

PROCESSOS DE ELABORAÇÃO DE AÇOS

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

O ferro ocorre, na natureza, sob diversas formas de minerais. Entretanto, apenas alguns destes têm valor comercial como fontes de ferro. Dentre estes, os diversos minerais formados por óxidos de ferro representam a grande maioria das fontes de ferro para a indústria siderúrgica. São eles [1]:

- Magnetita (Fe_3O_4) — Correspondente a aproximadamente 72%Fe/28%O, de coloração cinza-escura a preta, densidade 5,16g/cm³. É altamente magnética, permitindo sua separação fácil de resíduos indesejáveis do minério (ganga). A magnetita é minerada principalmente na Suécia e União Soviética. Vem recebendo grande atenção, ultimamente, devido à facilidade de concentração decorrente de suas propriedades magnéticas.
- Hematita (Fe_2O_3) — Corresponde à composição aproximada de 70%Fe/30%O: varia de cinzenta a avermelhada, tendo densidade de 5,26g/cm³. É o minério de maior emprego na siderurgia, sendo o Brasil um dos grandes produtores mundiais.

Em muitas jazidas, há certa proporção de material friável que se desagrega facilmente, produzindo finos que não podem ser usados diretamente no alto-forno ou nos processos de redução. Também na moagem e classificação da hematita ocorre a formação de finos.

Estes finos são aglomerados em processos de pelotização ou sinterização, produzindo material de granulometria controlada e excelente rendimento nos altos-fornos.

As vantagens associadas ao uso de pelotas e sinter em alto-forno (reduzibilidade, permeabilidade da carga etc.) são tantas, que este tipo de carga é o preferido nos modernos altos-fornos.

8.1 - A PRODUÇÃO DE FERRO GUSA - ALTO-FORNO

A extração do ferro de seus minérios data da era pré-histórica. Entretanto, somente após o século XIV foram desenvolvidos fornos capazes não apenas de reduzir o ferro (redução: $\text{Fe}^{+3} + 3\text{e} \rightarrow \text{Fe}$ ou $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{C} \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{CO}$) a ferro metálico, mas também de fundí-lo de modo a que o produto pudesse ser fundido nas formas desejadas. É importante ter em mente que o alto-forno, com sua alta eficiência e produtividade, é, portanto, o resultado de 500 anos de evolução técnica.

8.1.1 - O ferro gusa

O ferro gusa é a forma intermediária pela qual passa praticamente todo o ferro usado na produção do aço (ver item 8.2 — redução direta). Além disso, o próprio ferro gusa é empregado em fundições, para produção de fundidos de ferro.

Genericamente, pode-se definir ferro gusa pela composição química situada nas seguintes faixas:

Carbono	3,5-4,5%
Silício	0,3-2,0%
Enxofre	0,01-0,1%
Fósforo	0,05-2%
Manganês	0,5-2%

8.1.2 - O alto-forno

A Fig. 8.1 mostra, esquematicamente, um alto-forno. Neste processo, são carregados, alternadamente, pelo topo: minério de ferro (ou pelotas ou sinter), coque (combustível e redutor) e fundente (calcário e/ou dolomita). Pelotas e sinter autofundente, em que adições controladas de fundente são realizadas durante a aglomeração, vêm sendo empregadas com excelentes resultados nos modernos altos-fornos.

O controle da permeabilidade do material no interior do alto-forno é fundamental para sua eficiente operação e aumento da produtividade. Assim, muita atenção vem sendo dada ao controle dos materiais carregados (tamanho e comportamento no interior do forno) e ao modo de carregamento, para garantir distribuição uniforme e, conseqüentemente, permeabilidade elevada e uniforme.

Sistemas de carregamento "sem-cone" (Paul Wurth) têm substituído os sistemas tradicionais de dois cones. Nestes sistemas, um distribuidor giratório é capaz de colocar o material em posição pré-definida no topo do forno, através do conhecimento da trajetória da queda, prevista em função de densidade e granulometria [2,3].

Pelas ventaneiras é insuflado ar (pré-aquecido, normalmente) e, por vezes, combustíveis (óleo, gás ou carvão em pó). O ar soprado queima parte do coque, para fornecer calor às reações químicas e para fusão do ferro, enquanto que o resto do coque e parte do produto da queima remove o oxigênio combinado com o metal (redução).

O balanço energético do alto-forno é, normalmente, ajustado de modo a atender as necessidades da usina integrada, considerando os custos relativos dos combustíveis e produtos. Enquanto no começo da década de 70 grandes quantidades de óleo combustível eram injetadas para reduzir o consumo específico de coque, após as duas crises do petróleo, a seleção das fontes de energia empregadas teve de ser repensada, considerando, inclusive, o alto-forno como "gerador de gás", capaz de suprir necessidades de fornos de reaquecimento, por exemplo, melhorando a matriz energética da usina, como um todo [2].

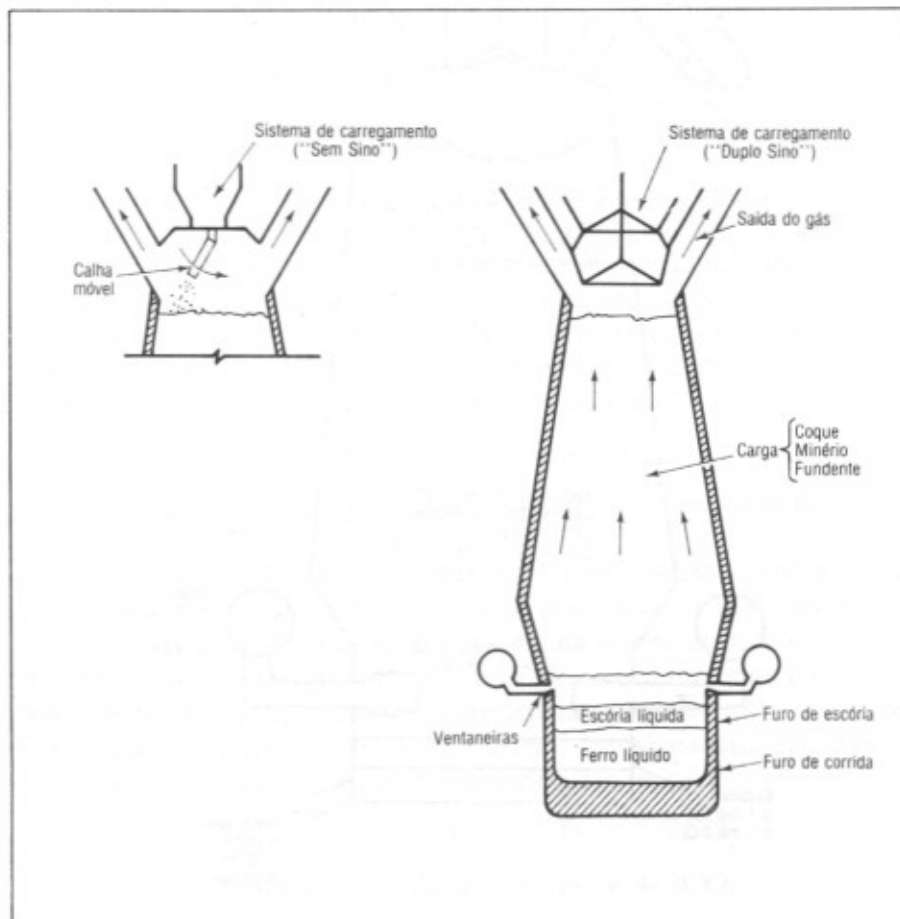


Fig. 8.1 - Esquema de um alto-forno.

As proporções dos materiais empregados variam em função da prática operacional. Um exemplo seria: 1.7 t de minério, 0.5-0.65 t de coque, 0.25 t de calcário (eventualmente parcialmente contido nas pelotes ou sinter) e 1.8-2.0 t de ar (Fig. 8.2). Desta carga, obter-se-ia 1 t de gusa, 0.2-0.4 t de escória (que pode ser empregada na fabricação de cimento) e 2.5-3.5 t de gás de alto-forno, normalmente usado para aquecimento em diversas aplicações na usina, por conter alto teor de CO.

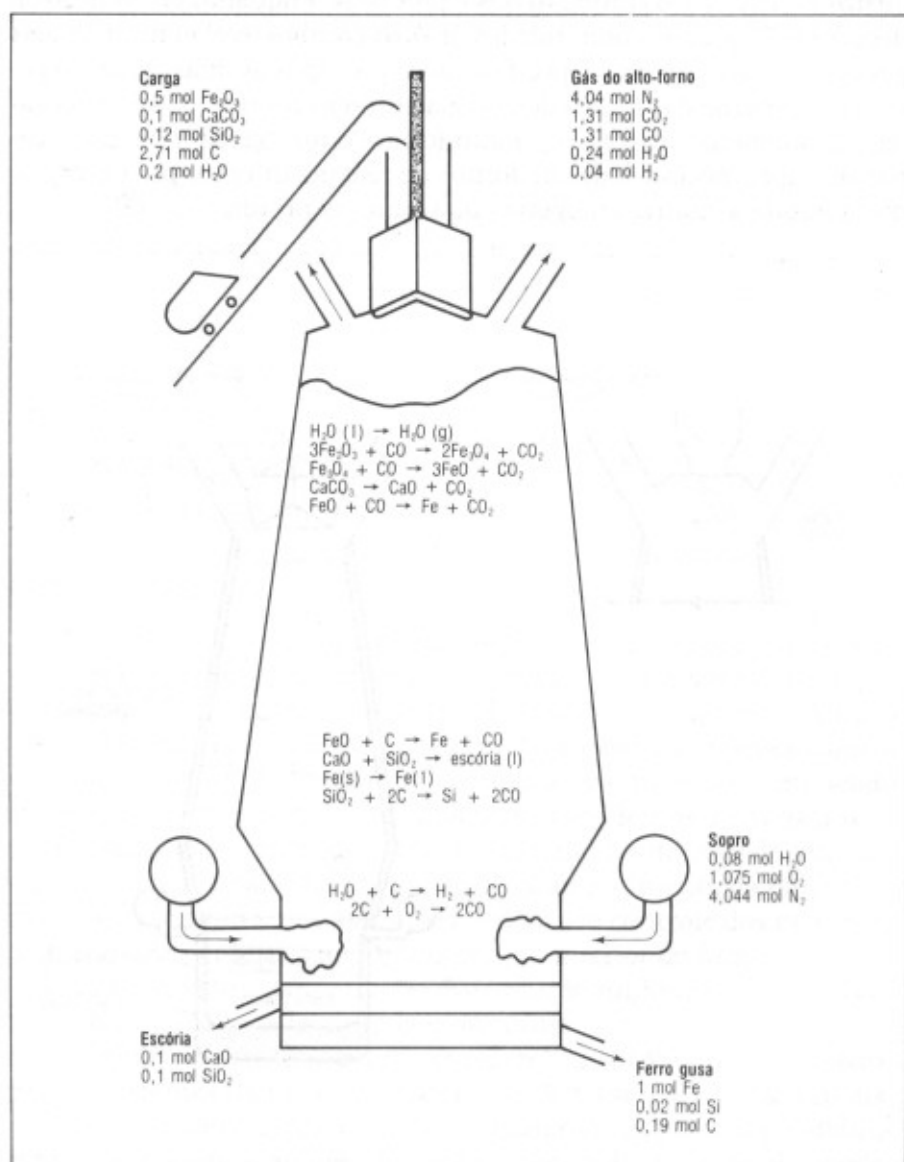


Fig. 8.2 - Balanço de massa de um alto-forno [3].

Como o alto-forno é um equipamento cuja produtividade cresce com a capacidade, a tendência é de utilizar-se equipamentos cada vez maiores, como o Alto-Forno nº 1 da Cia. Siderúrgica Tubarão (CST) com capacidade de produzir 3,4Mt/ano. Ao mesmo tempo, a quantidade de equipamentos auxiliares e periféricos envolvidos é bastante grande, como pátio de matérias-primas, sistemas de carregamento, trocadores de calor (cowpers), gasômetros etc. Tais sistemas envolvem altíssimos investimentos, que, no Brasil, até o presente, somente têm sido realizados, em grande escala, pelo governo.

8.1.2.1 - Reações no processo do alto-forno

A análise das reações que ocorrem no processo do alto-forno é realizada através da termoquímica metalúrgica e da cinética química. Evidentemente, um tratamento rigoroso destas disciplinas transcende aos objetivos deste texto, podendo ser encontrado em [3, 4, 5] por exemplo.

A seguir é apresentada uma análise simplificada destas reações.

8.1.2.1.1 - PRODUÇÃO DE CALOR E REDUÇÃO DO FERRO

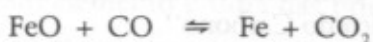
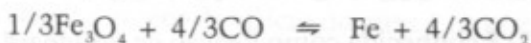
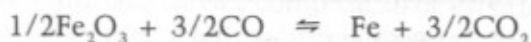
Quando os materiais de carga e o coque são carregados no topo do alto-forno, eles são pré-aquecidos pelos gases quentes que ascendem pela coluna. Assim, quando o coque atinge a porção inferior do forno, entrando em contato com o ar quente insuflado pelas ventaneiras, ele queima com grande intensidade. Nas temperaturas existentes nesta região ($>1500^{\circ}\text{C}$), o CO_2 não é estável em presença de um excesso de carbono, sendo a reação de oxidação expressa por:



Esta oxidação se completa a uma distância muito pequena das ventaneiras (1-3m) [3].

Esta reação não apenas produz o calor necessário, como produz o principal agente redutor do processo, o monóxido de carbono (CO).

Nas partes mais altas do forno, onde a temperatura é mais baixa ($\sim 800^{\circ}\text{C}$), o gás ascendente começa a reduzir o minério de ferro. A estas temperaturas, o equilíbrio químico impede que todo o CO seja empregado na redução, sendo necessário, aproximadamente, três vezes mais CO que o valor estequiométrico das reações:



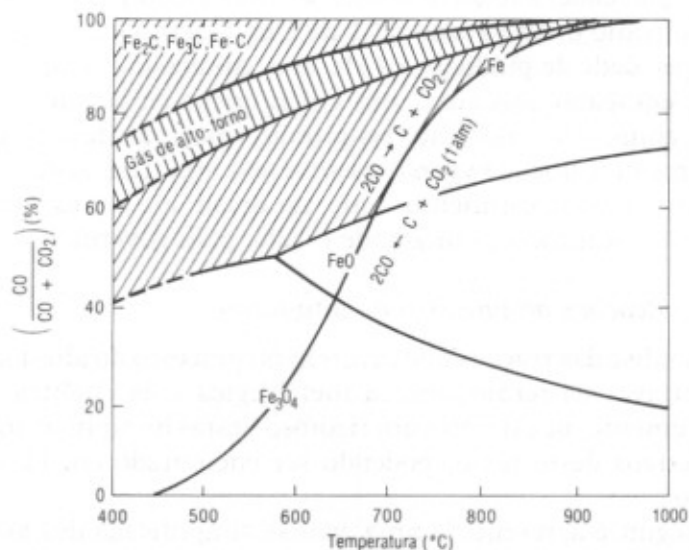


Fig. 8.3 - Diagrama de equilíbrio Fe-C-O [3].

Este excesso de CO torna o gás de alto-forno de valor como combustível. A Fig. 8.3 ilustra as condições de equilíbrio destas reações [3].

Além disto, se houver umidade no ar insuflado, estabelecer-se-á o equilíbrio.



de modo que haverá hidrogênio disponível como redutor, também.

O óxido de ferro não reduzido nas regiões mais altas do forno, será reduzido na porção inferior, a mais alta temperatura, onde o CO_2 não é estável, portanto:



e



ocorrerão, em seqüência, resultando em:



A reação (2) é conhecida como Reação de Boudouard ou de "Gaseificação Endotérmica do Carbono".

A presença de grandes quantidades de carbono no forno, e a alta solubilidade deste no ferro líquido (diagrama Fe-C, Fig. 8.), são responsáveis pelo alto teor de carbono obtido no ferro gusa. Na verdade, este fato é um dos principais responsáveis pela operação do alto-forno, pois o carbono abaixa bastante o ponto de fusão do ferro (Fig. 8.1, de 1535°C para 1130°C no eutético).

Um dos principais motivos pelo qual não se obtinha ferro líquido antes do século XIV, é justamente o fato de que os fornos eram pequenos demais e operavam a temperaturas muito baixas para permitir a absorção de carbono suficiente pelo ferro, de modo a abaixar seu ponto de fusão suficientemente.

8.1.2.1.2 - REDUÇÃO DO SILÍCIO, FÓSFORO E MANGANÊS

Nas temperaturas da parte superior do alto-forno, alguns dos óxidos superiores de manganês são reduzidos pelo CO:



Entretanto, o MnO não é redutível pelo CO às temperaturas encontradas na rampa. Assim, a única reação que pode expressar sua redução é:



ocorrendo na parte inferior do alto-forno. Às temperaturas mais altas, a redução do manganês é favorecida, mas na maior parte dos casos, o total reduzido atinge de 65-75% do manganês carregado, indo o restante para a escória.

A redução do silício é também favorecida pelas altas temperaturas, de acordo com a reação global:



É importante observar que a reação (3) entre escória e metal é lenta demais para justificar os teores de silício encontrados no gusa. O mecanismo de redução da sílica no alto-forno parece envolver a formação do subóxido SiO, gasoso. Do ponto de vista termoquímico, entretanto, a reação (3) expressa a reação global de redução do silício.

Para uma determinada carga e composição de escória, o teor de silício no gusa é proporcional à temperatura do metal. Para a fabricação do aço em conversores, o teor de silício no gusa é uma variável essencial, pois a oxidação deste elemento é uma das principais fontes de energia no processo (ver item 8.3.1).

A redução do fósforo é sumarizada por:



Praticamente todo o fósforo carregado no alto-forno é incorporado ao gusa, uma vez que a única maneira de escorificá-lo seria através do uso de uma escória oxidante, incompatível com o processo do alto-forno.

Neste ponto, o minério brasileiro é de excelente qualidade, por apresentar baixos teores de fósforo.

8.1.2.1.3 - ELIMINAÇÃO DO ENXOFRE

O enxofre entra no alto-forno principalmente através do coque. (Este é o principal problema do emprego do carvão brasileiro na produção de coque metalúrgico: seu alto teor de enxofre.) A eliminação do enxofre requer o uso de escórias básicas [alta relação CaO/SiO_2], com alta razão de distribuição do enxofre (%S na escória/%S no metal, em equilíbrio), de vez que o processo ocorre durante o gotejamento do ferro líquido através da escória. Para escórias com 45-55% de $SiO_2 + Al_2O_3$, a razão de distribuição é de 20-40 e para escórias de alta basicidade, pode atingir 60-80. Se as matérias-primas carregadas contêm alto teor de enxofre, o gusa produzido pode ter até 0.2% deste elemento. Nestes casos, pode ser recomendado o emprego de tratamentos de desulfuração com carbonato de sódio, carbureto de cálcio ou Mag-Coque (magnésio + coque) no vazamento do metal líquido.

Vazado o metal do alto-forno, este pode ser fundido em "pães", pequenos lingotes, para utilização por fundições ou aciarias ou transportado, líquido, em carros torpedo, para a Aciaria na própria usina (ver item 8.3).

É interessante observar que o alto-forno é um processo contínuo. Problemas diversos surgem na partida e nas paradas deste equipamento, que podem requerer semanas e devem ser evitadas ao máximo, razão pela qual muita ênfase é colocada na melhoria dos refratários de altos-fornos e na correta operação destes equipamentos, para se obter o máximo de produtividade.

8.2 - PROCESSOS DE REDUÇÃO DIRETA

Processos de redução direta são aqueles em que ferro metálico é produzido, através da remoção do oxigênio associado, a temperaturas inferiores ao ponto de fusão dos materiais empregados.

O produto da redução é uma massa porosa, com o formato apro-

ximado da fonte de ferro carregada no equipamento, e é chamado de ferro-esponja.

Apesar de alguns processos experimentais envolverem a produção direta do aço, esta possibilidade não é discutida aqui.

Historicamente, os processos de redução direta precederam o alto-forno; entretanto não puderam evoluir para grandes escalas de produção e foram ultrapassados pelo alto-forno.

Os principais motivos que têm mantido o interesse no desenvolvimento destes processos estão relacionados ao desejo de se aproveitar carvões não coqueificáveis ou excessos de gás natural em regiões ricas nestes insumos.

Uma importante vantagem, do ponto de vista de capital, é que os processos de redução direta são adequados à instalação de miniusinas, menores que as usinas integradas, espalhadas geograficamente.

Tal fato é especialmente importante em países pobres e de grandes áreas, de modo a atender as necessidades de produção de aço localmente, com expansões de produção mais baratas e proporcionando emprego em várias regiões. É necessário, entretanto, dispor-se de redutor/combustível em quantidade suficiente no local.

As principais diferenças entre os diversos processos existentes está na maneira como os reagentes são postos em contato, e na fonte de redutor empregado.

Muitas fontes de redutores foram experimentadas (evidentemente, em todos os casos, as reações de redução envolvem monóxido de carbono e hidrogênio como redutores). Atualmente, só existem instalações comerciais bem sucedidas utilizando gás natural, carvão e derivados de petróleo [6].

Quanto à forma dos reatores (e conseqüentemente o modo de contato dos reagentes) quatro tipos principais atingiram sucesso comercial [6]:

- Fornos de Leito Móvel
- Retortas de Leito Fixo
- Leitos Fluidizados
- Fornos Rotativos

O Processo de Leito Fluidizado (HIB - High Iron Briquette) foi implantado comercialmente em 1971, na Venezuela, pela US Steel. Nesta instalação, para um milhão de toneladas de briquetes/ano, com grau de redução 75%, o gás-redutor é produzido cataliticamente a partir de gás natural e vapor e reduz o minério moído a 10 mesh. O produto da redução é, posteriormente, briquetado.

Fornos de Leito Móvel atualmente são representados pelas instalações MIDREX, compostas de um gerador de gás redutor (que pode ser projetado para utilizar gás natural, óleo combustível pesado ou outros materiais) e um forno de redução onde o minério é reduzido por este gás redutor.

O melhor exemplo de forno de leito fixo é o processo HyL, que utiliza quatro estágios com gás e minério em contra-corrente.

Os processos de forno rotativo (como o SL/RN, empregado no Rio Grande do Sul) empregam carvão como fonte de redutor e são extremamente sensíveis à formação de "anéis" de material que adere às paredes do forno, por sinterização.

As características mais importantes de um ferro-esponja são: grau de metalização (% do ferro reduzido) ou grau de redução, teor de carbono (% de carbono absorvida no processo, em geral baixa) e quantidade e composição da ganga ou escória (de vez que não há fusão, os óxidos e impurezas presentes no minério passam diretamente ao produto final).

O ferro-esponja é uma excelente carga para fornos elétricos por ter teores de elementos residuais muito baixos, composição química uniforme e conhecida e por ser de fácil manuseio e estocagem.

Assim, apesar de os processos de redução direta não serem normalmente capazes de competir em bases econômicas com o alto-forno, são opções válidas, à proporção que escasseia a sucata de boa qualidade e os preços do ferro-esponja se tornam competitivos.

8.3 - ACIARIA

Observando-se a composição típica do ferro gusa, nota-se que, para se atingir a composição desejada nos aços, além dos elementos de liga, é necessário reduzir o teor de carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre. Numa usina siderúrgica tais operações são realizadas na aciaria (Fig. 8.4).

Os processos de aciaria dividem-se em processos ácidos ou básicos, dependendo do tipo de refratário e escórias empregadas. Enquanto o carbono, manganês e silício podem ser removidos facilmente com qualquer dos dois processos, o enxofre e o fósforo somente são removidos em condições especiais, atendidas apenas pelos processos básicos, onde cal é adicionada ao sistema para formar uma escória básica, capaz de reter os compostos de fósforo e enxofre formados durante o processo de refino. Obviamente, a grande maioria dos processos de aciaria modernos são básicos.

O princípio químico empregado no refino do gusa para obtenção do aço é a oxidação. Assim, todos os processos de aciaria envolvem

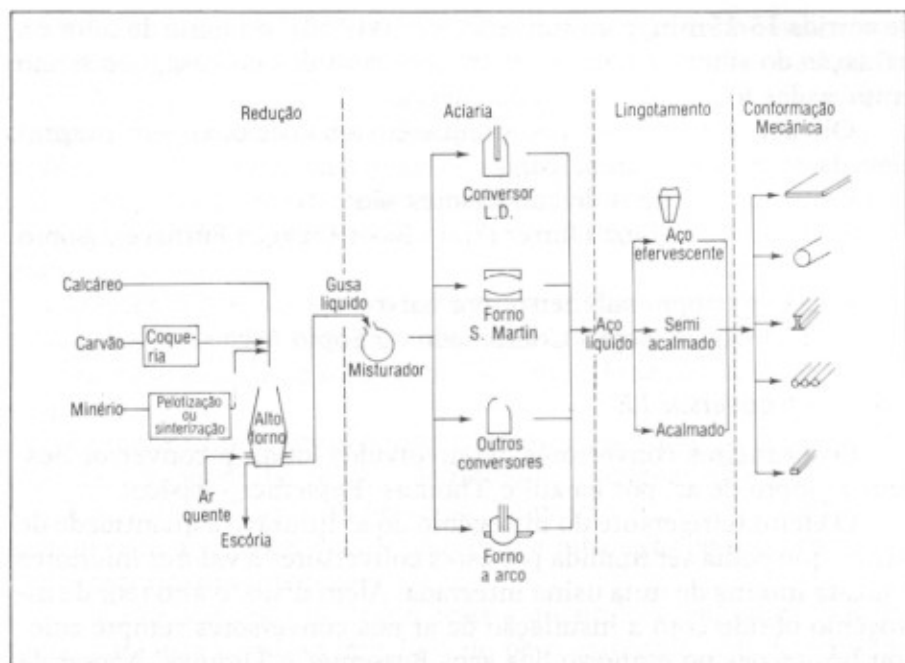


Fig. 8.4 - Fluxograma de uma usina integrada.

meios de introduzir quantidades controladas de oxigênio. O oxigênio se combina com os elementos indesejáveis (exceto o enxofre) e, inevitavelmente, com parte do ferro, formando óxidos que podem deixar o sistema como gases ou passar à escória. A remoção do enxofre não envolve a oxidação, mas depende da basicidade da escória e da temperatura atingida no processo.

À proporção que o gusa é refinado (reduzindo-se o carbono, manganês e silício, principalmente), seu ponto de fusão aumenta, sendo necessário introduzir calor, por algum meio, para se manter a carga líquida.

8.3.1 - Processos pneumáticos de aciaria (conversores)

Os processos pneumáticos são aqueles em que ar ou oxigênio puro é soprado sob pressão, através ou sobre a superfície do gusa líquido para produzir o aço. Se o ar é usado, o nitrogênio contido não serve para nenhum fim prático, apenas resfriando o material e sendo absorvido parcialmente pelo aço, onde é uma impureza indesejável. Se o oxigênio puro é empregado, tais problemas são eliminados.

A maior parte dos aços comuns é produzida hoje em conversores pneumáticos, onde o processamento é extremamente rápido (tempo

de corrida 15-25 min, para conversor de 100-150t) e a fonte de calor é a oxidação do silício, carbono e manganês contidos no gusa, não sendo empregadas fontes adicionais de energia.

Obviamente, tais processos requerem o uso de uma percentagem elevada de gusa líquido na carga.

Os principais tipos de conversores são:

- LD ou BOF (Linz-Durrer [7] ou Basic Oxygen Furnace), (sopro por cima)
- Q-BOP (sopro submerso, por baixo)
- Processos de Sopro Combinado ou Sopro Misto.

8.3.1.1 - Conversor LD

Os primeiros conversores desenvolvidos foram o conversor Bessemer (sopro de ar, por baixo) e Thomas (Bessemer - básico).

O efeito refrigerante do nitrogênio do ar limitava a quantidade de sucata que podia ser fundida por estes conversores a valores inferiores à sucata interna de uma usina integrada. Além disto, o alto teor de nitrogênio obtido com a insuflação de ar nos conversores sempre colocou limitações no emprego dos aços Bessemer e Thomas. Apesar de Bessemer já haver previsto a possibilidade de emprego de oxigênio puro, este gás só se tornou disponível em grandes toneladas a preços razoáveis nas últimas décadas. De vez que o uso de oxigênio em ventaneiras causa erosão acentuada, o processo desenvolvido na Áustria (em Linz) utiliza o sopro por cima do banho, com uma lança de cobre refrigerado à água, como mostra a figura 8.5.

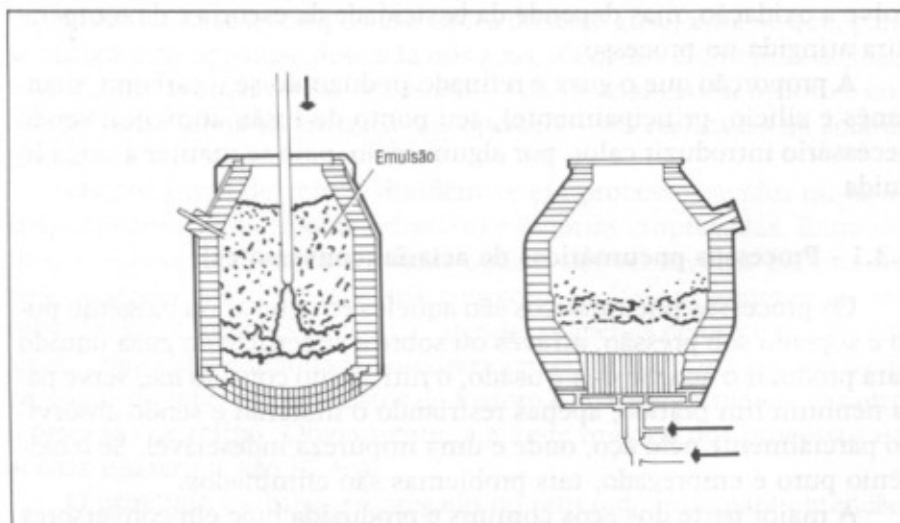


Fig. 8.5 - Conversores LD e Sopro Submerso (Q-BOP) [8].

Devido à rapidez do processo e à necessidade de produtividade máxima, os grandes conversores LD (hoje até 350t) são, em geral, controlados por modelos matemáticos em computador. Utilizando a composição química e a temperatura do ferro gusa líquido e a composição e temperatura de vazamento do aço desejado, o computador calcula a quantidade de sucata a adicionar, o volume do sopro, bem como a quantidade de formadores de escória (CaO, Calcáreo, CaF₂ eventualmente).

O forno é basculado e a sucata e o gusa líquido, nas quantidades calculadas, são carregados pela boca. O forno retorna à posição vertical, abaixa-se a lança e o sopro é iniciado, quando se adicionam os fluxos necessários.

Durante muitos anos houve controvérsias sobre os motivos da elevada velocidade das reações de refino no conversor LD.

Estudos detalhados do processo [7] mostraram que o fator fundamental para a cinética destas reações é a formação de uma emulsão metal-escória, durante o sopro.

A elevada energia do sopro arrasta quantidades significativas do metal para esta emulsão (até 30% do peso carregado, em determinadas etapas do sopro) onde, em função da elevada relação área de interface/volume de metal, as reações de refino se passam rapidamente. Acredita-se que a evolução de CO através da oxidação do carbono das gotas metálicas segundo a reação:



seja essencial para a manutenção da estabilidade da emulsão. Uma vez reduzido o carbono (e outros elementos) das gotas elas "caem" para o banho, onde se homogenizam, alterando sua composição média.

Este ciclo se repete, resultando em um progresso do refino como mostrado na Fig. 8.6.

É importante observar que, em função de sua maior afinidade com o oxigênio, o silício é praticamente todo oxidado antes de ocorrer queda substancial do teor de carbono do banho.

Concluído o sopro, o forno é novamente basculado, feita uma medida da temperatura e retirada amostra para o laboratório químico. Se o aço estiver muito quente, adiciona-se calcário e/ou sucata e, se estiver muito frio, é dado um novo sopro, de curta duração.

Modernas técnicas de instrumentação (sub-lança, por exemplo) permitem que temperatura e alguns dados relativos à composição química sejam obtidos sem bascular o forno, melhorando a produtividade do conversor e possibilitando realimentação de modelos matemáticos

dinâmicos. Isto melhora em muito a índice de acerto de corridas, reduzindo drasticamente a necessidade de ressopro ou adição de "refrigerantes".

Acertadas a composição química e a temperatura de vazamento, o forno é basculado no sentido oposto e a corrida vazada pelo furo de corrida. Antes do início da corrida seguinte, a escória é vazada no pote de escória.

Regulando-se a vazão de oxigênio e a altura da lança, é possível controlar o grau de oxidação da escória e o progresso do refino.

Basicamente, a maior tonelagem de aços comuns e baixa liga para aplicações normais é produzida hoje em conversores LD (ou BOF). Algumas usinas japonesas têm produzido aços inoxidáveis em conversores com sucesso, se bem que esta prática não tenha sido adotada em larga escala.

Naturalmente, o desenvolvimento da metalurgia de panela (item 9.2), tem aumentado a flexibilidade dos conversores no sentido de produzirem aços ligados e com requisitos de qualidade especiais.

8.3.1.2 - Q-BOP (sopro submerso) e conversores de sopro misto

A década de 1970 assistiu o rápido desenvolvimento dos conversores com sopro submerso (por baixo) [8].

Isto foi possível devido ao desenvolvimento de ventaneiras refrigeradas e refratários mais resistentes e à tecnologia de injeção de hidrocarbonetos por uma ventaneira concêntrica, externamente, à de

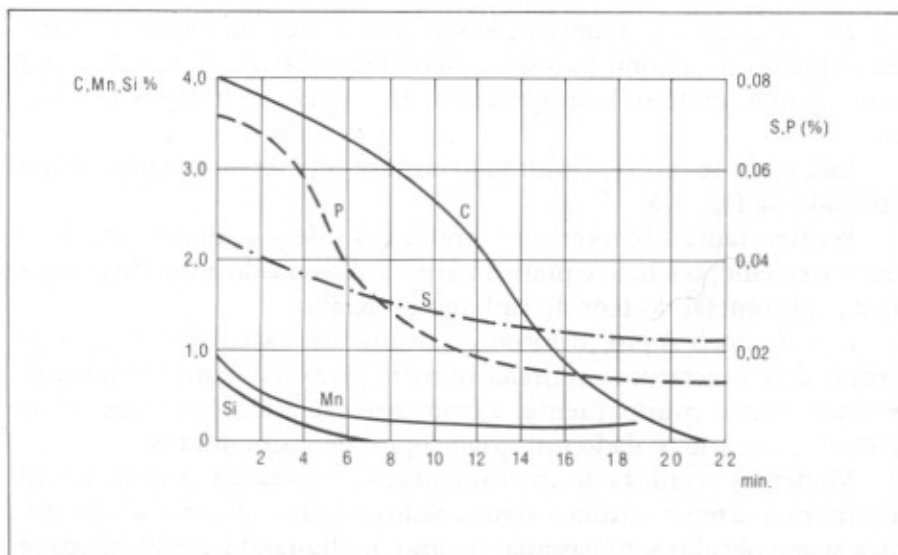


Fig. 8.6 - Progresso do refino em um conversor LD (4).

oxigênio. Estas providências permitiram se atingir uma "vida" aceitável para o fundo deste tipo de conversor. Além de vantagens puramente econômicas na instalação destes conversores em prédios já existentes de antigas aciarias Siemens-Martin (os conversores Q-BOP requerem alturas de prédios muito inferiores à dos conversores LD) as seguintes vantagens metalúrgicas em relação ao LD podem ser citadas [8]:

- Melhor rendimento metálico, em vista da menor oxidação da escória.
- Melhor desfosforação e desulfuração, em virtude de menor desequilíbrio químico entre metal e escória.
- Alta reprodutibilidade.
- Possibilidade de produzir aço de carbono muito baixo sem oxidação excessiva.

Entretanto, o sopro por baixo apresenta as seguintes desvantagens principais:

- Menor capacidade de fundir sucata, devido à elevada quantidade de CO não queimada dentro do forno.
- Alto desgaste do fundo do conversor.
- Teor de hidrogênio relativamente elevado (em função dos hidrocarbonetos injetados).

Este desenvolvimento, aliado a estudos metalúrgicos, permitiu compreender as justificativas para as vantagens e desvantagens dos dois tipos de conversores (sopro por cima e sopro por baixo). A década de 1980 vem assistindo ao grande desenvolvimento de processos de sopro misto ou combinado, em que quantidades variáveis de oxigênio e outros gases (hidrocarbonetos, gás inerte etc.) são injetados por cima e por baixo, em modernos conversores, visando aproveitar o melhor das duas tecnologias.

8.3.2 - O forno elétrico

Numerosos tipos de fornos empregando a eletricidade como fonte de energia para o metal têm sido desenvolvidos. Entretanto, em termos de utilização, o forno a arco e o forno de indução são os mais comuns. Por outro lado, em aciaria, praticamente 100% da tonelage produzida em fornos elétricos provém de fornos a arco. Como o emprego de escória no forno de indução é difícil (em função da dificuldade para seu aquecimento), estes fornos encontram maior emprego em fundições.

O forno elétrico a arco é, sem dúvida, o instrumento mais versátil de produção de aço, e vem se tornando também, nas últimas décadas, um dos mais eficientes. Algumas das importantes vantagens do

forno elétrico a arco são:

- (1) Permite produzir praticamente qualquer tipo de aço, em função do controle do aquecimento virtualmente independente de reações químicas.
- (2) É um aparelho extremamente versátil, no que tange a carga, podendo ser operado com 100% de carga sólida.
- (3) Permite operação intermitente e mudanças rápidas na produção.
- (4) Tem alta eficiência energética.

O número crescente de fornos a arco instalados e a tendência a instalações cada vez maiores (foros de 200-250t) são uma clara evidência da importância crescente deste processo. Isto se deve, também, ao aumento do emprego de aços ligados, mais economicamente produzidos no forno a arco.

8.3.2.1 - Equipamento

A Fig. 8.7 mostra esquematicamente um forno a arco moderno. Os três eletrodos de grafite são ligados às três fases do secundário de um transformador de tensão variável cuja faixa de operação é, normalmente, de 100-300V. Estabelecem-se arcos elétricos entre os eletrodos, através da sucata e a radiação do arco funde a carga.

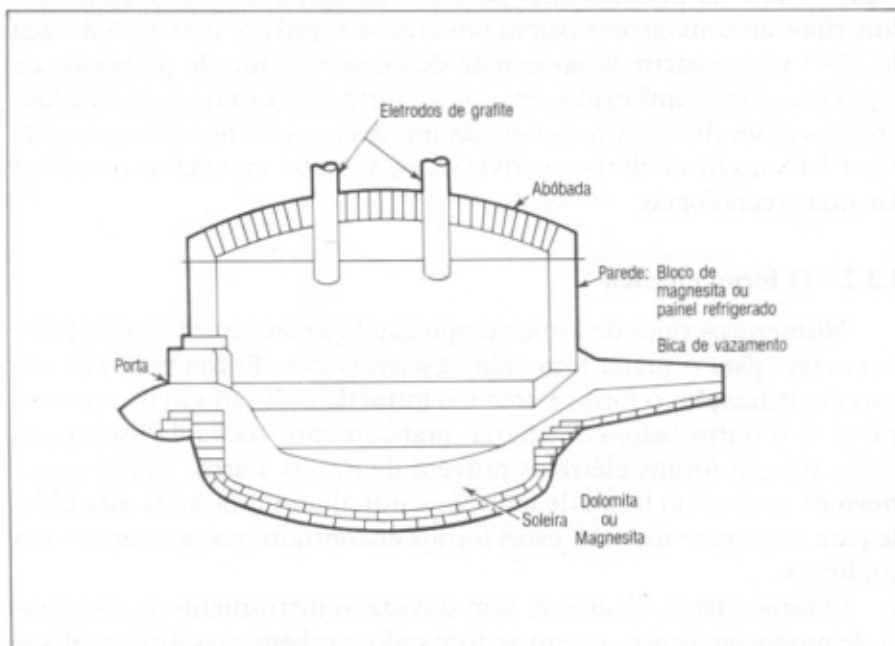


Fig. 8.7 - Esquema simplificado de um forno elétrico a arco.



Fig. 8.8 - Forno elétrico a arco [vista pelo lado da porta].

A Fig. 8.9 resume as principais medidas adotadas em modernas aciarias elétricas com vistas ao aumento da produtividade [9].

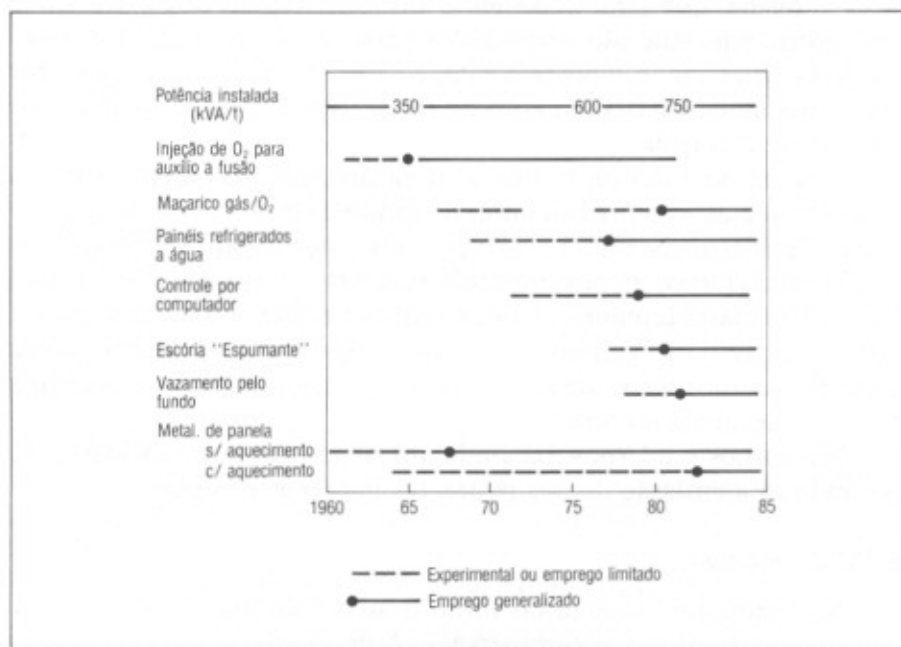


Fig. 8.9 - Medidas para aumento de produtividade em aciaria elétrica [9].

No começo da década de 60 empregavam-se fornos com 300-400kVA/t enquanto hoje empregam-se fornos U.H.P. (Ultra High Power) de 600-750kVA/t, havendo fornos em operação com potência instalada superior a 1000kVA/t.

Obviamente, quanto maior a potência instalada, tanto mais rápida, em princípio, será a fusão da carga. Entretanto, a radiação causada pela alta energia disponível no arco acelera o desgaste dos refratários das paredes e abóbada do forno. O adequado aproveitamento dos fornos UHP exigiu o desenvolvimento de painéis refrigerados a água em suas paredes. Sobre estes painéis forma-se uma camada de escória sólida e o conjunto age como "refratário". Adicionalmente, o uso de escórias "espumantes", que ocultam o arco das paredes, tem sido adotado.

Concluída a fusão da carga, os requisitos de energia para controle de temperatura e compensação de perdas térmicas caem para ~100kVA/t. Evidentemente, a utilização de transformadores UHP, caríssimos, nestes níveis de potência é anti-econômica. Este foi um dos principais motivos que fomentaram o desenvolvimento da metalurgia de panela (item 9.2). Utilizando-se um forno panela, é possível transferir as operações de refino (item 8.3.2.3.2) para fora do forno elétrico, liberando este equipamento para fusão de uma nova corrida.

O carregamento do forno a arco normalmente é feito pela abertura da abóbada, que gira, deixando o forno livre para carga. Há ainda uma porta, por onde são adicionados materiais como ligas, formadores de escórias etc. e, oposta a esta, há uma bica de vazamento, por onde, mediante o basculamento do forno, o aço vaza na panela após concluir-se a corrida.

A partir do 1983 [9] fornos com vazamento pelo fundo (válvula gaveta instalada excentricamente, no fundo do forno) foram desenvolvidos. Com este sistema é possível vazar o aço completamente livre de escória do forno, inconveniente para o refino na panela. Além disto, o ângulo de basculamento do forno é muito reduzido o que permite a instalação segura de painéis refrigerados a água até muito próximo da linha de escória e reduz significativamente a complexidade e os custos da parte mecânica do forno.

Nos fornos modernos, há ainda um sistema de coleção de fumos, evitando-se a emissão de pós poluentes para a atmosfera.

8.3.2.2 - A carga

Normalmente a carga do forno a arco é composta de sucata e ferro-ligas, nas usinas não-integradas. A necessidade de aproveitar-se os elementos de liga contidos na sucata e evitar-se a presença de ele-

mentos indesejáveis em determinados aços, exige do operador de forno elétrico — especialmente o produtor de aços especiais — uma cuidadosa separação e armazenamento da sucata. Normalmente, a sucata é reunida em grupos, por famílias de aços (ex.: sucata de aços 43xx, sucata de aços 86xx) de modo que, ao ser empregada, possa-se prever, com segurança, a composição química a ser obtida. No caso de aços ferramenta, com elevados teores de elementos de liga de custos altíssimos, é conveniente separar-se a sucata por aço, e não por família. Assim, uma usina de aços especiais chega a ter 50 diferentes grupos de sucata.

Por outro lado, o aspecto físico da sucata é também muito importante. De vez que a sucata pode ter densidade aparente muito baixa, é importante balancear corretamente a carga, para se evitar a necessidade de muitos carregamentos, que comprometam a produtividade.

Além da sucata, são empregados ferro-ligas ou metais puros para compor a carga desejada para cada aço. Normalmente evita-se carregar ferro-ligas de elementos oxidáveis (como cromo, vanádio etc.) juntamente com a sucata, para diminuir as perdas. Por outro lado, o níquel pode ser carregado juntamente com a sucata, por não ser oxidável.

Dentre as ferro-ligas, há também várias opções. Há ligas de alto teor de carbono ou baixo teor de carbono, ligas de baixo fósforo e enxofre, ligas de alto teor de residuais, etc. Obviamente, o operador deve fazer um balanço econômico das opções disponíveis para atingir determinada especificação de aço, escolhendo a que apresentar melhor equilíbrio econômico-operacional.

Este balanço é, normalmente, realizado por programas de computador.

Novamente neste ponto, é importante o conhecimento, por parte do usuário de aço, dos problemas de fabricação. Assim, por exemplo, dois aços inoxidáveis com exatamente a mesma composição — exceto pelo limite máximo de fósforo aceitável — podem requerer cargas e elaborações completamente diferentes, que refletirão, certamente, no custo final do produto.

8.3.2.3 - *A elaboração no forno a arco*

Terminada a fusão da carga, inicia-se a etapa de refino que, classicamente (na ausência de metalurgia de panela), engloba: descarburacão e desfosforacão e, posteriormente, desoxidação e dessulfuracão.

8.3.2.3.1 - DESCARBURACÃO E DESFOSFORACÃO

Terminada a fusão, normalmente se deseja que o teor de carbono do aço esteja acima da faixa final para que, com a evoluçao de

CO decorrente da oxidação do carbono pelo sopro de oxigênio ($C + O \rightleftharpoons CO$), ocorra agitação e eliminação de gases dissolvidos. Além disso, como as ferro-ligas de alto carbono são, em geral, mais baratas que as de baixo carbono, é conveniente oxidar-se o carbono abaixo da composição desejada do aço, de modo a poder-se introduzir os elementos de liga como ligas de alto carbono.

Neste estágio da corrida ocorre também a desfosforação, descrita por:



ou por



As condições ideais para o progresso da desfosforação são:

- (1) Baixa temperatura (~1540°C) pois a oxidação do fósforo é exotérmica.
- (2) Alta basicidade da escória, para abaixar a atividade de P_2O_5 , formando $(CaO)_4 \cdot P_2O_5$.
- (3) Alta oxidação do aço.

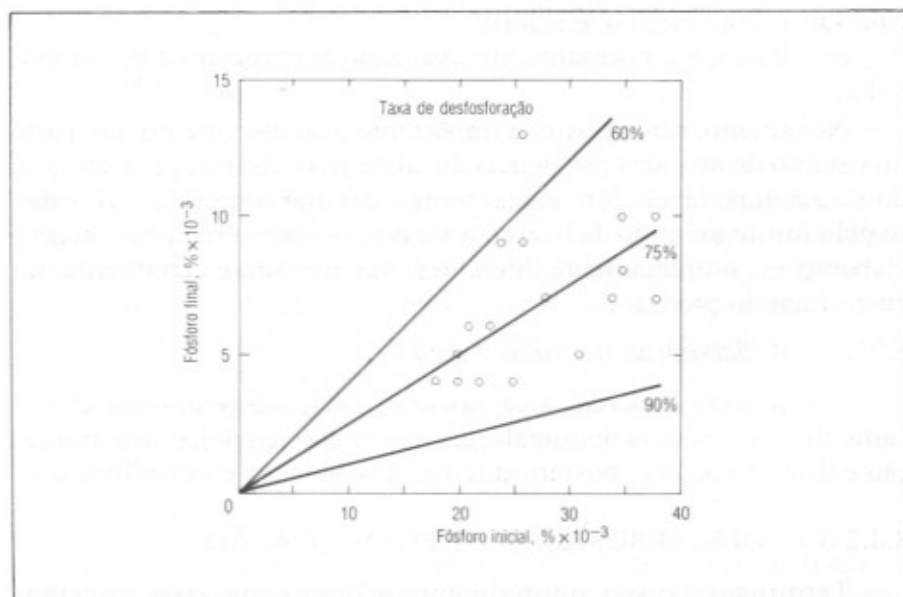


Fig. 8.10 - Resultados de desfosforação com lança Oxi-cal.

Em termos práticos, obtêm-se estas condições pela adição de cal e minério de ferro. Modernamente, tem sido empregado o sistema de lança Oxi-Cal, no qual uma mistura de cal e fluorita é fluidizada e injetada com oxigênio através de um orifício na abóbada. A Fig. 8.10 mostra os resultados obtidos na Eletrometal S.A. - Metais Especiais com este sistema. Além de excelentes resultados de desfosforação, o processo se passa em tempo mais curto do que o requerido pela desfosforação convencional (minério + cal).

Para se evitar retorno do fósforo ao aço quando se eleva a temperatura, a escória de desfosforação deve ser completamente removida.

8.3.2.3.2 - DESOXIDAÇÃO E DESSULFURAÇÃO

Retirada a escória de desfosforação, há duas opções: 1) Tratando-se de um aço carbono ou de baixa liga, e estando o teor de enxofre dentro dos limites de especificação, pode-se aquecer, desoxidar e completar os elementos de liga e vaziar a corrida. 2) No caso de aços de mais alto teor de elementos de liga ou com especificações rigorosas de enxofre, deve-se passar à desoxidação e dessulfuração.

A dessulfuração é representada, molecularmente, por:



ou ionicamente, por:



As condições para uma boa dessulfuração serão, portanto:

- (1) Escória de alta basicidade (alto CaO ou O^{-2})
- (2) Aço desoxidado (baixo FeO ou $\underline{\text{O}}$)
- (3) Alta temperatura (~1660°C)

Adicionam-se então desoxidantes (Al, Fe-Si etc.) e nova escória, aquecendo-se o aço para a temperatura de dessulfuração. Caso os limites de enxofre na especificação sejam extremamente baixos (0.010% máx., por exemplo) pode ser necessário retirar a escória quando esta estiver saturada com enxofre e formar nova escória.

O processamento sob escória redutora, entretanto, favorece a absorção de gases (hidrogênio e nitrogênio) pelo aço líquido, de forma que, para produção de aços de qualidade, torna-se necessária a dega-seificação posterior (ver item 9.1).

8.3.3 - Lingotes e lingotamento

A elaboração do aço em conversor ou forno elétrico, seguida ou não de operações de metalurgia de panela, produz uma massa líquida