



## ESTUDO DAS VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM A QUALIDADE DA CAL PRODUZIDA NOS FORNOS VERTICAIS DA USIMINAS IPATINGA<sup>1</sup>

Guilherme César Silva Rodrigues<sup>2</sup>  
Carlos André Ruy Carneiro<sup>3</sup>  
Alice Gomes Miranda<sup>4</sup>  
João Augusto Dolabela Caldeira<sup>5</sup>

### Resumo

A cal é um dos insumos mais importantes no processo de fabricação do aço. O seu bom desempenho é imprescindível para a qualidade do aço e para a estabilidade do processo. Os teores de CaO, P e S, a perda por calcinação (PPC) e a reatividade são de suma importância para as reações de refino no convertedor LD e devem ser controladas na cal. Com o objetivo de elevar a qualidade da cal produzida nos fornos verticais de calcinação da Usina de Ipatinga, os principais parâmetros do processo foram estudados. Com base nisso, foram realizados balanços térmico e de massa, que permitiram fazer ajustes nos parâmetros de processo. Tais alterações permitiram uma elevação dos teores de CaO em 7%, bem como uma menor variabilidade nesses resultados. Esse resultado gerou um potencial de redução do consumo de cal nos processos de refino LD.

**Palavras-chave:** Cal; Fornos verticais; Calcinação; Qualidade da cal.

### STUDY OF THE VARIABLES THAT INFLUENCE ON THE QUALITY OF THE LIME PRODUCED IN VERTICAL FURNACES OF USIMINAS IPATINGA

### Abstract

The lime is one of the most important fluxes used during the steel production in the Steelmaking Shop. Its good performance is essential for the steel quality and the process stability. The CaO, P and S content, the loss on ignition (LOI) and the reactivity are of utmost importance for the refining reactions in the converter, and they have to be controlled in the lime. Aiming to improve the quality of the lime produced in the vertical furnaces of Usiminas Ipatinga, the calcinations process was studied. Based on that, it was possible to make adjustments in the process parameters. Such adjustments allowed an increase in lime CaO content of about 7%, as well as a lesser variability in its value. This result generated a potential of decrease in lime consumption during the refining process in LD.

**Key words:** Lime; Vertical furnaces; Calcinations; Lime quality.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 43º Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2012, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Membro da ABM; Técnico em metalurgia; Gerência Geral de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas; Ipatinga, MG.

<sup>3</sup> Engenheiro Metalurgista; Gerência Geral de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas; Ipatinga, MG.

<sup>4</sup> Engenheira Química; Gerência Geral de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas; Ipatinga, MG.

<sup>5</sup> Membro da ABM; Gerente de Preparação e Abastecimento das Aciarias; Gerência Geral de Aciaria, Usiminas; Ipatinga, MG.

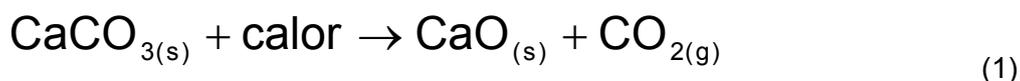


## 1 INTRODUÇÃO

A cal é o fundente mais utilizado nas aciarias durante o processo de fabricação do aço, auxiliando na formação das escórias. Sua qualidade é imprescindível para a estabilidade do processo e para as reações de refino. Os teores de CaO, P e S, a perda por calcinação (PPC) e a reatividade são parâmetros que devem ser controlados na cal carregada nos convertedores.

No processo de refino via convertedor LD, o alto teor de CaO e a reatividade da cal são propriedades importantes para a reação de desfosforação do aço. Um bom controle destas variáveis irá permitir que a escória se forme rapidamente com uma quantidade adequada de CaO livre, garantindo a fixação do fósforo na escória.

A reação de calcinação do calcário pode ser escrita conforme apresentado na Equação 1.<sup>(1)</sup>



Conforme Equação 1, o calcário se decompõe em CaO<sub>(s)</sub> e CO<sub>2(g)</sub>. Para que a reação ocorra, é necessário o fornecimento de uma determinada quantidade de calor. No caso da calcinação em fornos verticais, o calor para a reação de calcinação é fornecido pela queima do carbono, que na Usiminas é proveniente do coque.

A reação de calcinação é um processo topoquímico, em que a transformação do calcário em cal ocorre da superfície para o interior da partícula.<sup>(2)</sup> Para a completa transformação do calcário em cal é necessária uma massa de coque de aproximadamente 15% da massa total do calcário. Esse valor é encontrado por meio do cálculo do balanço térmico, levando também em consideração as perdas térmicas inerentes ao processo.

No processo de fabricação da cal em fornos verticais, as variáveis que determinam a qualidade do processo são:

- Massa, granulometria e umidade do calcário e coque;
- vazão de ar dos sopradores;
- temperatura do forno; e
- tempo de residência da carga.<sup>(3)</sup>

Dentro deste contexto, foi realizada uma análise e ajustes no processo de calcinação nos fornos verticais da Usiminas, para melhorar a qualidade da cal produzida.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia do trabalho foi dividida em diferentes etapas, visando caracterizar o processo e verificar as oportunidades de otimização das variáveis que interferem diretamente na qualidade da cal.

### 2.1 Caracterização das Matérias-Primas Empregadas nos Fornos de Calcinação

Foram realizadas as análises químicas e granulométricas do calcário e do coque carregados nos fornos de calcinação. Foi também determinado o poder calorífico superior do coque, que se refere à energia contida no combustível.



## 2.2 Padronização da Amostragem da Cal

Visando melhorar a confiabilidade dos resultados de análise química, foi implantado um novo padrão de coleta de amostras. Foram realizadas seis amostragens para avaliar a qualidade que a cal apresentava antes de qualquer alteração no processo.

## 2.3 Padronização da Massa de Calcário Carregada

Para controle adequado da massa de calcário carregada nos fornos foi regulado o tempo de acionamento dos moto-vibradores dos silos, de forma a descarregarem aproximadamente 2 toneladas de calcário por carga. Para regular os moto-vibradores foram realizadas dez pesagens em cada silo. Com os dados obtidos nas pesagens, foi possível regular um novo tempo de acionamento para os moto-vibradores.

## 2.4 Controle da Massa e da Qualidade do Coque Carregado

Foi revisado, por meio de um balanço energético, a quantidade de coque utilizada como fonte energética para a calcinação da massa de calcário carregada. Diante desses dados, a quantidade de coque foi ajustada levando em consideração as características do coque, em especial o seu teor de umidade.

## 2.5 Padronização dos Intervalos de Descargas da Cal

A quantidade de cal descarregada do forno por unidade de tempo é de grande importância para o controle do processo, pois está diretamente ligada ao tempo de residência do calcário no forno. Uma das consequências da descarga de cal em intervalos curtos é a produção de pedras mal calcinadas ou até mesmo cruas, gerando grande impacto nos processos de refino do aço. Por outro lado, se o intervalo de descarregamento for longo, pode ocorrer calcinação em excesso, que provoca o fenômeno de colagem entre as pedras. Por isso, o tempo de descarregamento deve ser adequado. O volume de cal descarregado pelo forno é controlado por um componente mecânico chamado grelha e o seu tempo de abertura determinará esse volume descarregado. Visando a otimização do processo, foi necessário rever o tempo de abertura das grelhas visando um descarregamento de 0,2 m<sup>3</sup> de cal em cada forno.

## 2.6 Análise da Qualidade da Cal Produzida

Durante as alterações propostas, foram realizadas amostragens da cal produzida nos fornos verticais com o objetivo de avaliar o impacto das modificações realizadas no processo. Foram coletadas um total de 87 amostras e analisados os teores de CaO e PPC para comparação com os resultados anteriores às modificações propostas.



## 3 RESULTADOS

### 3.1 Caracterização das Matérias-Primas Empregadas nos Fornos de Calcinação

Na Tabela 1 são apresentados os resultados da análise química típica e a especificação de compra de uma amostra de calcário.

**Tabela 1.** Análise química do calcário e especificação química de qualidade (%)

	CaO	PPC	S	P	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	Fe <sub>(t)</sub>
<b>A.Q.</b>	55,860	43,500	0,026	0,050	0,320	0,430	0,040	0,010	0,100
<b>Espec.</b>	≥ 54,000	-	≤ 0,035	≤ 0,070	≤ 1,000	≤ 1,2	≤ 0,70	-	≤ 0,5

Conforme resultados apresentados na Tabela 1, verifica-se que a composição química encontra-se dentro da especificação. Além dos teores de CaO e PPC, também é importante a atenção aos teores de P e S, pois estes elementos podem ser incorporados ao aço durante o processo de refino.

Na Tabela 2 é apresentada a distribuição granulométrica de uma amostra típica de calcário utilizada na Usiminas.

**Tabela 2.** Granulometria do calcário (% retido)

≥ 100,00 mm	≥ 75,00 mm	≥ 50,00 mm	< 50,00 mm
9,28	45,06	37,23	8,43

A granulometria deve estar preferencialmente entre 50 mm e 100 mm, valores abaixo de 50 mm impactam na permeabilidade da carga e acima de 100 mm podem prejudicar a calcinação, gerando pedras de cal subcalcinadas ou cruas.

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentados os resultados de análise química e distribuição granulométrica, respectivamente, para o coque carregado nos fornos verticais.

**Tabela 3.** Análise química do coque (%)

C	H	O	N	S	Cinzas	Material volátil
86,40	0,85	0,69	1,06	0,70	8,58	1,93

**Tabela 4.** Análise granulométrica do coque

Malha (mm)	Retido (g)	% Retido	% Acumulado
<b>25</b>	56,93	13,70	13,70
<b>15</b>	284,41	68,40	82,10
<b>10</b>	56,03	13,50	95,60
<b>&lt;10</b>	18,15	4,40	100,00
<b>TOTAL</b>	415,52	100,00	-

É importante ressaltar que, o coque deve ter uma porcentagem baixa de finos, para que a permeabilidade dos gases ao longo do forno vertical não seja comprometida.



## 3.2 Padronização da Amostragem da Cal

A padronização da amostragem da cal na área operacional foi definida conforme descrito na Tabela 5.

**Tabela 5.** Padrão de amostragem da cal produzida nos fornos de calcinação

Passo	Atividade – Fornos Verticais
1	Retirar em cada forno 1 pá de cal em 4 descargas distintas
2	Misturar as cales
3	Retirar 3 pás para análise
4	Rotular a amostra com número do forno, data, hora da amostragem, e responsável pela amostragem.

Os resultados do teor médio de CaO e PPC das seis amostras de cal antes de qualquer alteração nos fornos são apresentados na Tabela 6. Esses valores serão usados como referência para comparação com a qualidade da cal após as mudanças no processo.

**Tabela 6.** Análise do teor médio de CaO e PPC (%)

Forno	CaO	PPC
1	78,9 ± 6,4	20,8 ± 5,1
2	84,8 ± 8,5	10,1 ± 4,7
3	82,4 ± 8,2	10,9 ± 3,9

## 3.3 Padronização da Massa de Calcário Carregada

A Tabela 7 mostra os dados de massa de calcário descarregada e o seu desvio de acordo com o tempo de acionamento dos moto-vibradores. O desvio verificado é justificado pelas variações granulométricas entre as cargas de calcário.

**Tabela 7.** Massa de calcário descarregada de acordo com tempo de vibração dos dos moto-vibradores

Silo C			Silo D		
Peso (kg)	Desvio (kg)	Tempo (s)	Peso (kg)	Desvio (kg)	Tempo (s)
2.238	182	33	2.150	131	56

A Tabela 8 contém os novos valores de tempo de vibração, ajustados para um peso de 2.000 kg de calcário. Os novos valores foram obtidos através de proporcionalidade.

**Tabela 8.** Padronização da massa de entrada de calcário

Silo C			Silo D		
Peso (kg)	Desvio (kg)	Tempo (s)	Peso (kg)	Desvio (kg)	Tempo (s)
2.000	182	29	2.000	131	52

### 3.4 Controle da Massa e da Qualidade do Coque Carregado

Nas cargas dos fornos de calcinação utilizava-se um total de 224 kg de coque. A quantidade mencionada não fornecia energia suficiente para a decomposição de 2 toneladas de calcário, conforme foi verificado no balanço energético desenvolvido. A quantidade de coque foi ajustada para 240 kg para suprir o balanço energético. Para avaliar o teor de umidade no coque, foram realizadas amostragens em três locais distintos de estocagem deste insumo.

Na Tabela 9 são apresentados os resultados do teor de umidade.

**Tabela 9.** Teor de umidade do coque por local de estocagem (%)

Local	Teor de umidade
A	4,46
B	12,36
C	11,32

Com base nos resultados apresentados na Tabela 9, pode-se concluir que o coque ideal para o consumo da calcinação é o proveniente do local A, pois apresenta o menor teor de umidade. Entretanto, devido a fatores logísticos e quantidade de material em estoque, não foi possível realizar o fornecimento de coque somente desse local.

O coque, depois de transportado para a calcinação, é armazenado em dois silos cobertos até o momento do seu consumo. Uma solução encontrada para reduzir o teor de umidade deste insumo foi implantar um revezamento de trabalho entre os silos de armazenamento de coque. O objetivo desse revezamento foi gerar um tempo maior de estocagem do coque nos silos, o que favoreceria sua secagem, e conseqüentemente, a redução da umidade. Foi proposto que somente quando um silo de coque fosse totalmente consumido, o outro poderia ser utilizado. Antes de ser implantado esse procedimento, utilizava-se somente um silo, mantendo o outro como reserva, sendo esse utilizado somente quando o primeiro apresentasse algum defeito. Com a adoção da prática de revezamento de silos, o coque passou a apresentar um teor de umidade de 10,63%, quando esse era proveniente dos locais B e C. Ou seja, a prática possibilitou uma redução média de 1% na umidade do coque.

### 3.5 Padronização dos Intervalos de Descargas da Cal

O tempo de abertura da grelha não era igual para os três fornos, e por isso, o volume de cal descarregado também era diferente. O tempo de abertura registrava 1,9 s para o forno 1, já no forno 2 esse tempo era de 2,1 s, enquanto para o forno 3



o tempo era 2,6 s. O tempo de descarga foi ajustado para 2,1 segundos, sendo padronizado uma descarga de 0,2 m<sup>3</sup> por batelada.

### 3.6 Análise da Qualidade da Cal Produzida

Os teores de CaO e PPC na cal produzida após as alterações realizadas no processo são apresentados nas Figuras 1 e 2, respectivamente. Essas análises têm o intuito de avaliar a qualidade da cal em resposta às ações propostas e padronizadas.

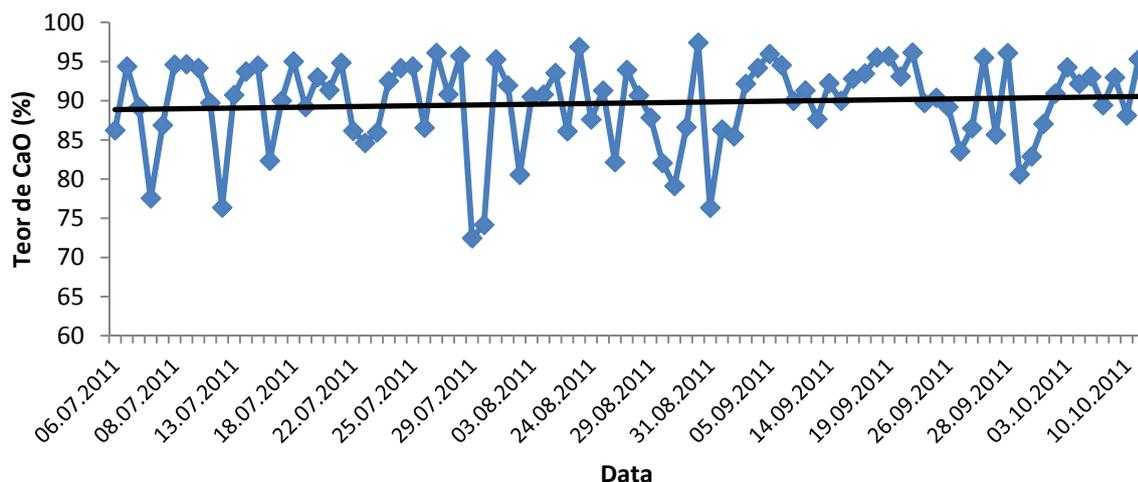


Figura 1. Evolução do teor de CaO (%) após as alterações operacionais.

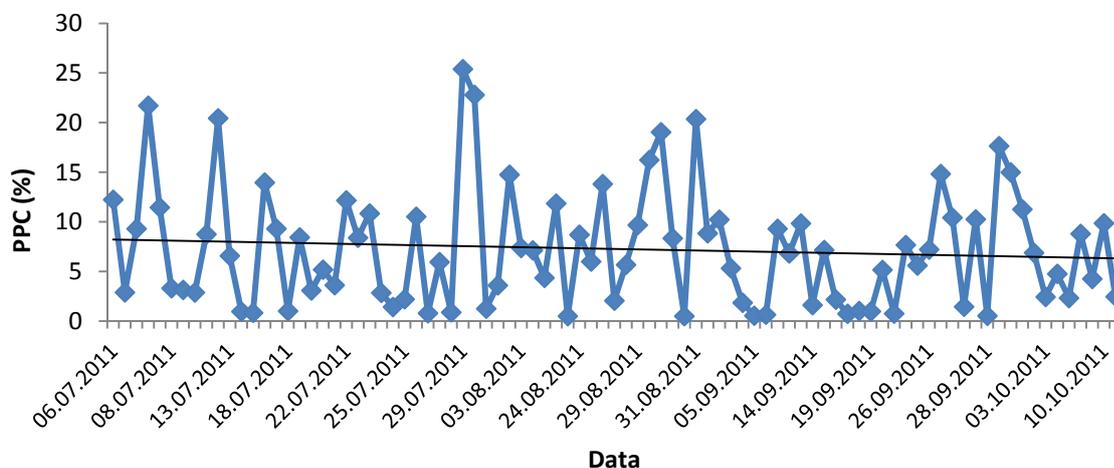


Figura 2. Evolução do teor de PPC (%) após as alterações operacionais.

Considerando as informações apresentadas na Figura 2, observou-se uma melhora na qualidade da cal após as alterações no processo. Durante o estudo verificou-se que o teor de CaO está seguindo uma tendência de aumento enquanto o PPC de redução. Outro fator importante é a diminuição da dispersão dos resultados.

Considerando os resultados em termos de números médios, o teor de CaO aumentou em 7% após a implementação das ações. Adicionalmente, o PPC reduziu em 36% após as alterações.

Considerando que a adição de cal no LD apresenta uma relação linear com teor de CaO nesse insumo, para cada 1% de incremento de teor CaO na cal reduz-se em



média 20 Kg de adição, considerando um peso médio de 2.000 kg adicionado. Para 7% de aumento do teor de CaO, o potencial de redução do consumo deste fundente é de 140 Kg em média.

## 4 CONCLUSÃO

A partir de um balanço térmico e da avaliação das condições operacionais do processo de calcinação via fornos verticais foi possível propor modificações nas práticas operacionais visando à melhoria da qualidade da cal. Destacam-se as seguintes modificações no processo:

- Foi realizada a padronização da amostragem da cal produzida nos fornos verticais com o intuito de evitar divergências na análise do processo;
- a carga de calcário foi ajustada com base no tempo de operação dos moto-vibradores dos silos de abastecimento. Padronizou-se o tempo de operação visando uma massa de 2 toneladas de calcário;
- ajustou-se o valor da massa de coque para 240 kg por carga visando maior eficiência energética;
- reduziu-se a umidade do coque, por meio da prática de revezamento do uso dos silos de carregamento, o que contribui para a eficiência energética do processo; e
- ajustou-se e padronizou-se o tempo de abertura da grelha de descarga do forno vertical de forma a sempre descarregar um volume de cal da ordem de 0,2 m<sup>3</sup>, contribuindo assim com a uniformidade do tempo de residência da carga no interior do forno;

Todos esses ajustes permitiram elevar o teor de CaO da cal em 7% e reduzir os teores de PPC em 36%. Este resultado sinaliza para uma possível redução do consumo de cal nos convertedores da Aciaria de Ipatinga e um melhor controle da basicidade da escória final de sopro.

## REFERÊNCIAS

- 1 SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. **Calcário e dolomito**. In: **Rochas & Minerais Industriais**: Usos e especificações Rio de Janeiro: CETEM - Centro de Tecnologia Mineral, p. 327-350, 2005.
- 2 SESHADRI, V.; TAVARES, R. P., SILVA, C. A.; SILVA, I. A. **Fenômenos de transporte: Fundamentos e aplicações nas Engenharias Metalúrgica e de Materiais**. São Paulo: ABM - Associação Brasileira de Materiais, 2010.
- 3 USIMINAS. **Matérias Primas para Fabricação da Cal na Usiminas e suas Influências**. Ipatinga: USIMINAS, (1969).