

# LEVANTAMENTO DA CURVA DE DESCARBURAÇÃO DO CONVERTEDOR LD DE 30 TONELADAS DA GERDAU BARÃO DE COCAIS<sup>1</sup>

Breno Totti Maia<sup>2</sup>  
Jairo Átila Alvarenga<sup>3</sup>  
Lúcio Bonifácio Pastor<sup>4</sup>

## Resumo

No convertedor LD, o sopro de oxigênio é responsável pela principal etapa da produção de aço, na qual ocorre a evolução dos elementos químicos presentes no metal líquido e escória. A composição química da escória e do metal, ao decorrer do sopro de oxigênio, muda continuamente com o tempo. O comportamento da composição química desses elementos é de suma importância na produção de aço, uma vez que, conhecendo-o, é possível otimizar o processo obtendo, ao mesmo tempo, composições químicas dos elementos desejadas no final do sopro. Este trabalho tem como objetivo levantar as curvas dos elementos constituídos no banho metálico e escória durante o sopro de oxigênio. O levantamento dessas curvas foi feito em um convertedor LD de 30 toneladas da Gerdau Barão de Cocais, através de interrupções de sopro para coleta de amostras de banho metálico e escória em diversos tempos de processamento.

**Palavras-chaves:** Descarburização; Escória; Sopro de oxigênio.

## EVALUATION OF THE DESCARBURIZATION CURVE OF GERDAU BARÃO DE COCAIS 30 TONELADAS LD CONVERTER

### Abstract

In the LD converter, the oxygen blow is responsible for the main reactions involved in the production of steel. The chemical composition of slag and metal during the oxygen blow changes continually with the time. The behavior of the chemical composition of the elements in the slag and liquid steel is of highest importance in the production of steel once, when this behavior is known, it is possible to optimize the process. The objective of the present work is to determine the variation of the chemical composition of liquid steel and slag during the oxygen blow in Gerdau Barão de Cocais 30 ton converter. This was altered by sampling these two phases at different times during the blow.

**Key words:** Descarburization; Slag; Blow of oxygen.

- 1 *Contribuição técnica ao XXXVIII Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2007, Belo Horizonte, MG, Brasil.*
- 2 *Sócio da ABM, Engenheiro Metalúrgico, Assessor de Processos Aciaria – Gerdau Barão de Cocais.*
- 3 *Estudante de Engenharia Metalúrgica – UFMG.*
- 4 *Operador IV da Célula LD – Gerdau Barão de Cocais.*

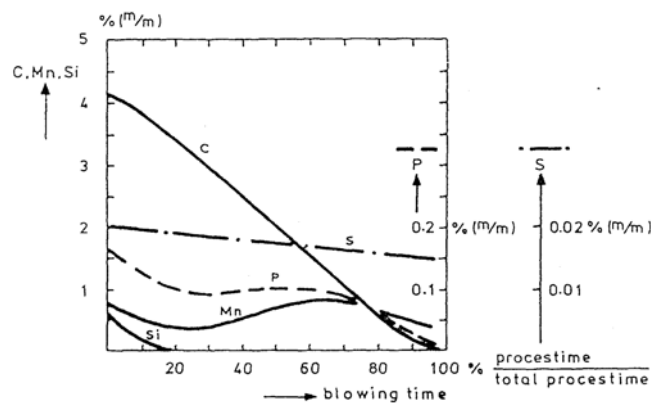
# 1 INTRODUÇÃO

A fabricação do aço pelo processo LD envolve normalmente diversas reações, tanto no banho metálico quanto na escória. No banho metálico, reações de oxidação do carbono, manganês, silício, fósforo e de outros elementos eventualmente contidos na carga, assim como a redução do teor de enxofre são observadas durante o sopro. Por outro lado, na escória ocorrem também outras diversas reações, tal como a oxidação do ferro, fósforo, silício, manganês, magnésio e a dissolução da cal.

## 1.1 Evolução da Composição Química do Banho Metálico

A Figura 1 mostra a evolução da composição do banho metálico para um convertedor LD de 300 ton. Nessa figura, a oxidação do silício ocorre quase completamente nos primeiros 20% de sopro de oxigênio. Por outro lado, o manganês, fósforo, enxofre e carbono sofrem alterações em suas composições químicas até o final do sopro.

A reação de descarburização é mínima no início do sopro de oxigênio, ocorrendo preferencialmente a oxidação do silício. À medida que o teor de silício vai reduzindo, a oxidação do carbono vai se tornando mais rápida até atingir uma velocidade máxima de descarburização, quando ocorre uma intensa geração de gás CO e a formação de uma emulsão envolvendo metal, gás e escória. Por fim, a velocidade de descarburização volta a cair devido a redução de carbono no banho metálico. A oxidação do manganês é fortemente favorecida no início de sopro, aumentando dessa forma a quantidade de óxido de manganês na escória. Quando a cinética de descarburização é extremamente favorecida, ocorre um aumento do teor de manganês no metal. Ao final do sopro, com a redução da velocidade de descarburização, o teor de manganês no metal volta a cair. A desfosforação ocorre basicamente na interface metal-escória e é favorecida pelo aumento do teor de cal na escória, ou seja, a desfosforação é máxima quando a dissolução da cal na escória é máxima. A dessulfuração não é usualmente feita pelo processo LD, porém nota-se uma pequena diminuição gradual do teor de enxofre à medida que se segue o sopro de oxigênio.



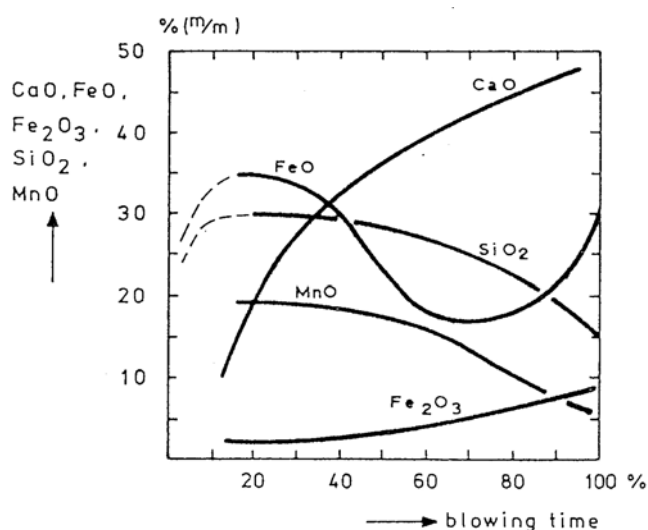
Fonte: VAN HOORN, 1976.

**Figura 1:** Evolução da composição química do banho metálico durante o sopro de oxigênio.

## 1.2 Evolução da Composição Química da Escória

A Figura 2 mostra a evolução da composição da escória durante o sopro de oxigênio para o mesmo convertedor LD citado no item anterior. No início do sopro de

oxigênio, a distância da lança ao banho é grande (sopro macio), o que favorece a oxidação do ferro e silício, aumentando dessa forma os teores de FeO e SiO<sub>2</sub> nos primeiros instantes de sopro na escória. A lança é gradualmente abaixada iniciando a emulsificação da escória. A emulsificação inicia por volta de 30% a 40% do tempo de sopro total, dependendo da prática de sopro adotada. A partir de então, como conseqüência, o FeO contido na escória sofre uma queda. Por volta da metade do tempo de sopro total a emulsificação da escória é máxima coincidindo com a precipitação de uma parte da composição da escória em 2CaO.SiO<sub>2</sub>. Depois de 75% do tempo de sopro, a taxa de descarburização cai e o teor de FeO da escória aumenta continuamente, devido à grande porcentagem de oxigênio no dado momento, proveniente da sobra da oxidação do carbono. Nos últimos instantes do sopro a taxa de crescimento de FeO da escória depende do teor de carbono contido no metal, da quantidade de cal dissolvida e da viscosidade da escória.<sup>1</sup>



Fonte: VAN HOORN, 1976.

**Figura 2:** Evolução da composição química da escória durante o sopro de oxigênio.

## 2 METODOLOGIA

O comportamento dos elementos constituídos no banho metálico e escória durante o processamento do aço no convertedor LD de 30 toneladas de uma usina integrada a carvão vegetal da Gerdau – Barão de Cocais foi obtido através de amostragens de metal líquido e escória em diferentes tempos de sopro. A Tabela 2.1 mostra os tempos que o sopro foi interrompido e os procedimentos realizados.

**Tabela 1:** Tempos de interrupção de sopro e procedimentos realizados.

Tempo de Sopro (min)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Procedimentos	1. Interrupção de Sopro; 2. Coleta de amostras residual (banho metálico); 3. Coleta de amostras de escória; 4. Análise da composição química do banho metálico; 5. Análise da composição química da escória.																		

Para cada corrida interrompida foram anotados a composição química e temperatura do gusa, o peso de sucata e gusa líquido enforçados. No momento da interrupção

do sopro foram coletadas também as análises dos gases. Essas coletas de dados tiveram como objetivo servir para futuras comparações de corridas que divergissem muito em suas análises umas das outras.

Antes das coletas de amostras de escória e banho metálico, para curtos tempos de sopro, esperou-se aproximadamente 3 minutos para que a emulsão abaixasse, tornando possível a coleta da residual. As amostras foram retiradas a partir de 3 minutos de sopro devido a dificuldade de amostragem para baixos tempos de sopro. Após a coleta da residual e escória, estas foram levadas ao espectrômetro e espectrômetro de raio-x, respectivamente, para análise química.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O levantamento das curvas dos elementos que será apresentado a seguir, tanto do banho metálico quanto da escória, foram baseadas nas linhas de tendências obtidas pela regressão dos dados coletados. A seguir, as Tabelas 2 e 3 mostram, respectivamente, a equação e o coeficiente de correlação que foram obtidos para as curvas dos elementos do banho metálico e escória, onde  $x = \%$  do tempo de sopro e  $y =$  concentração dos elementos.

**Tabela 2:** Coeficiente de correlação e equação obtida para os elementos contidos no banho metálico.

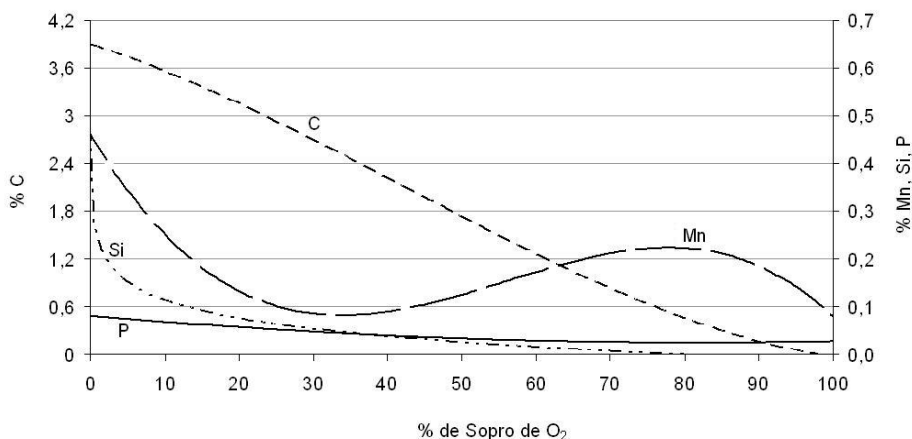
Elementos do Aço	Equação	Coeficiente de Correlação $R^2$
Carbono	$y = 4E-06x^3 - 0,0004x^2 - 0,03x + 3,903$	0,962
Silício	$y = -0,0551\ln(x) + 0,2409$	0,968
Manganês	$y = -3E-06x^3 + 0,0006x^2 - 0,0263x + 0,4614$	0,827
Fósforo	$y = 9E-06x^2 - 0,0014x + 0,0808$	0,813

**Tabela 3:** Coeficiente de correlação e equação obtida para os elementos contidos na escória.

Elementos da Escória	Equação	Coeficiente de Correlação $R^2$
$SiO_2$	$y = -0,0054x^2 + 0,6115x + 3,1167$	0,563
CaO	$y = 6E-05x^3 - 0,0146x^2 + 1,1906x - 0,1259$	0,879
MgO	$y = 4E-05x^3 - 0,0077x^2 + 0,4704x + 0,7046$	0,721
MnO	$y = 0,0016x^2 - 0,4245x + 34,489$	0,862
FeO	$y = 0,0127x^2 - 1,6604x + 68,805$	0,706

#### 3.1 Comportamento dos Elementos Contidos no Banho Metálico Durante o Sopro de Oxigênio

A Figura 3 mostra as curvas levantadas para os elementos contidos no aço (C, Si, Mn e P) durante o sopro de oxigênio.



**Figura 3:** Comportamento dos elementos contidos no aço durante o sopro de oxigênio.

A descarburização apresentou um comportamento semelhante à curva tradicional, onde se percebe uma discreta redução da velocidade de descarburização no início e no final de sopro. Esse fato é explicado pela ocorrência da oxidação preferencial do silício no início de sopro, como mostra a Figura 3, e no final do sopro pela escassez de carbono. O manganês também tem grande semelhança com a curva teórica, sendo possível notar uma acentuada redução de seu teor no aço até aos 30% de sopro, devido à alta quantidade de oxigênio disponível possibilitar sua oxidação. A curva do manganês mostra, também, que a sua oxidação é preferencial para baixas velocidades de descarburização.

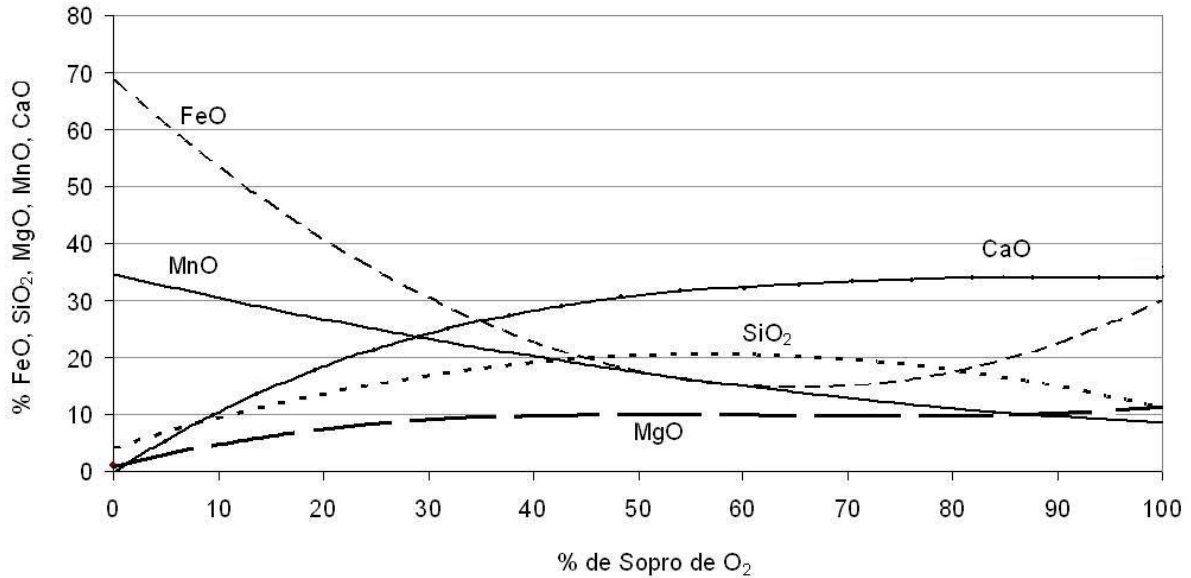
O silício, por sua vez, mesmo apresentando teores iniciais variados no início do processo, provenientes do gusa líquido, mostrou o mesmo comportamento da curva tradicional sendo rapidamente oxidado e tornando-se um elemento nocivo ao refratário, levando à necessidade de adição de agentes básicos até aos 20% de sopro.

Quanto ao fósforo, percebe-se uma queda constante de seu teor ao longo do sopro, devido ao aumento da oxidação do banho e dissolução da cal, tendendo a se reverter ao final em função do aumento da temperatura.

Devido à dispersão apresentada nos dados obtidos pela análise do espectrômetro de raio-x, não foi possível plotar a curva do comportamento do enxofre durante o sopro. Porém essa dispersão ocorre dentro de uma faixa de valores muito baixa não afetando a qualidade dos aços fabricados na usina da Gerdau Barão de Cocais.

### 3.2 Comportamento dos Elementos Contidos na Escória Durante o Sopro de Oxigênio

Assim como o item anterior, as curvas da maioria dos elementos contidos na escória (FeO, MnO, MgO, SiO<sub>2</sub>, CaO) durante o sopro foram levantadas, e estão mostradas na Figura 4.



**Figura 4:** Comportamento dos elementos contidos na escória durante o sopro de oxigênio.

No processo de fabricação de aço em Barão de Cocais é usada predominantemente cal dolomítica ao uso de cal calcítica com o objetivo de saturar a escória em MgO para proteção do refratário do convertedor. A consequência é um aumento da concentração dos elementos CaO e MgO da escória ao longo do sopro. O mesmo acontece com a basicidade, pois tem relação direta com o teor de CaO. Embora exista a predominância da cal dolomítica, todo o cálculo é baseado na quantidade de CaO necessário para neutralizar o silício do gusa de entrada, com basicidade final prevista entre 2,10 a 2,70.

Apesar das quantidades de CaO serem adicionadas em função do Si do gusa dos altos-fornos e o momento de adição ser comprometido pela velocidade dos vibradores de cal, mas sempre caindo até os primeiros 10% de sopro, a dissolução da cal segue trajetória definida pelo modelo de reação topoquímico. Apenas após a sua completa dissociação é possível perceber, na Figura 4, a variação de seu teor final.

No início de sopro é desejável que o teor de FeO seja maior para contribuir no processo de dissolução da cal. No período predominante da descarburização, a oxidação do ferro é desacelerada e volta a crescer no final de sopro. Essa oxidação final do ferro é ocasionada, principalmente, pela necessidade de alcançar temperaturas desejadas, em casos de balanços térmicos desfavoráveis entre gusa e sucata, e também pela necessidade de atingir os teores de carbono e fósforo previstos para vazamento.

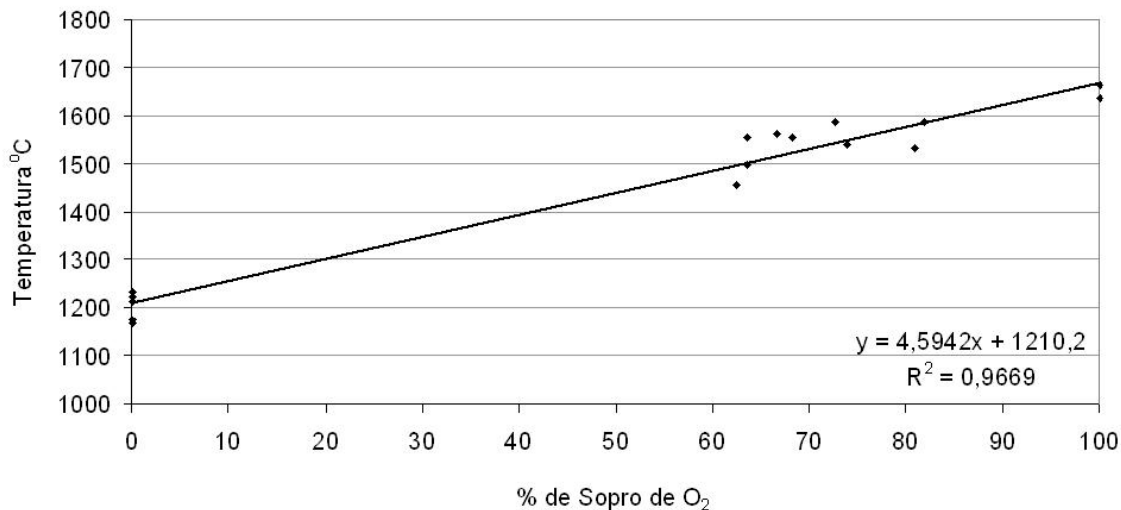
No caso do MgO, este sofre variações na adição provocadas pela relação de saturação nas escórias do LD. A saturação é estabelecida entre a quantidade de cal dolomítica e a quantidade cal calcítica. Neste balanço a quantidade de CaO é fixa, alterando a quantidade de material rico em MgO a ser adicionado. Mesmo que este parâmetro não tenha sido fixado, é possível notar o crescimento do MgO até ao 50% do sopro.

Já o Mn é fortemente oxidado no início do sopro e, com a incorporação de outros elementos na escória, seu teor vai sendo gradativamente reduzido.

A baixa correlação nas curvas de regressão de sílica e óxido de ferro está associada à sucata de retorno interno ser acondicionada em baias de chão batido com sucata de obsolescência, geralmente composta de material oxidado e grande quantidade de material não metálico.

### 3.3 Comportamento da Temperatura ao Longo do Sopro de Oxigênio

A Figura 5 mostra o comportamento da temperatura durante o sopro de oxigênio que sugere uma equação de 1º grau. A pequena quantidade de valores validos se deve à dificuldade de amostragem de temperatura até aos 60% de sopro, devido à sucata não fundida e à grande quantidade de emulsão notada durante as tentativas de amostragens de temperatura nesse intervalo.



**Figura 5:** Comportamento da temperatura ao longo do sopro de oxigênio.

Os valores da análise de gás apresentaram grande dispersão, não sendo possível obter equações de regressão com bons índices de correção.

Nas equações polinomiais, os valores dos termos independentes representam os valores dos elementos no gusa líquido, não sendo considerados os aportes vindos da sucata em função da falta de análise e classificação. As curvas foram realizadas no intervalo de 0 a 100% correspondendo ao tempo médio de sopro de 21 minutos. Na análise das curvas foi avaliada a extensão do sopro para valores até 115% e a coerência dos valores com a realidade no dia a dia da operação, sendo considerados aceitáveis.

Estas curvas, que foram levantadas para o LD de Barão de Cocais, serão incorporadas ao processo como referência de corridas para os sopradores.

## 4 CONCLUSÃO

Tanto os elementos do banho metálico quanto da escória apresentaram uma evolução aproximada aos teores das curvas tradicionais durante o sopro. Porém no banho metálico, o fósforo, contrariando o comportamento tradicional que de variações durante o sopro, apresentou queda constante de seu teor, com uma tendência à reversão ao final.

O uso predominante de cal dolomítica favorece uma concentração crescente dos elementos CaO e MgO da escória ao longo do sopro, se estabilizando no final.

O comportamento da temperatura durante o sopro de oxigênio, devido à pequena quantidade de valores válidos, apresentou um crescimento constante durante todo o sopro de oxigênio.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem aos forneiros e sopradores da Gerdau Barão de Cocais pelo envolvimento com o trabalho durante as várias interrupções de sopro para a coleta de amostras. Também agradecem ao Professor Roberto Parreiras Tavares pelo suporte técnico e a Gerdau Barão de Cocais, representada pelo Engenheiro Metalurgista Sávio Cota Fonseca, pela oportunidade para o desenvolvimento contínuo do bolsista de graduação e colaboradores.

## **REFERÊNCIAS**

- 1 DEO, B., ASSIS, P. S. Process Dynamics of Oxygen Steelmaking. ABM – Course. Indian Institute of Technology – Kanpur. Escola de Minas: UFOP, 2006. 328p.
- 2 CASTRO, L. F. A., TAVARES, R. P. Apostila de Siderurgia II. Belo Horizonte: UFMG. 248p.
- 3 VAN HOORN, A. I., KREYGER, P.J., KONYNENBURG J. T. Evolution of Slag Composition and Weight During the Blow. Research & Development Laboratories. Department Process Technology: Canada, 1976.