

Os Processos de conversão (MINUTA)

1. Introdução (1)

Os processos de conversão de aço a partir de gusa foram desenvolvidos a partir dos conceitos que culminaram com a patente de Sir Henry Bessemer para o conversor Bessemer (1856). A fonte de oxigênio, na época, era o ar e o sopro se fazia através de ventaneiras submersas, no fundo do conversor, como mostra a Figura 1.

Em 1879, Sydney Thomas patenteou uma variante do processo Bessemer em que empregava refratários de dolomita e realizava uma adição de cal à carga, viabilizando o tratamento de gusas produzidos com minérios de alto fósforo.

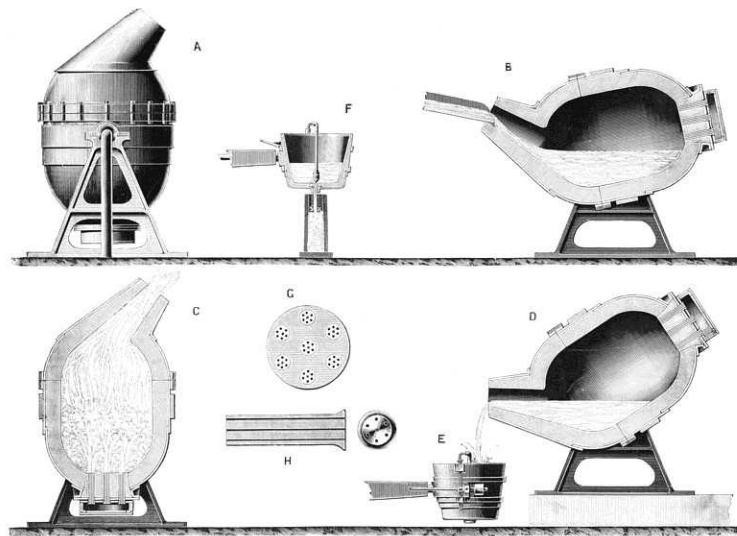


FIG. 43. THE FIRST FORM OF BESSEMER MOVEABLE CONVERTER AND LADLE

Figura 1 A primeira forma do conversor Bessemer móvel (2)

Bessemer, em sua patente original, já previra a injeção de oxigênio ao invés do ar, como oxidante. Naturalmente, esta alteração precisou esperar o desenvolvimento da produção do oxigênio em escala industrial.

A partir do desenvolvimento dos processos de destilação do ar líquido por volta de 1928, reavivou-se o interesse pelo uso do oxigênio diretamente em conversores. As melhorias esperadas no balanço térmico (viabilizando o uso de uma fração considerável de sucata na carga) assim como a redução do teor de nitrogênio dissolvido no aço eram os maiores estímulos a este desenvolvimento.

Por volta da década de 1940, com a disponibilidade de oxigênio para testes, observou-se que o efeito da substituição direta do ar pelo oxigênio no sopro “pelo fundo” tinha efeitos desastrosos: a oxidação extremamente exotérmica na saída do oxigênio elevava demasiadamente a temperatura local e levava à geração localizada de óxido de ferro líquido (“FeO”), um excelente fluxante para óxidos básicos (CaO, MgO). A combinação de elevada

temperatura e “FeO” era desastrosa para os refratários e ventaneiras do fundo do conversor, o que inviabilizava o processo.

Na mesma época, em função destas observações, desenvolvimentos foram realizados buscando outras formas de aportar o oxigênio ao banho. Na Áustria, em 1952, em Linz e em 1953 em Donawitz conversores industriais de 30t com sopro por cima, através de uma lança não submersa, iniciaram a operação comercial dos conversores chamados LD (*Linz Donawitz* ou BOF- *Basic Oxygen Furnace*).

O processo LD se desenvolveu rapidamente, especialmente no tratamento de metal líquido com elevado teor de fósforo e viabilizando a fusão de sucata em frações razoáveis da carga.

Houve desenvolvimentos ainda de processos com conversores giratórios também empregando lanças (como Kaldo e Rotor) mas estes processos não atingiram importância internacional no cenário siderúrgico.

Paralelamente ao desenvolvimento dos processos com injeção por lança (“por cima”) várias organizações buscaram a solução do problema da degradação das ventaneiras e refratários do fundo do conversor. Nos anos 1960 este problema foi resolvido a partir de uma idéia de Savard e Lee da Air Liquide do Canadá. Esta idéia envolvia a refrigeração das ventaneiras através da dissociação endotérmica de um hidrocarboneto injetado no espaço anular de uma ventaneira composta por dois tubos concêntricos. Pelo tubo central, o oxigênio é injetado.

Os processos OBM (Oxygen Bodenblasen-Maxhüte) na Alemanha, o processo Q-BOP (Quick/ Quiet- Basic Oxygen Process) nos Estados Unidos e LWS (Loire-Wendel-Sideler), na França, são as concretizações industriais de variantes deste conceito de refrigeração com hidrocarbonetos.

No final da década de 1970 os processos de sopro “por baixo” se desenvolviam de forma tão marcante que em um simpósio clássico “Basic Oxygen Steelmaking- A new technology emerges” a principal conclusão era de que se tratava de uma tecnologia madura que, em função de suas vantagens sobre o processo de “sopro por cima” (LD, BOF) seria o futuro das novas expansões e da substituição das instalações obsoletas (3). Assim, em 1978, segundo Niles (3) o futuro das novas instalações de sopro por baixo era “brilhante”.

Este futuro não se concretizou, entretanto. A rápida reação dos aciaristas e pesquisadores levou ao entendimento das causas das vantagens e desvantagens de cada uma das opções de sopro e, em 1982, a opinião reinante (e que realmente se concretizou nas décadas seguintes) era de que a última instalação de sopro apenas por baixo já havia sido instalada e que o futuro da aciaria de conversão era representado pelos processos de sopro combinado ou misto, como indicado pelo próprio título do congresso “Mixed Gas Blowing in Steelmaking”.

Este capítulo apresenta os principais aspectos da termodinâmica, cinética e operação do conversor de sopro “por baixo”, comparando-os com conversores de sopro por cima e de sopro combinado (ou misto).

2. Termodinâmica do Refino

As principais reações que ocorrem nos conversores são reações de oxidação. Os aspectos relevantes da termodinâmica destas reações são discutidos a seguir.

2.1. Reações de Oxidação

2.1.1. Oxidação do Ferro

Embora indesejada sob o ponto de vista de rendimento metálico, a oxidação do ferro ocorre durante o processo de conversão. Este óxido de ferro tem efeito importante na dissolução de vários óxidos, em vista de seu poder “fluxante” sobre os óxidos básicos. Além disto, esta oxidação é exotérmica e contribui para o balanço térmico do conversor.

Reação	ΔH_{298} (kJ/mol de Fe)	
$\text{Fe} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{FeO}$	-225,5	Equação 1

A extensão da oxidação do ferro, sob o ponto de vista termodinâmico, está ligada não apenas ao grau de oxidação do metal (potencial químico do oxigênio) como à atividade do FeO. O comportamento do FeO em escórias de aciaria é relativamente complexo mas pode ser sumarizado, semi-quantitativamente, através de gráficos como os da Figura 2.

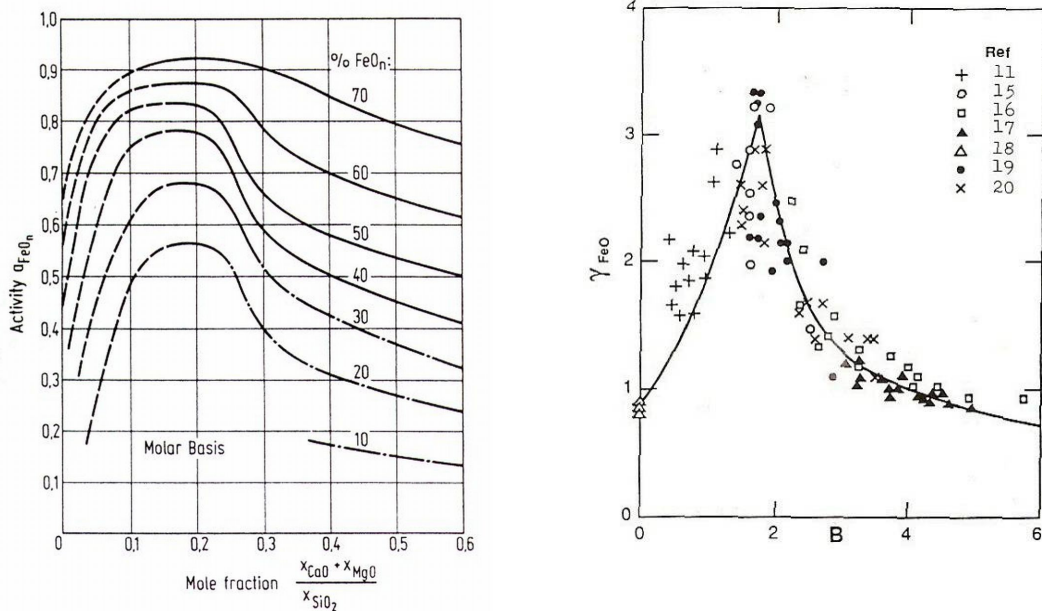


Fig. 5.78. Activity of FeO for various FeO contents dependent on the basicity $(X_{\text{CaO}} + X_{\text{MgO}})/X_{\text{SiO}_2}$ at 1600 °C in the system CaO-FeO-MgO-SiO₂, after Chipman and coworkers [80]

Figura 2 Efeito da basicidade sobre a atividade do “FeO” em escórias de aciaria (a esquerda, atividade para diferentes concentrações (4), a direita, coeficiente de atividade do “FeO” (5))

É evidente que o controle da basicidade tem grande influência sobre o comportamento do FeO nas escórias básicas.

2.1.2. Oxidação do Carbono

Nas temperaturas em que existe ferro líquido (inclusive na temperatura do gusa líquido) o carbono é oxidado, preferencialmente, para CO segundo a Equação 2.

Reação	ΔH_{298} (kJ/mol de C)	
$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$	-114,4	Equação 2
$C + O_2 = CO_2$	-395,3	Equação 3
$CO + \frac{1}{2} O_2 = CO_2$	-280,9	Equação 4

A reação descrita pela Equação 3 (formação de CO_2) é bastante mais exotérmica do que a formação de CO. A reação de oxidação do CO (Equação 4) representa, portanto, uma potencial fonte de energia considerável para uma siderúrgica que opere conversores.

A oxidação do CO dentro do conversor contribui para o seu balanço térmico é chamada de “pós-combustão”.

Assim como a maior parte das reações no conversor, esta reação não atinge o equilíbrio termodinâmico e depende do modo e local de fornecimento do oxigênio, como será discutido adiante.

O equilíbrio da reação descrita pela Equação 2 é também a base para a definição da quantidade de oxigênio dissolvido no metal, através da reação descrita pela Equação 5. Fatores cinéticos têm, como será visto adiante, grande efeito sobre o resultado final do produto $\frac{\%C\%O}{P_{CO}}$ no fim de sopro, que raramente correspondem aos valores associados a 1 atm de pressão.

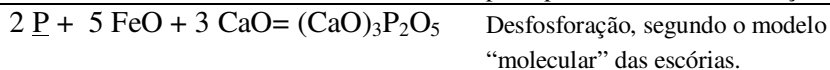
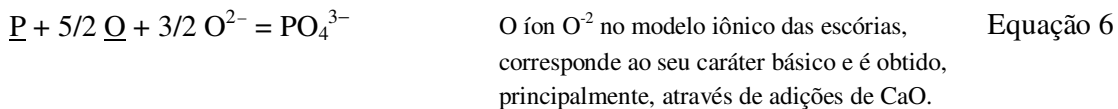
$$\underline{C} + \underline{O} = CO \quad \frac{\%C\%O}{P_{CO}} = 2,05 \times 10^{-3} \quad (1600^\circ C) \quad \text{Equação 5}$$

2.1.3. Oxidação do silício

O silício é oxidado à sílica, também em uma reação fortemente exotérmica. Em conversores que operam com escória básica é razoável considerar a oxidação total do silício presente na carga.

2.1.4. Oxidação do Fósforo

A desfosforação em meio oxidante, como prevalece durante todo o processo de conversão pode ser descrita de forma iônica ou molecular:



O efeito do grau de oxidação do metal sobre a desfosforação é evidente. A representação iônica destaca o efeito do oxigênio dissolvido no banho (O). O efeito dos óxidos na escória se manifesta sobre (a) basicidade (atividade do íon O^{2-}) e comportamento do íon fosfato (PO_4^{3-}).

Qualitativamente, o efeito dos diversos fatores que influenciam o resultado do equilíbrio entre o fósforo no metal e na escória pode ser avaliado por relações empíricas como as de Healy e outros autores:

$$\log \frac{(\% P_{escoria})}{\% P_{metal}} = \frac{22350}{T} - 16,0 + 2,5 \log \% Fe_t + 0,08 \times \% CaO \pm 0,4 \quad (6)$$

Onde Fet é calculado como $0,8FeO$.

2.2. Formação de Escória

A escória é formada pela mistura de adições sólidas com produtos líquidos que se formam durante as reações de refino e/ou pela eventual fusão de alguma adição sólida. Uma vez que as reações de desfosforação requerem o uso de escórias básicas, e a basicidade favorece a desfosforação, as escórias de conversor são ricas em CaO , que tem alto ponto de fusão. O papel crítico do “ FeO ” e da SiO_2 na obtenção de uma escória líquida é destacado no diagrama da Figura 3. É evidente que obtenção de escórias líquidas, a base de CaO , em conversor depende da formação destes dois óxidos “fluxantes”.

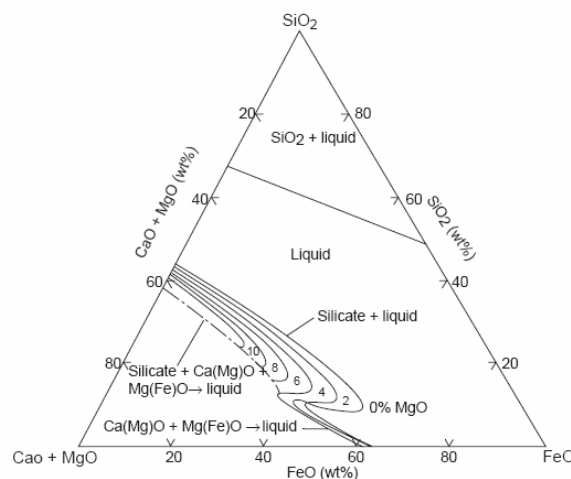


Figura 3 Isoterma correspondente a 1600 °C no sistema CaO - MgO -“ FeO ”- SiO_2 indicando a região de ocorrência de fase líquida e os limites de solubilidade dos diversos óxidos sólidos.

3. O processo de Conversão

A conversão (do gusa e sucata) em aço líquido não se passa em equilíbrio termodinâmico. Da mesma forma, ao final do sopro, não se estabelece equilíbrio termodinâmico entre o metal e a escória (e os gases formados). Embora a informação sobre o estado de equilíbrio seja

fundamental para a compreensão da evolução das condições no interior do conversor durante o processo de conversão, estas informações não são suficientes para a compreensão completa do processo.

O modo como as reações se passam durante o processo, o local onde ocorrem e a possibilidade de aproximar-se mais ou menos do equilíbrio termodinâmico são características que dependem de vários aspectos operacionais, em especial do modo como o oxigênio é fornecido, no conversor. Dentre as variáveis associadas ao fornecimento do oxigênio em conversores, certamente a mais importante é o modo de fornecimento do oxigênio, isto é, se é fornecido por baixo (sopro submerso) ou por cima (sopro com lança).

3.1. A oxidação

3.1.1. Sopro de oxigênio por baixo

Ao entrar em contacto com o ferro líquido, o oxigênio forma, imediatamente, óxidos de ferro (em virtude da presença maciça de ferro: mesmo quando o metal tem 3,5%C, em peso, cerca de 85% dos átomos disponíveis para serem oxidados são átomos de ferro). (ver Figura 4).

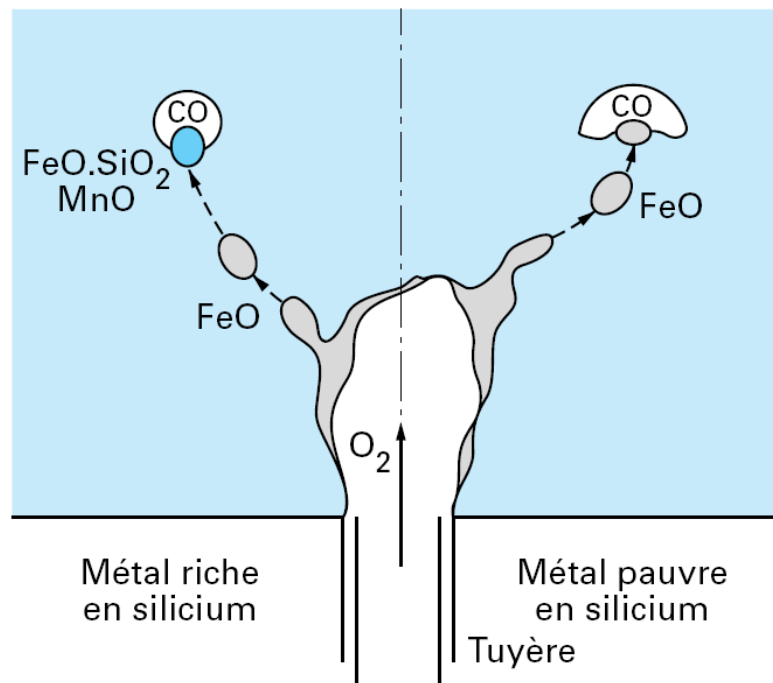
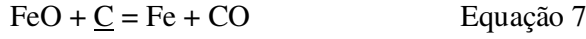


Figura 4 Esquema do processo de oxidação junto à ventaneira de um conversor de sopro por baixo. (1)

O óxido de ferro tem densidade menor que o metal líquido e, portanto, sobe através do metal líquido. A medida que este óxido atravessa o metal líquido ocorre a busca pelo equilíbrio e formam-se os óxidos mais estáveis, previstos pela termodinâmica, SiO_2 (ou silicatos, como indicado no lado esquerdo da Figura 4 para metal rico em silício) e CO . Como o FeO eventualmente formado precisa atravessar todo o banho para chegar à superfície

do banho (interface metal-escória), há bastante tempo para que o equilíbrio entre as reações Equação 1 e Equação 2 se estabeleçam conforme indicado pela Equação 7.



Isto se manifesta de duas formas importantes no processo de conversão com sopro por baixo:

- (a) O teor de FeO da escória somente se eleva a medida que descarbonização significativa ocorre (isto tem impacto significativo na formação de escória líquida neste processo)
- (b) Há, ao longo do refino, um razoável equilíbrio entre a atividade (e/ou quantidade) de FeO da escória e o teor de carbono dissolvido no aço.

É importante notar que a pressão de CO no interior das bolhas não é, necessariamente, igual a 1 atm, como será discutido adiante. Embora a Figura 4 indique que as bolhas são de “CO” outros gases, estão presentes, o que reduz a pressão parcial do CO no interior da bolha.

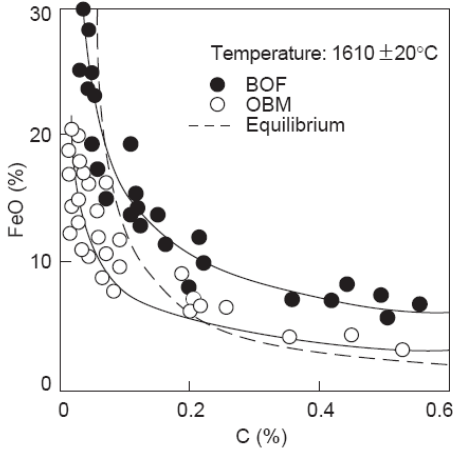


Fig. 2.106 Iron oxide-carbon relations in BOF and OBM (Q-BOP) are compared with the average equilibrium relation (-----). From Ref. 103.

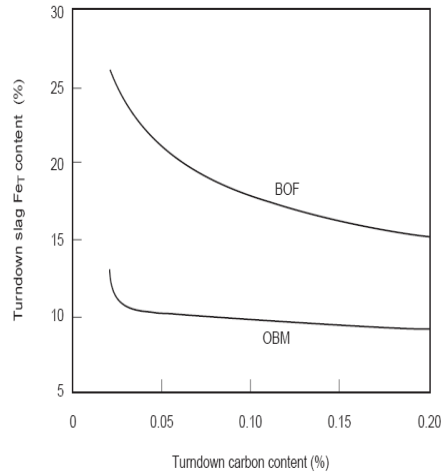


Fig. 9.13 Slag Fe_T content as a function of the carbon content at turndown in the U.S. Steel Gary Works BOF and OBM (Q-BOP) shops.

Figura 5 Relação entre o teor de oxido de ferro na escória e o teor de carbono no banho (Equação 7) em processo de conversão com sopro por cima (BOF) e sopro por baixo (OBM). A linha tracejada representa o valor de equilíbrio para a pressão de 1 atm e temperatura de 1610 °C. (7)

A Figura 5 apresenta resultados do teor de carbono e teor de “FeO” da escória em conversor de sopro por baixo, comparado com os valores previstos pelo equilíbrio termodinâmico e os valores obtidos em conversor de sopro por cima.

A diferença de rendimento metálico entre os dois processos é clara e é bastante significativa.

3.1.2. Sopros por Cima

Nos processos em que o sopro de oxigênio é realizado por cima, é possível variar as características do sopro, em especial altura da lança e vazão de oxigênio. A variação destas características tem importante efeito sobre a “penetração” do sopro no banho e sobre a distribuição do oxigênio soprado e seu efeito.

O impacto do jato de oxigênio sobre o banho de metal líquido tem vários efeitos mecânicos e químicos. Dependendo das condições de sopro pode ocorrer mais oxidação “superficial” do banho ou mais “penetração” do sopro, como indicado na Figura 6. A energia do sopro define seus efeitos sobre o banho. O sopro de mais baixa energia resulta em maior oxidação superficial do banho, e menos “FeO” capturado pelo banho. No sopro de alta energia (chamado “duro”) mais FeO é capturado internamente ao banho. A energia do sopro também projeta metal. Se a escória for líquida e oxidada, o metal projetado em “gotas” pode conduzir à formação de uma emulsão.

Assim, o controle da condição de sopro é essencial para a realização de uma corrida rápida e estável no processo de sopro por cima. Inicialmente busca-se um sopro macio (lança alta e/ou menor vazão) para produzir mais FeO superficialmente ao banho. Este FeO deverá agir como fundente para dissolver a cal adicionada no menor tempo possível formando uma escória líquida, capaz de absorver o metal eventualmente projetado pelo jato. Aumentando-se a energia do sopro a quantidade de metal projetado aumenta e, caso exista escória líquida suficiente, atinge-se a condição de formação de uma “emulsão” tri-fásica (metal-escória-gás), como mostra a Figura 7.

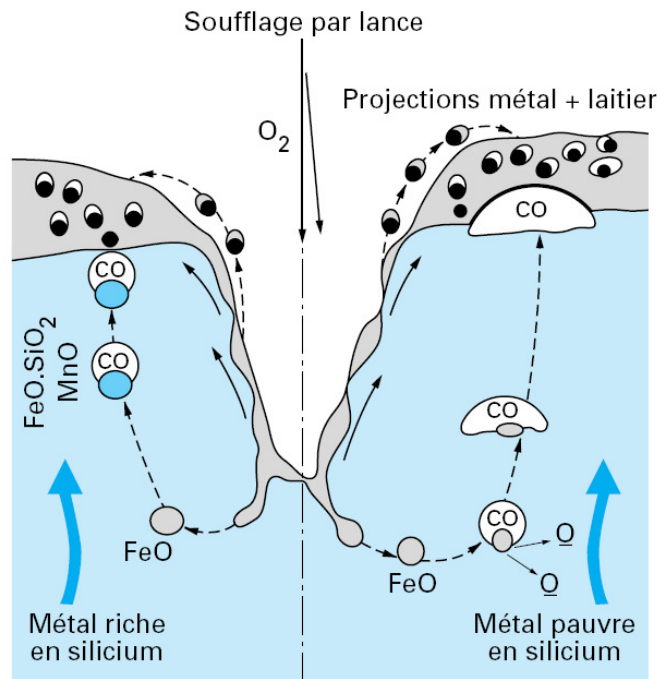


Figura 6 A energia do sopro por cima define seus efeitos sobre o banho. O sopro de mais baixa energia

resulta em maior oxidação superficial do banho, e menos “FeO” capturado pelo banho. No sopro de alta energia (chamado “duro”) mais FeO é capturado internamente ao banho. A energia do sopro também projeta metal. Se a escória for líquida e oxidada, o metal projetado em “gotas” pode gerar a formação de uma emulsão.

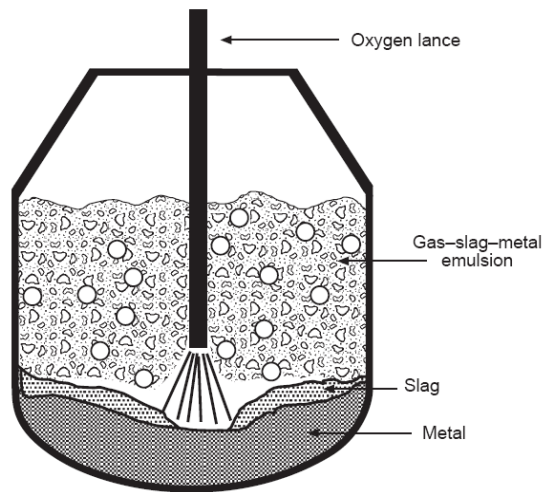


Fig. 9.7 Physical state of the BOF in the middle of the blow.

Figura 7 Estado físico de um conversor de sopro por cima durante o sopro na etapa de taxa de descarburização constante.

Formada a emulsão, grande parte do metal líquido (da ordem de 30% do peso total) se encontra, a cada instante, emulsificado. As reações na emulsão ocorrem muito rapidamente, devido a elevada relação área/volume das gotas de metal projetadas. As gotas se mantêm na emulsão enquanto estão sendo descarburadas, pois geram CO. Esta geração de CO mantém a estabilidade da emulsão. Naturalmente, se o sopro é conduzido nestas condições, antes de existir escória, o resultado mais comum é a formação de “cascão”.

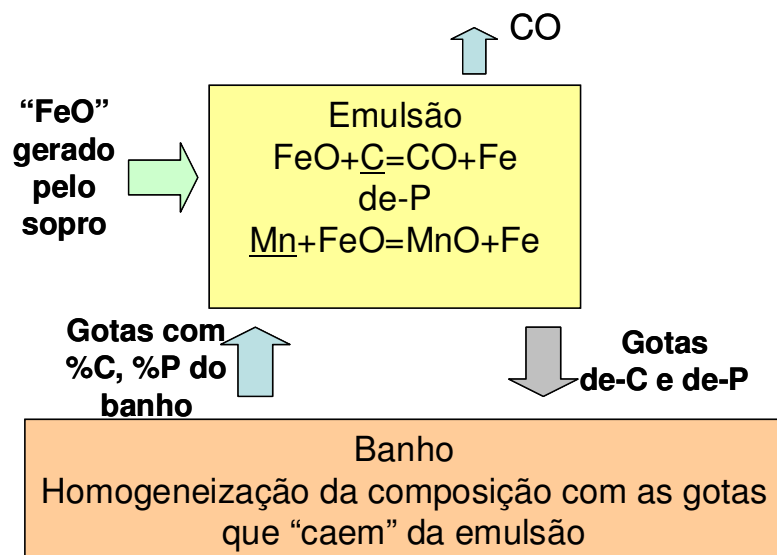


Figura 8 Esquema de modelamento “químico” de conversor de sopro por cima. A reação na interface metal (banho)-escória contribui pouco (ou nada) para o processo, no tempo disponível.

De uma forma geral, a maior parte das reações de refino se passa na emulsão e é preciso manter um balanço adequado de entradas e saídas na emulsão para que o processo seja estável (Figura 8). A medida que o carbono se oxida para CO na emulsão, FeO é consumido e é preciso garantir um aporte deste óxido, via oxidação pela lança. Da mesma forma, a taxa de descarburização está vinculada a taxa de emulsificação de metal, que depende das condições de sopro. Emulsificação excessiva pode causar formação instantânea excessiva de CO instabilizando o conversor. Da mesma forma, falta de FeO na escória pode levar ao colapso da emulsão.

O processo de manutenção de uma emulsão estável é muito semelhante à manutenção de uma “escória espumante” estável no forno elétrico. A principal diferença, possivelmente, é o fato de que o carbono é aportado através do metal emulsificado. Como o teor de carbono do metal varia ao longo do tempo, as condições de sopro precisam se alterar de modo a que a quantidade de carbono que entra na emulsão permaneça constante.

O processo de sopro por cima é, portanto, bastante mais complexo que o processo de sopro por baixo e permite que se opere em condições de elevado desequilíbrio metal-escória, deliberadamente ou não. O resultado da formação de FeO por “sobre” o banho e da reação preferencialmente na emulsão é o maior “desequilíbrio” entre o teor de carbono do banho e o teor de FeO da escória, como mostra a Figura 5 (vale observar que, aceitando o modelo de reação apresentado acima, não se deveria esperar equilíbrio FeO-C no conversor com sopro por cima.)

A avaliação e quantificação do desequilíbrio entre metal e escória são complicadas pelo fato que duas variáveis diferentes são usadas para expressar o grau de oxidação do metal e o da escória: a concentração de “FeO” (ou Fet) da escória (e raramente a atividade destes

óxidos) expressam o nível de oxidação da escória, enquanto o teor de oxigênio dissolvido é usado para representar o grau de oxidação do metal. Uma tentativa interessante de demonstrar este desequilíbrio é apresentada na Figura 9 onde o potencial de oxigênio calculado para a escória e para o metal (em função da atividade de “FeO” e do teor de \underline{O} dissolvido) são comparados. A figura demonstra claramente o amplo desequilíbrio entre escória e metal no conversor de sopro por cima e a proximidade do equilíbrio metal-escória, no aspecto oxidação, no conversor de sopro por baixo.

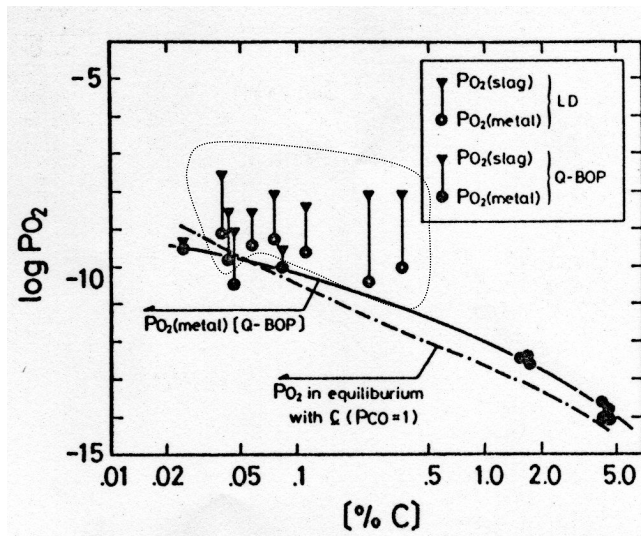


Fig. 12 Comparison of oxygen potential of slag and metal bath in LD and in Q-BOP.

Figura 9 Medidas do potencial de oxigênio na escória e no metal em conversores de sopro por cima e sopro por baixo. Os triângulos indicam o potencial de oxigênio da escória. Os círculos, o potencial de oxigênio do metal. Dados ligados por uma reta vertical correspondem a uma amostra simultânea em um conversor. Os resultados correspondentes ao conversor LD foram circundados por uma linha tracejada na figura, para facilitar sua identificação. (8)

3.2. Teor de oxigênio no fim de sopro

A reação de formação de CO no metal é uma reação heterogênea, que ocorre, necessariamente, em uma interface metal-gás. Para que uma bolha apareça em algum local no interior do banho é necessário que a pressão de equilíbrio do CO exceda a pressão existente no local considerado pois além da pressão atmosférica, existe uma pressão associada ao peso do metal sobre este local. Adicionalmente, para que uma bolha exista (não “colapse” eliminando a interface entre duas fases, que tem um custo energético) é necessário que sua pressão interna seja maior que a pressão externa.

Isto resulta em que, para que se forme uma bolha de CO dentro de um metal líquido, a 1 atm, não basta que os teores de \underline{C} e \underline{O} atinjam os valores de equilíbrio com 1atm dados pela Equação 5. É necessário que exista uma supersaturação para que a pressão “esperada” do CO supere as duas barreiras citadas, que podem ser representadas por:

$$P_{\text{para nuclear}} = 1\text{atm} + \rho gh + \frac{2\sigma}{r}$$

Equação 8

Assim, na ausência de “auxílio” para a nucleação de bolhas, em geral os teores de carbono e oxigênio serão maiores dos que os teores associados ao equilíbrio com gás à pressão reinante no sistema. Este é o comportamento dos conversores em que o sopro de gás se dá apenas por cima (Figura 10).

No conversor com sopro por baixo, a pressão necessária a injeção do oxigênio é suficiente para vencer as duas parcelas finais da Equação 8. Há evidentemente, a formação de grande número de bolhas (todo o volume de oxigênio injetado no conversor). Estas bolhas, embora tenham uma pressão total maior que uma atmosfera, tem a pressão parcial de oxigênio praticamente igual a unidade, no momento da injeção. Assim, a pressão parcial de CO (e outros gases como N₂, por exemplo) no interior das bolhas é muito baixa, especialmente no ponto de injeção. Isto favorece, bastante, o progresso da reação Equação 5. A medida que a bolha sobe e absorve o CO gerado, naturalmente a pressão parcial de CO dentro da bolha aumenta (enquanto a pressão total diminui, em vista da menor profundidade e maior tamanho da bolha). O efeito combinado deste processo é que o progresso da reação de formação de CO a partir do carbono e oxigênio dissolvidos no banho estabelece um equilíbrio aparente com uma pressão de CO menor do que 1 atm, como mostra a Figura 10.

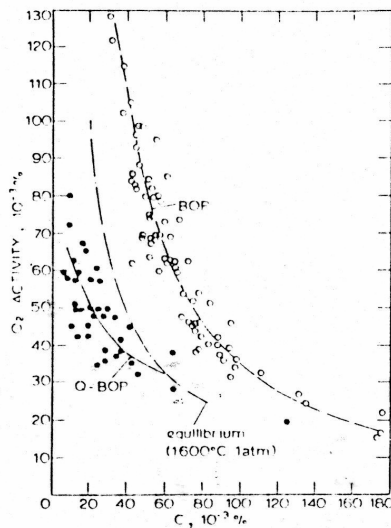


Fig. 3 - Top and bottom blowing processes, low P hot metal : relationship between oxygen activity and carbon content in the steel melt at converter turndown (2)

Figura 10 Teores de carbono e oxigênio no fim de sopro em conversores de sopro por baixo e sopro por cima comparados com o equilíbrio CxO a 1 atm.

Para um mesmo teor de carbono de fim de sopro, o metal produzido em conversor com sopro por baixo tem menor teor de oxigênio dissolvido. O impacto desta diferença sobre o consumo de desoxidante é, evidentemente, significativo.

3.3. Partição dos demais elementos entre metal e escória

A avaliação da partição dos demais elementos relevantes no refino (principalmente P, Mn e S) entre escória e metal nos dois tipos “extremos” de conversores (LD e Q-BOP) é complicada pela dificuldade de uma base “justa” de comparação. Do ponto de vista operacional, a comparação mais interessante é, em geral, realizada como função do teor de carbono de fim de sopro, uma vez que, para cada aço, o processo seria conduzido sempre de modo a atingir um certo teor de carbono de fim de sopro, independente do conversor.

3.3.1. Partição do Fósforo

A Figura 11 apresenta a razão de partição do fósforo no fim de sopro nos dois tipos extremos de conversor. Em um caso, os resultados são apresentados em função do teor de Fet da escória. É evidente que, para um mesmo nível de oxidação da escória, o conversor de sopro por baixo desfosfora muito melhor, em vista da proximidade do equilíbrio metal-escória. Entretanto, para um mesmo teor de carbono de fim de sopro, o nível de oxidação do conversor de sopro por baixo é menor e o teor de “FeO”(Fet) da escória é mais baixo (visto anteriormente). O resultado é que a desfosforação, para um mesmo teor de carbono de fim de sopro é mais eficiente no conversor de sopro por cima.

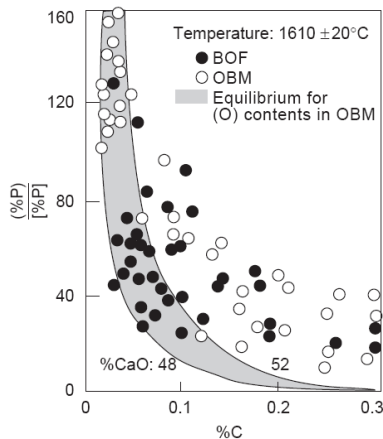


Fig. 2.109 Slag/metal phosphorus distribution ratios at first turndown in BOF and OBM(Q-BOP) practices; slag-metal equilibrium values are within the hatched area for Q-BOP. From Ref. 103.

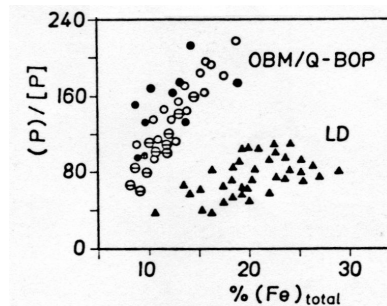


Fig. 8 - Relationship between phosphorus partition ratio and (Fe) total in the slag

Figura 11 Razão de distribuição do fósforo (entre escória e metal) em função do teor de carbono no fim de sopro e em função do teor de Fet da escória para conversores de sopro por cima e de sopro por baixo.

3.4. Sopro Combinado

A compreensão dos mecanismos de reação nos conversores de sopro por cima e sopro por baixo, descrita acima, deixou bastante claro o motivo das diferenças entre os processos. As principais vantagens do sopro por baixo estão ligadas a:

- (a) melhor homogeneização do banho;
- (b) promoção do equilíbrio metal escória;
- (c) nucleação de bolhas e conseqüentemente abaixamento da pressão parcial de gases dissolvidos.

As principais vantagens do sopro por cima estão ligadas a:

- (a) facilidade de formar escória controlando as condições de sopro;
- (b) melhor pós- combustão (não discutida em detalhe, mas decorrente da presença de oxigênio na região “sobre o banho” onde o CO é liberado).

A conseqüência evidente é que praticamente todos os conversores de sopro por cima foram equipados, nas últimas décadas, com algum tipo de injeção de gás (na maior parte das vezes gás inerte) por baixo, para aproveitar as vantagens citadas. Estas alterações em geral são bastantes simples em conversores LD pois há relativamente poucos problemas de interferência de lay-out ou estruturas de prédios. No caso dos conversores de sopro por baixo, houve, também, casos de introdução de sopro complementar por cima. As limitações físicas, entretanto, podem implicar em custos significativos para estas alterações.

Os resultados do processo de refino em conversores de sopro combinado invariavelmente se situam entre os resultados dos conversores de sopro somente por baixo ou somente por cima. Partindo de um conversor LD, quanto maior a vazão de gás injetada por baixo em um conversor de “sopro misto” tanto mais os resultados do processo se aproximam dos resultados de um conversor de sopro por baixo. O custo do gás inerte é, freqüentemente, o parâmetro decisório para limitar a quantidade injetada nestes casos.

Alguns resultados que comprovam a eficiência da adoção do sopro combinado são apresentados de forma sumária, na Figura 12, a seguir:

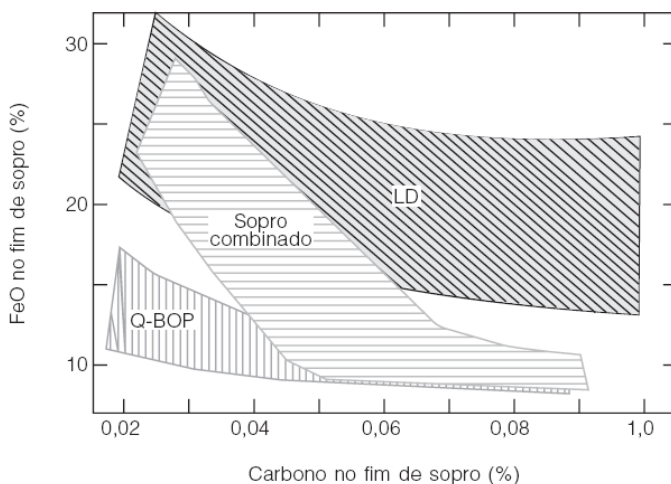


Figura 12 (a) Teor de FeO na escória em função do teor de carbono de fim de sopro para conversores de sopro combinado, comparados com sopro por cima (LD) e sopro por baixo (Q-BOP).

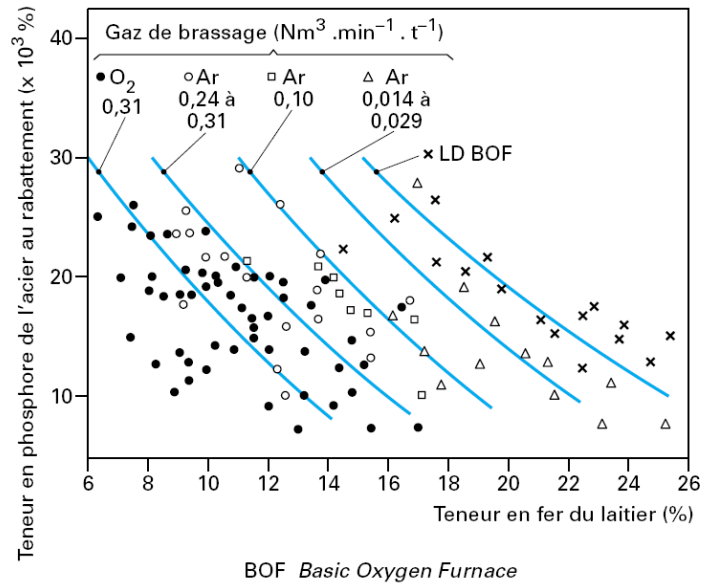


Figura 12 (b) Teor de fósforo de fim de sopro em função do teor de Fet da escória, para diferentes vazões de gás soprado por baixo em um conversor LD (a curva a direita : “LD-BOF” representa os resultados sem sopro por baixo e as demais curvas indicam o gás soprado e a vazão específica)

4. Sopro por Baixo

4.1. Ventaneiras e Refrigerante

A principal variação entre os processos de sopro por baixo é o refrigerante empregado nas ventaneiras. Todo o oxigênio é soprado por ventaneiras instaladas no fundo do conversor. A refrigeração é feita por hidrocarbonetos. Independentemente do refrigerante usado, o processo de proteção do fundo do forno e das ventaneiras consiste na formação de um “cascão” em forma de “cogumelo” solidificado em torno e sobre a ventaneira, como mostrado na Figura 13.

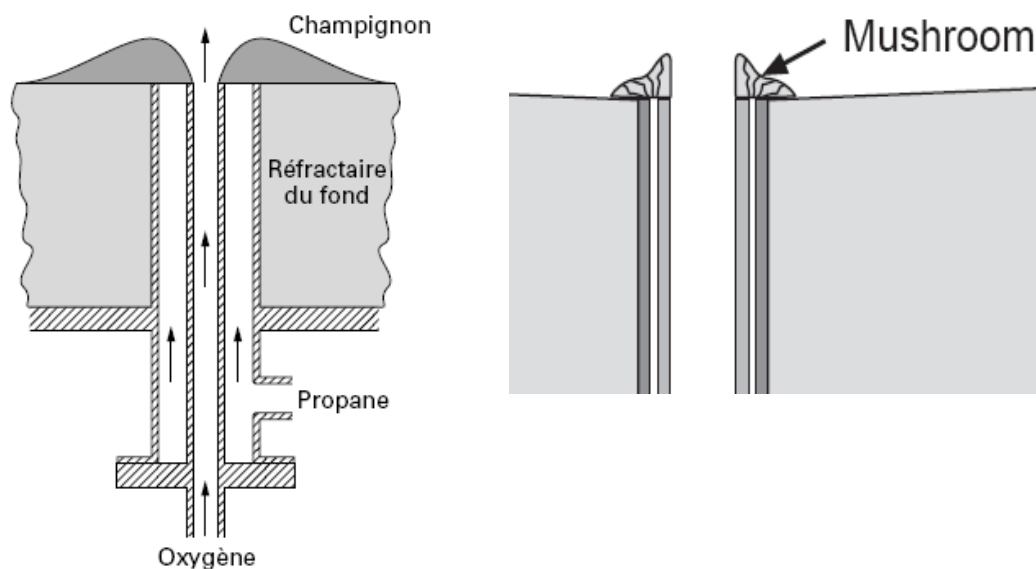


Figura 13 Esquema do fundo de um conversor de sopro por baixo destacando a formação do “cogumelo” na região de saída do refrigerante. Os refrigerantes e os gases resultantes de sua decomposição passam por poros e trincas do “cogumelo” como indicado no esquema da direita. (Nota: a relação entre os diâmetros dos tubos concêntricos nos dois esquemas é muito diferente).

Processos de sopro por baixo tipicamente empregam entre 5 e 22 ventaneiras distribuídas no fundo do forno. A vazão de refrigerante é constante ao longo da corrida.

Durante o basculamento do forno, nitrogênio é soprado pelas ventaneiras para evitar sua obstrução. Alguns autores destacam os riscos de segurança para o pessoal da aciaria associados ao sopro de nitrogênio em condições supersônicas durante o basculamento do forno e sugerem que as instalações modernas têm conversores completamente protegidos.

Em algumas práticas, sopro submerso de nitrogênio pode ser empregado para favorecer as reações metal-escória (10) ou para adicionar nitrogênio a alguns graus de aço (7).

4.2. Vida do Fundo

Em fornos Q-BOP os refratários do fundo tem vida entre 800 e 2500 corridas, bastante inferior ao restante do conversor. Por este motivo, é comum ter fundo removível, para viabilizar a troca de fundo com paradas de menos de 24h (7).

4.2.1. Slag splashing

Os fornos de sopro por baixo empregam “slag splashing” com ou sem condicionamento da escória. Naturalmente, o sopro de nitrogênio é realizado pelas ventaneiras, em contraste com conversores de sopro por cima que empregam a lança nesta operação. Como em geral já há a possibilidade de soprar nitrogênio pelas ventaneiras, não é requerido grande alteração para a partida do processo de recuperação de parede refratária por “slag splashing”.

4.2.2. Carregamento

O carregamento nos fornos com sopro por baixo também é iniciado pela sucata, seguido pelo gusa líquido. Os processos de sopro por baixo, em função da grande agitação do metal líquido e da oxidação “submersa” tem capacidade de fundir sucata em dimensões bastante maiores que os processos de sopro “por cima”.

Nitrogênio é soprado durante o carregamento do metal líquido.

4.2.3. Sopro e refino

Nos conversores modernos de sopro por baixo a cal calcinada é injetada com o oxigênio. Nos conversores Q-BOP e OBM toda a cal é adicionada assim. Normalmente esta adição é feita no começo do sopro, estando concluída na metade do sopro. Isto é necessário quando se trabalha com gusa de silício relativamente alto, para evitar projeção excessiva de metal e escória que causam cascão na boca do conversor. No começo do sopro é necessário evitar a ocorrência destas escórias de alta sílica. Os gusas de alto fósforo e silício mais baixo (<0,4%) podem ser refinados com cal em pedra. **Na Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, a indicação de que a cal pulverizada é injetada próximo ao fim da corrida e que as adições de cal em pedra e cal dolomítica são feitas no carregamento do forno (dado de 1980). Naturalmente o nível de desfosforação desejado tem influência importante sobre o processo de sopro. As taxas de sopro típicas para os processos de sopro por baixo são apresentadas na

Tabela 1.

Tabela 1 Vazão média de oxigênio em conversores de sopro por baixo (1)

Conversor	Vazão em Nm ³ /t.min (base conversor de 100t)
LWS	4,2-5,6
Q-BOP	3,0-4,0
OBM	3,8-5,0

A vazão de oxigênio nos processos de sopro por baixo pode ser mais alta do que quando o sopro é feito por cima e o tempo de sopro pode ser de 12 a 15 min, embora um consumo de até 2 Nm³/t superior ao conversor LD seja observado.

Os processos de sopro por baixo tem resultados bastante mais reprodutíveis que os conversores de sopro por cima. O nível de acerto de corridas é muito alto não só com respeito ao teor de carbono, mas também com respeito aos demais elementos e a temperatura de vazamento.

A injeção de hidrocarbonetos resulta em teores de hidrogênio um pouco mais elevados do que em outros conversores. Para produtos em que este residual é importante, “rinsagem” com nitrogênio após o sopro de oxigênio é normalmente suficiente para controlar o teor de hidrogênio. Quando a absorção de nitrogênio precisa ser controlada, argônio é soprado (ver item 4.4).

4.3. Pós-combustão

Os processos de sopro por baixo apresentam menos pós-combustão do que os processos de sopro por cima. O efeito da pós-combustão pode ser importante para o balanço térmico do conversor, quando se deseja usar mais carga sólida. Em alguns processos de sopro por baixo já foi empregada lança por cima com efeito sobre a pós-combustão, embora o objetivo principal da modificação tenha sido a eliminação ou redução do cascão na boca do conversor, como mostra a Figura 14.

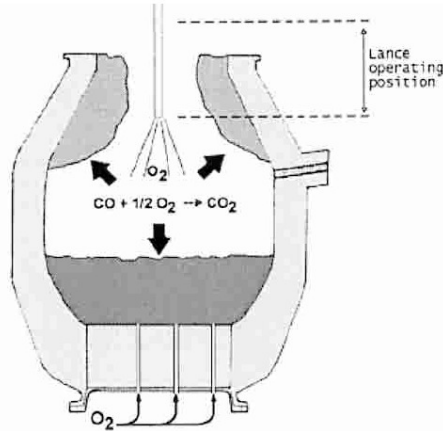


Fig. 1 – Lance de post-combustion.

Fig. 1 – Post-combustion lance.

Figura 14 Arranjo de lança para reduzir o “cascão” da boca do conversor LWS.

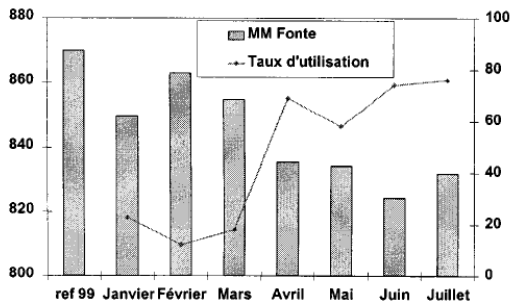


Fig. 7 – Taux d'utilisation de la lance de bec (%). Évolution de la mise au mille de fonte (aciers calmés à l'aluminium) (kg/t).

Fig. 7 – Lance operation ratio (%). Evolution of the hot metal ratio in the case of aluminium killed grades (kg/t).

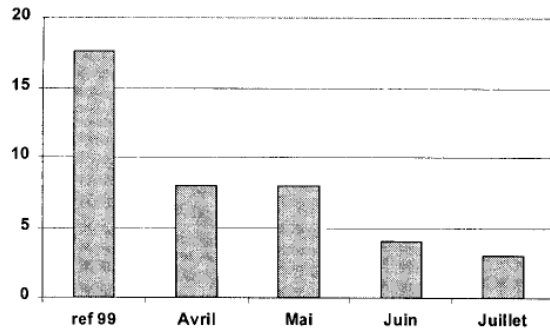


Fig. 8 – Nombre de lavages de bec par mois.

Fig. 8 – Number of mouth cleanings per month.

Figura 14 Arranjo de lança para reduzir o “cascão” da boca do conversor LWS (sopro por baixo). Redução do peso de metal líquido carregado (efeito sobre a pós-combustão) a medida que aumenta o uso da lança.

Redução do número de paradas para limpeza da boca do conversor LWS (13)

4.4. Teor de hidrogênio

O uso de refrigerante contendo hidrogênio tem efeito sobre o teor final deste elemento no aço. O leve aumento do teor de hidrogênio em relação a aços de conversor LD não é muito relevante. Caso necessário, pode ser reduzido com rinsagem pós sopro com nitrogênio, argônio ou argônio+nitrogênio (7). A Tabela 2 apresenta algumas medidas em conversores pequenos. Os resultados mostram o efeito do refrigerante.

Tabela 2 Teores de hidrogênio em corridas LWS (9)

	Conversor LWS de 45 t		Conversor LWS de 6t
	Refrigeração com combustível	Refrigeração com CO ₂ líquido	Refrigeração com CO ₂ líquido
Ao fim de sopro	4,8 ppm	1,8 ppm	2,1 ppm
Após agitação com nitrogênio e adição de carbonato de sódio	3,2 ppm	0,8 ppm	1,4 ppm

5. Bibliografia

1. Meyer, D., *Aciéries de Conversion*, in *Techniques de L'Ingenieur*. 1999, Editions TI Sciences et Techniques: Paris. p. 1-31.
2. Bessemer, H., *Sir Henry Bessemer, FRS, An autobiography*, HTML version produced by E Hutton, 1996. 1905, <http://www.history.rochester.edu/ehp-book/shb/hb11.htm#page148>.
3. Niles, P.E. *New techniques in Basic Oxygen Steelmaking*. in *Mixed Gas Blowing in Steelmaking*. 1982. Pittsburgh, PA, USA: ISS-AIME.
4. VDEh, *Slag Atlas*. 1995: Verlag Stahleisen, Dusseldorf. 616.
5. Turkdogan, E., *Principles of Steelmaking*. 1996: The Institute of Materials London.
6. Healy, G.W., *A new look at phosphorus distribution*. Journal of the Iron and Steel Institute, 1970(July): p. 664-668.
7. Fruehan, R., ed. *Making, Shaping, and Treating of Steel, Steelmaking And Refining Volume*. 11th Edition ed. 1998, AISE Steel Foundation: Pittsburgh PA.
8. Nakanishi, K., K. Saito, T. Nozaki, Y. Kato, K.-I. Suzuki, and Y. Emi. *Physical and metallurgical characteristics of combined blow processes*. in *Mixed Gas Blowing in Steelmaking*. 1982. Pittsburgh, PA, USA: ISS-AIME.
9. Denier, G., J.C. Grosjean, and J. Kuhnast, *Protection des tuyères LWS par du CO2 liquide à l'acierie d'Hagondange*. Revue de Metallurgie- CIT, 1980(Avril): p. 299-305.
10. Raynal, C., J. Saillour, and J.J. Gautier, *La nouvelle acierie LWS de SOLLAC*. Revue de Metallurgie- CIT, 1981(Juin): p. 507-516.
11. Saillour, J. and F. Pichon, *La nouvelle acierie LWS de SOLLAC*. Revue de Metallurgie- CIT, 1979(Avril): p. 211-219.
12. Schittly, P., B. Sarter, and C. Zannoni, *Elaboration d'aciers à très basses teneurs en azote à Sollac*. Revue Metallurgie CIT, 1986(Mai): p. 395-400.
13. Bosquet, J.P., P. Chapellier, G. Didry, C.A. Dubois, J.C. Mailhan, C. Grisvard, and J.C. Huber, *Start up of the post combustion lance at the Sollac Lorraine steel plant*. La Revue de Métallurgie - CIT, 2001(7-8): p. 639-643.