilatório e um lubrificante é injetado na parte superior das paredes.

Ao deixar o molde, a barra consiste numa casca sólida e num núcleo fluído. A zona de resfriamento secundário tem de 3 a 12 m de comprimento, conforme a seção produzida. Sua função é solidificar completamente a peça, sem haver tensões ou deformações excessivas. A barra é guiada por uma série de rolos de apoio que suportam a parte solidificada e evitam distorções ou inchamento. Chuveiros de água, instalados entre os rolos, permitem orientar e controlar o seu resfriamento.

Depois de deixar a zona de resfriamento secundário, a remoção de calor só se faz pela irradiação e, portanto, a uma velocidade bem menor. No final, a barra passa entre pares de rolantes extratores que controlam a velocidade de toda a operação e que suportam o seu peso; a seguir ela é cortada pelos maçaricos ou tesouras mecânicas, nos comprimentos desejados.

6.3 Classificação dos aços quanto à composição química

6.3.1 Aços comuns

É toda liga Fe-C, com o teor de carbono variando de 0,008% a 2,0% maleável e que não contém outros elementos além do Si, Mn, P e S, resultante de processos de fabricação em porcentagens baixas. Esses elementos são considerados impurezas e seus teores variam entre:

Si – 0,10% a 0,30%; Mn – 0,25% a 1,65%; P e S menos que 0,05%.

Os aços comuns podem ser classificados quanto ao seu teor de carbono em:

- **Aços comuns de baixo teor de carbono** – quando apresentam menos de 0,25% de C, por apresentarem boa plasticidade, são usados na fabricação de chapas, barras e perfis.
- **Aço comum de médio teor de carbono** – quando apresentam um teor entre 0,25% a 0,50% de C, por apresentarem elevada dureza e uma boa resistência, são usados na fabricação de eixos, trilhas e rodas locomotivas.

- **Aços comum de alto teor de carbono** – quando apresentam um teor acima de 0,50% de C, por apresentarem elevada dureza são usados na fabricação de limas, molas de automóveis, punções a algumas matrizes.

6.3.2 Aços não comuns

São os que, em virtude de precauções especiais de sua composição apresentam propriedades superiores às dos aços comuns, para finalidades específicas. Eles apresentam teores dos elementos normais elevados.

6.3.3 Aços especiais

Quando apresentam além dos elementos normais, outros elementos especiais como (Cr, Ni, Mo, etc.), são também chamados de aços-liga ou aços ligados.

Quanto à designação por número.

O número indica teores dos principais elementos de liga.

Exemplo

Aço 18-8 – é um aço inoxidável austenítico que contém 18% de Cr e 8% de Ni.

6.4 Nomenclatura dos aços

É uma designação adotada pela S.A.E. (*Society of Automotive Engineers*) e mais tarde modificada pela A.I.S.I. (*American Iron and Steel Institute*).

Ambas as associações seguem aproximadamente o mesmo método numérico de identificação, o qual, em linhas gerais, consiste no seguinte:

Quatro números chaves são utilizados para designar os aços. Os dois primeiros indicam o tipo e o teor aproximado dos elementos de liga. Os dois últimos especificam o teor de carbono em centésimos por cento.

As chaves são as seguintes:

a) aço carbono – 1XXX

SAE 10XX – aço carbono comum

SAE 11XX – aços carbonos não comuns

SAE 12XX – aços com alto teor de fósforo

SAE 13XX – aços carbonos com alto teor de manganês

b) SAE 2XXX – aço níquel

SAE 23XX – aço níquel com 3% de níquel

c) SAE 3XXX – aço níquel cromo

d) SAE 4XXX – aço molibdênio

Exemplo

SAE 1020 – aço carbono comum com 0,20% de carbono.

A norma que regulamenta e especifica a produção de barras e fios de aço é a **ABNT NBR 7480** – Barras e Fios de Aço Destinados a Armaduras para Concreto Armado: versão 1996.

A classificação dos aços nas categorias CA25, CA50 e CA60 é feita através de suas características mecânicas obtidas no ensaio de tração.

Nesse ensaio são determinados: o limite de resistência, o limite de escoamento, e o alongamento, os quais devem atender aos seguintes valores padronizados mostrados na tabela 2 do anexo B da **NBR 7480** (Tabela 6.1).

Tabela 6.1: Classificação dos aços CA do anexo B da NBR 7480

Categoria	Limite de escoamento kgf/mm ² (MPa)	Limite de resistência	Alongamento (em 10 Ø) %
CA25	25 (250)	1.20 x L. E.	18
CA50	50 (500)	1.10 x L. E.	8
CA60	60 (600)	1.05 x L. E.	5
Mínimos exigidos pela norma Norma ABNT NBR 7480 (anexo B / Tab. 2).			

Fonte: Apostila Aços Belgo CA50 e CA60

Resumo

Nessa aula apresentou-se que a função do lingotamento contínuo é de interligar a aciaria aos processos de transformação mecânica, transformando o aço líquido em produtos semiacabados sólidos ou produtos acabados.

Demonstrou-se também como é feita a classificação dos aços e sua aplicação e ainda que a especificação destes aços é normatizada, ou seja, que segue uma norma técnica obedecida por todos os países que industrializam esse material.

Atividades de aprendizagem



1. Assinale a alternativa em que o lingotamento contínuo não utiliza a seguinte operação:
 - a) Fluxo do metal líquido através de um distribuidor para alimentar o molde.
 - b) Formação de uma casca solidificada no molde em cobre resfriado a água.
 - c) Extração contínua da peça.
 - d) Remoção de calor do núcleo ainda líquido por meio de chuveiros de água de resfriamento.
2. Assinale a alternativa **CORRETA**. Durante o lingotamento e posterior solidificação do lingote, pode aparecer o defeito, denominado de rechupe, que é
 - a) o volume insuficiente de metal líquido para alimentar totalmente o lingote.
 - b) um composto de elevado ponto de fusão como Al_2O_3 , Cr_2O_3 , etc.
 - c) proveniente de reações que ocorrem durante o processo, ou pela oxidação do Si, do Mn, do Al, adicionados no final da corrida.
 - d) causado pelas reações de oxidação que ocorrem na lingoteira durante a solidificação do aço.

3. A respeito do aço médio carbono, podemos afirmar que
- a) possui um potencial de dureza maior do que o aço de baixo carbono.
 - b) a tenacidade, a resistência à tração, são entre boa e regular.
 - c) possui um teor de carbono entre 0,25 e 0,50%.
 - d) é utilizado na fabricação de fios e parafusos.
 - e) todas as alternativas citadas estão corretas.
4. O aço designado CA-50 é aquele que:
- a) Deve apresentar o limite de escoamento no mínimo de 50 MPA.
 - b) Deve apresentar o limite de escoamento no mínimo de 50 kgf/mm².
 - c) Deve apresentar o limite de resistência no mínimo de 50 MPA.
 - d) Deve apresentar o limite de resistência no mínimo de 50 kgf/mm².
 - e) Deve apresentar o limite de ruptura no máximo de 50 MPA.

Referências

ARAÚJO, Luiz Antônio. **Manual de Siderurgia**. Vol I. São Paulo: Produção, Editora Arte & Ciências, 2007.

COLPAERT, Humbertus. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. Ed. Blucher, 2008. 672 p.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime A; SANTOS, Carlos Alexandre; CHEUNG, Noé. **Lingotamento Contínuo dos Aços**. Editora ABM, 2006. 299 p.

HARDERS & KIENOV, Feuerfestkunde; MAUBON A. **Aciérie LD STEEL**. U. S. The making, shaping and treating of steel. Metals Handbook – volume XV.

LOURÃO, Marcelo Breda. **Introdução a Siderurgia**. Editora ABM, 2007. 428 p.

RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. **Introdução aos Processos de Refino Secundário dos Aços**. Editora ABM, 2006. 102 p.

RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. **Introdução aos Processos de Refino Primário dos Aços nos Conversores a Oxigênio**. Editora ABM, 2006. 118 p.

RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. **Introdução aos Processos de Preparação de Matérias-Primas para o Refino do Aço**. Editora ABM, 2005. 71 p.

RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. **Introdução aos Processos de Refino Primário dos Aços nos Fornos Elétricos a Arco**. Editora ABM, 2006. 104 p.

RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. **Processo de Fabricação de Ferro Gusa em Alto Forno**. Editora ABM, 2009. 278 p.

SILVA, André Luiz da Costa. **Aços e Ligas Especiais**. Eletrometal – Metais especiais.

Currículo do professor-autor



José Nazareno Santos da Silva é graduado em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal Fluminense (1979). Possui especialização em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Pará (1997) e Mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Pará (2007). Professor desde 1985 do Curso de Metalurgia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA). Além da docência no Curso Técnico de Metalurgia e Engenharia de Materiais nas disciplinas de Siderurgia, Fundição e Ensaios Mecânicos, dedica-se ao estudo de pesquisa, participando do Grupo de Metalurgia Física e de Transformação do IFPA na área de solidificação, atuando principalmente nos seguintes temas: parâmetros térmicos e estruturais da solidificação, solidificação unidirecional horizontal, e coeficiente de transferência de calor metal/molde.