

# SISTEMA CARBOMETRIA NO CONVERTEDOR AOD-L DA ARCELORMITTAL INOX BRASIL<sup>1</sup>

*Décio Sartori Felix Filho*<sup>2</sup>

*Max Antônio Damasio*<sup>3</sup>

*José Cordeiro Neves*<sup>3</sup>

*Humberto Marin*<sup>4</sup>

*Antônio Francisco Martins Barreto*<sup>5</sup>

*Antony William de Almeida*<sup>6</sup>

*Alessandro Martins Duarte*<sup>7</sup>

*Maurício Ferreira Coelho*<sup>8</sup>

*Adilson Aparecido Gonçalves*<sup>9</sup>

## Resumo

Com o objetivo de aumentar a produtividade e reduzir o custo de fabricação do aço foi implantado no convertedor AOD-L na ArcelorMittal Inox Brasil, o “Sistema Carbometria”. Este sistema é composto de analisadores que fazem a análise dos gases gerados durante a elaboração do aço e de um modelo matemático que executa cálculos de previsão do carbono além de gerenciar as variáveis do processo. Após sua implantação foi possível reduzir o tempo de processo, o consumo de insumos e a geração de resíduos.

**Palavras-chave:** Carbometria; AODL; Aços inoxidáveis

## CARBOMETRY SYSTEM OF ARCELORMITTAL INOX BRASIL’S AOD-L CONVERTER

### Abstract:

Aiming to increase the productivity and decrease the production cost in stainless steel, the “Carbometry System” was developed and installed in the AOD-L converter. This system comprises some gas analyzers, that perform the analysis of the fumes generated during the process, and one model that calculates the bath carbon content. Using this system it is possible to decrease the process time, the material consumption and residues generation.

**Key words:** Carbometry; AODL; Stainless steel

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao XXXIX Seminário de Aciaria – Internacional, 12 a 16 de maio de 2008, Curitiba, PR, Brasil*

<sup>2</sup> *Engenheiro Metalúrgico, Engenheiro de Controle do Processo da Aciaria.*

<sup>3</sup> *Engenheiro Metalúrgico, Gerente de Aciaria.*

<sup>4</sup> *Engenheiro Metalúrgico, MSC Gerente de Aciaria.*

<sup>5</sup> *Engenheiro Metalúrgico, MSC (ex-empregado)*

<sup>6</sup> *Engenheiro Elétrico, Engenheiro de Automação da Aciaria.*

<sup>7</sup> *Administrador, Gestão da Aciaria.*

<sup>8</sup> *Técnico Metalúrgico, Técnico de Controle de Processo de Aciaria.*

<sup>9</sup> *Técnico em sistema de informação, Analista de instrumentação da Aciaria*

## **1 INTRODUÇÃO**

O convertedor AOD-L é um dos principais equipamentos utilizados na produção de aços inoxidáveis. A sigla significa descarburização com argônio e oxigênio (A-argon, O-oxygen, D-decarburization, L-lance) e como o próprio nome explicita, o refino dos aços inoxidáveis ocorre através da injeção de uma mistura de oxigênio e gás inerte no banho metálico, através de ventaneiras laterais e lança de topo, com o objetivo de promover a oxidação seletiva do carbono em relação ao cromo.

O objetivo do processo AOD-L é fazer a conversão de um banho metálico com alto teor de carbono em aço inoxidável visando minimizar o custo de fabricação e maximizar a produtividade e, para isto, foi desenvolvido no convertedor da ArcelorMittal Inox Brasil o sistema de previsão do teor de carbono contido no aço através da análise dos gases gerados, denominado Sistema Carbometria, o qual possibilita o convertedor atingir estes objetivos.

O sistema Carbometria é composto por analisadores de gases que fazem a medição dos teores de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> presentes no gás de exaustão e, um modelo matemático que calcula, armazena e gerencia as variáveis do processo. Basicamente o modelo calcula o teor de carbono contido no banho metálico, através da análise dos gases gerados, e interage com sistema de automação realizando o controle das fases do processo.

Com o conhecimento do teor de carbono contido no banho é possível eliminar fases intermediárias de amostragem e, conseqüentemente, reduzir o tempo de processamento dos aços maximizando a produtividade do convertedor. Além disso, conhecendo-se a quantidade de carbono queimado por unidade de tempo, ou seja, taxa de descarburização, é possível evitar sopros excessivos de oxigênio proporcionando menores oxidações dos elementos metálicos presentes no aço inoxidável, principalmente cromo e manganês, sendo assim possível, reduzir o custo de fabricação dos aços através da redução do consumo de ferro silício gasto na redução dos óxidos formados.

## **2 MATERIAL E MÉTODO**

### **2.1 Metodo de Produção do Aço Inoxidável na Arcelormittal Inox Brasil**

O processo de produção do aço inoxidável se inicia com a fusão das matérias primas, principalmente sucata, nos fornos elétricos a arco (FEA) e com a produção do gusa nos alto-fornos. O gusa dos alto-fornos é desfosforado na estação de pré-tratamento de gusa (PTG) e, em seguida misturado ao metal dos fornos elétricos a arco. Este produto é então carregado no convertedor AOD-L onde vai ocorrer o processo de refino, sendo convertido em aço. O aço recebe os ajustes finais de composição química na panela, para em seguida ser transformado em placas no lingotamento contínuo, conforme mostra a Figura 1.

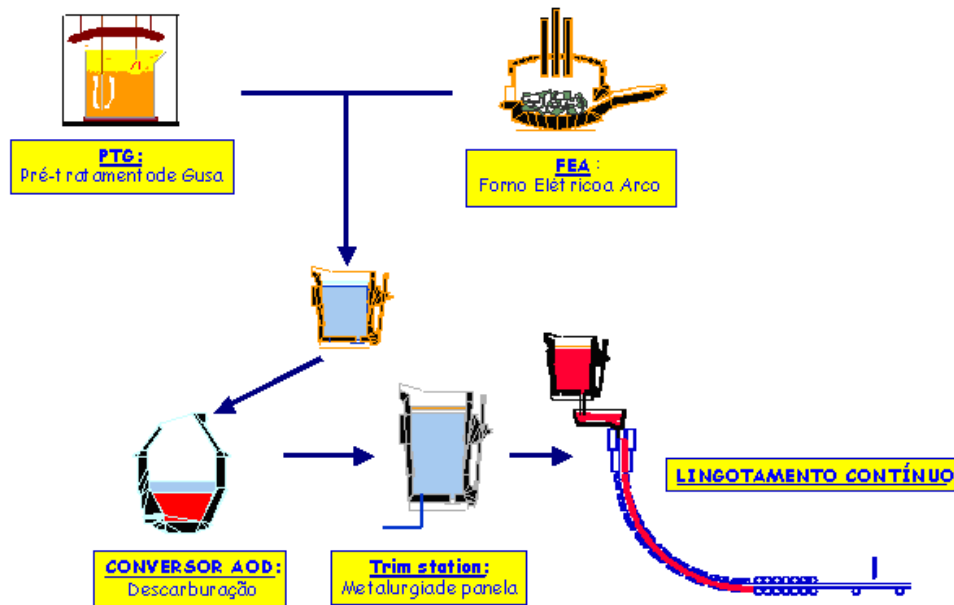


Figura 1. Fluxograma simplificado do processo duplex na aciaria

## 2.2 Mecanismo de Descarburação no Convertedor AOD-L

Como apresentado na introdução, no convertedor AOD-L uma mistura de oxigênio mais gás inerte é soprada no banho metálico. A maior parte do oxigênio que entra no convertedor reage com o ferro e o cromo principalmente, na região das ventaneiras, formando  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  e  $\text{FeO}$ . Estes óxidos ficam aderidos à bolha de gás e durante sua subida, os óxidos reagem com o carbono dissolvido no banho, formando gás  $\text{CO}$  reduzindo os metais que retornam ao banho metálico. Este processo de descarburação é denominado descarburação indireta, expressa pela seguinte reação:



Calculando a constante de equilíbrio da reação, temos:

$$K_{\text{eq.}} = \sqrt{\frac{\alpha_{\text{cr}}^2 \cdot P_{\text{co}}^3}{\alpha_{\text{cr}_2\text{o}_3} \cdot \alpha_{\text{c}}^3}} \quad (\text{Eq.2})$$

Podemos isolar a atividade do carbono de equilíbrio da reação acima para facilitar a análise da influência dos principais parâmetros do processo:

$$\alpha_{\text{c}} = \sqrt[3]{\frac{\alpha_{\text{cr}}^2 \cdot P_{\text{co}}^3}{\alpha_{\text{cr}_2\text{o}_3} \cdot K_{\text{eq}}^2}} \quad (\text{Eq.3})$$

Como a atividade é diretamente proporcional a concentração, à medida que reduzirmos a atividade do carbono de equilíbrio, estamos favorecendo o processo de

descarburação. Analisando a equação 1 verifica-se que uma possibilidade de reduzir a atividade do carbono é diminuindo a pressão parcial de CO. Uma maneira de reduzir a pressão parcial do CO é aumentar injeção de gás inerte. Com isso tem-se que o aumento da injeção de gás favorece o processo de descarburação.

Outra maneira de reduzir a atividade do carbono é reduzir a constante de equilíbrio da reação. Como  $K_{eq} = \exp(-\Delta G^{\circ}/RT)$ , temperaturas altas diminuem a constante de equilíbrio, favorecendo a descarburação. A temperatura de processo na prática é limitada pela resistência refratária.

As adições, uma vez que reduzem a atividade do cromo, favorecem a descarburação. Com isso, as adições de elementos que não contém cromo promovem a diluição do cromo reduzindo sua atividade. Porém como os materiais adicionados estão à temperatura ambiente, maiores adições reduzem a temperatura do banho, desfavorecendo a descarburação.

Na prática as adições são limitadas pelo tempo de processo, pela característica dos materiais a serem adicionados e pelo balanço térmico.

### 2.3 Sistema de Análise dos Gases

O sistema de análise é composto por equipamentos que fazem à captação, secagem e limpeza dos gases do processo. A captação é realizada através de uma sonda por uma bomba que faz a sucção de uma parte do gás presente na tubulação do sistema de desempoeiramento e transporta-o para secadores e filtros. Em seguida o gás seco e limpo é enviado aos analisadores. Estes equipamentos são montados em um painel (Figura 2), localizados próximos ao local de captação, em uma cabine blindada, protegida de poeira e com temperatura controlada.



**Figura 2.** Painel do sistema de análise de gases

## 2.4 Arquitetura do Sistema de Automação

O sistema de automação é composto de um servidor e uma interface gráfica (IHM). O servidor tem como principal função executar o modelo matemático a partir de informações provenientes do sistema de análise dos gases. O servidor também possui um banco de dados para armazenamento dos parâmetros do modelo e dos dados reais de processo bem como os resultados dos cálculos. Através dos resultados obtidos o modelo interage com o sistema de automação realizando o controle das fases de processo. A interface gráfica, denominada “IHM Carbometria”, é atualizada a cada 5 segundos e contém de forma gráfica as principais variáveis do processo.

A figura abaixo mostra a nova configuração do sistema de automação.

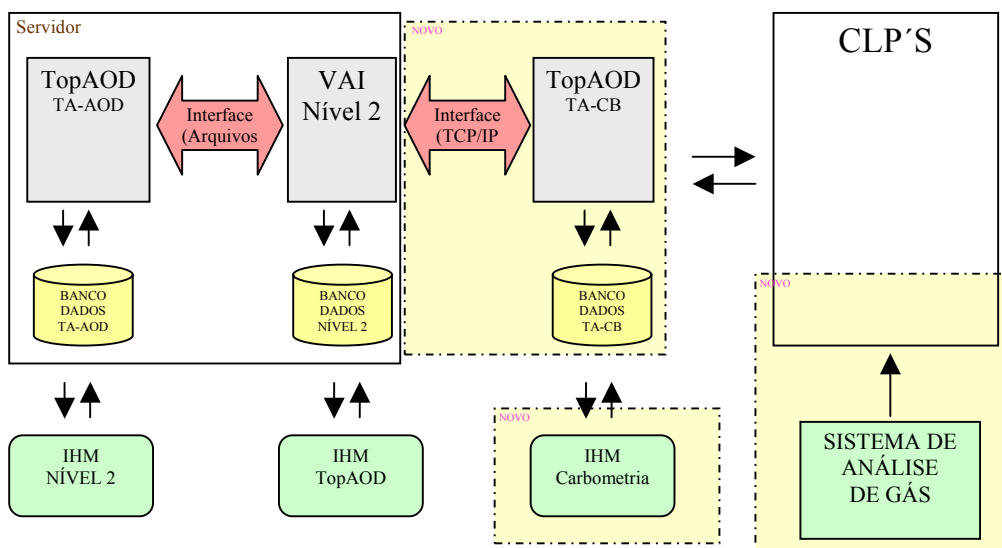


Figura 3. Arquitetura do sistema de automação no convertedor AOD-L

## 2.5 Modelo Matemático de Cálculo

As atividades para a implantação do Sistema Carbometria foram iniciadas em abril de 2004, envolvendo as áreas da engenharia, metalurgia, automação e instrumentação da ArcelorMittal inox Brasil. O trabalho contou com o apoio de empresas parceiras as quais realizaram a fabricação, montagem e adequação dos sistemas, bem como uma equipe especializada da França nas áreas de automação e metalurgia. Em 20 de julho de 2005 foi realizada a primeira corrida com controle total da carbometria e desde setembro de 2005 todas as corridas estão sendo controladas pelo sistema.

O modelo matemático da carbometria tem como principal função o cálculo do teor de carbono contido no banho e este cálculo realizado através da análise dos gases gerados no processo sendo dividido em duas metodologias distintas. A primeira corresponde a um balanço de massa do carbono, sendo utilizado nas fases iniciais do processo e a segunda, utilizada nas fases finais do processo é uma correlação linear da taxa de descaburação, ou seja, correlação com a eficiência de queima do carbono.

As Figuras 4 e 5 mostram os resultados obtidos no balanço de massa e na correlação linear, respectivamente.

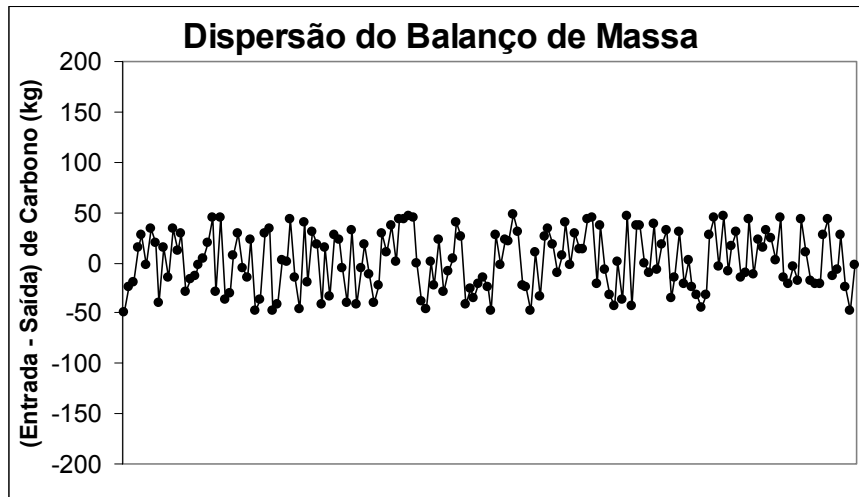


Figura 4. Balanço de massa do carbono

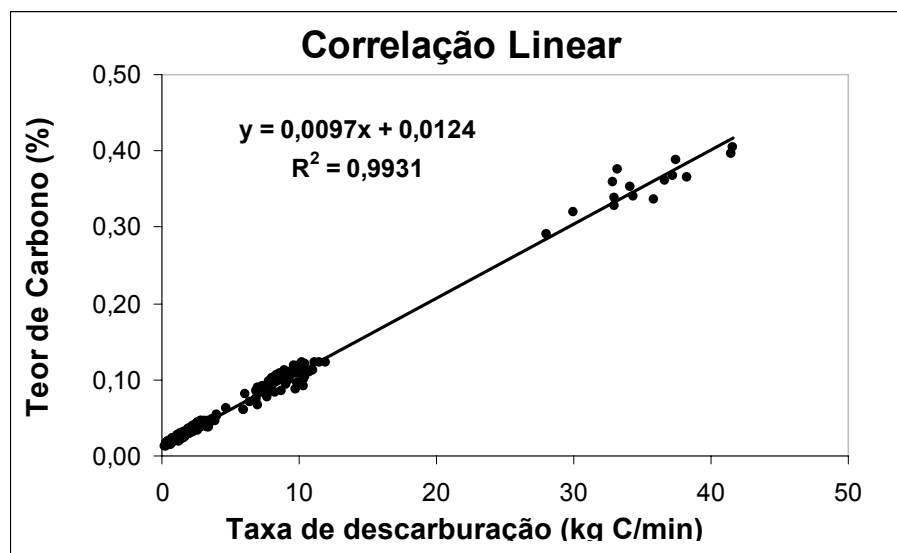


Figura 5. Correlação Linear entre o teor de carbono do banho e a taxa de descarburização

Para o cálculo do balanço de massa é necessário conhecer os seguintes dados:

Dados de Entrada:

- $P_{\text{metal}}$  : Peso de metal carregado, em toneladas.
- $C_{\text{metal}}$  : Teor de carbono do metal carregado, em %.
- $P_{\text{adições}}$  : Peso dos materiais adicionados, em toneladas.
- $C_{\text{adições}}$  : Teor de carbono dos materiais adicionados, em %.

Dados de Saída:

- $P_{\text{gases}}$  : Peso de carbono presente nos gases, em toneladas.
- FC : fator de correção dos gases
- $P_{\text{aço}}$  : Peso do aço, em toneladas.
- $C_{\text{aço}}$  : Teor de carbono do aço, em %.

Igualando os dados de entrada e saída, temos a seguinte equação para o cálculo do teor de carbono do banho;

$$\%C_{\text{aço}} = \frac{P_{\text{metal}} * C_{\text{metal}} + P_{\text{adições}} * C_{\text{adições}} - P_{\text{gases}} * FC}{P_{\text{aço}}} \quad (\text{eq.4})$$

Onde: FC é ajustado em função da variação do balanço de massa das corridas anteriores, e o  $P_{\text{gases}}$  é calculada de acordo com a vazão de gás do sistema de desempoeiramento e os teores de CO e CO<sub>2</sub> medidos.

Para o cálculo do teor de carbono do banho utilizando a metodologia da correlação linear é expressa pela seguinte equação.

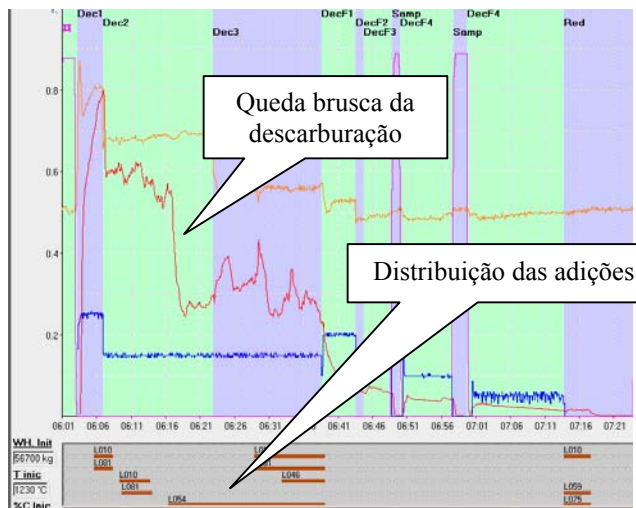
$$\%C_{\text{aço}} = A * dC/dT + B \quad (\text{eq.5})$$

Onde: Os valores de A e B foram definidos através de correlações lineares entre o teor de carbono presente no banho, medidos através de amostras, e a taxa de descarburização no momento da amostragem. Foram definidos os valores de A e B para as diferentes condições do processo.

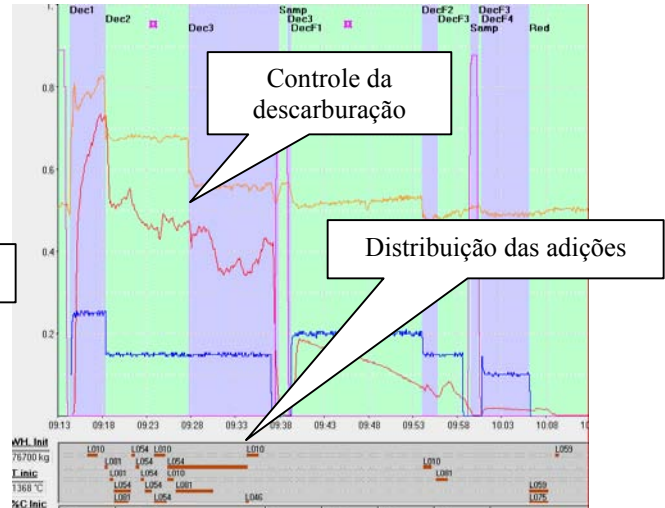
Uma função importante do modelo é o gerenciamento das mudanças de fases do processo, pois possibilita reduzir o grau de oxidação e, conseqüentemente, reduzir consumo de ferro silício gasto na desoxidação do banho. Para se ter uma menor oxidação durante o sopro de oxigênio, o processo é dividido em fases, sendo que cada uma possui vazões de oxigênio e gás inerte distintas. Para minimizar a oxidação do cromo é importante que ocorram as mudanças de fase nos momentos adequados, ou seja, antes que o carbono do banho atinja o carbono crítico da fase. O modelo carbometria gerencia automaticamente estas mudanças de fases, propiciando uma menor oxidação de cromo.

Outro ponto que contribui para minimizar a oxidação do cromo é a adição de ferro-ligas contendo alto teor de carbono nos momentos adequados. Para que isto ocorra o modelo constrói uma curva, denominada “curva de descarburização”, a qual orienta o operador quanto ao momento correto de realizar esta tarefa, minimizando também a oxidação do cromo.

A Figura 6 mostra uma brusca queda da descarburização e a Figura 7 uma queda suavizada, sendo que quedas controladas representam uma menor oxidação de cromo e conseqüentemente, menor consumo de ferro silício.



**Figura 6.** Curva de descaburação sem controle das adições.



**Figura 7.** Curva de descaburação com controle do momento das adições

O modelo além destes cálculos também gera outras informações que auxiliam o operador nas tomadas de decisões. Entre as principais destacam-se:

1) O Índice de basicidade da escória: À medida que ocorre a oxidação dos metálicos e as adições de ferro-ligas e fundentes o modelo calcula o índice de basicidade da escória que é que a quantidade de CaO, MgO e SiO<sub>2</sub> presentes na escória. Quando escórias apresentam quantidades deficientes de CaO e MgO (basicidade baixa) ocorre interação com o refratário, desgastando-os. Por isso o controle deste índice é importante para minimizar o desgaste refratário, além de maximizar a performance de descaburação.

2) A temperatura do banho: É uma informação que permite o operador agir de maneira preventiva, a fim de evitar sobrecarga térmica nos tijolos refratários bem como sopro excessivo devido temperaturas baixas do banho metálico.

### 3 RESULTADOS

A Figura 8 apresenta a evolução do índice de produtividade do processo duplex no AOD-L antes e após a instalação do sistema Carbometria em setembro de 2005. Destaca-se o aumento do índice de produtividade, passando de 61,3 ton/h em 2005 para 65,1 ton/h em 2007 devido, principalmente, a redução do tempo de processamento dos aços.



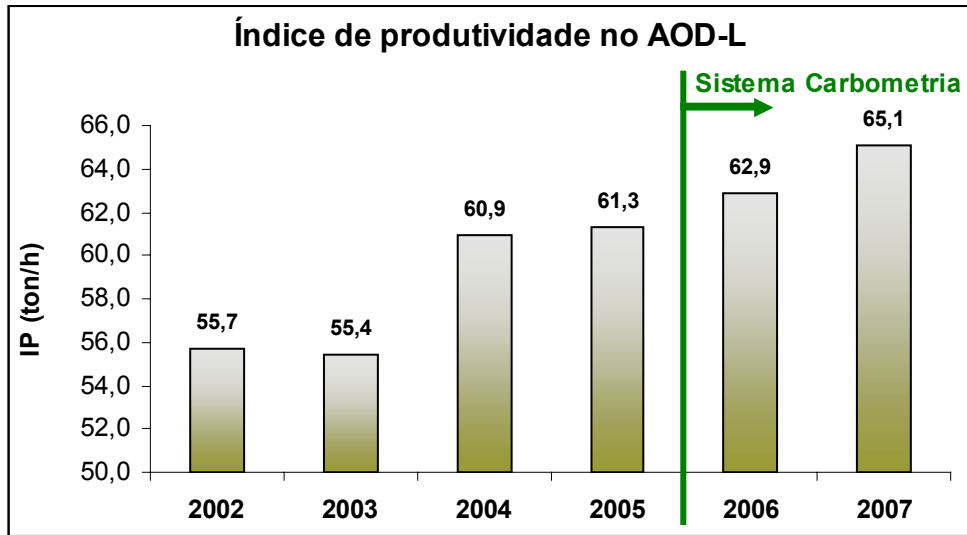


Figura 8. Evolução do índice de produtividade do AOD-L

A redução do tempo de processamento dos aços inoxidáveis, conforme mostram as Figuras 9 e 10, foram possíveis devido à eliminação de amostras intermediárias, passando de 73,2 min para 69,5 min nos aços baixo carbono (AISI 304) e de 92,8 min para 88,9 min para os aços ultra baixo carbono (AISI 304L).

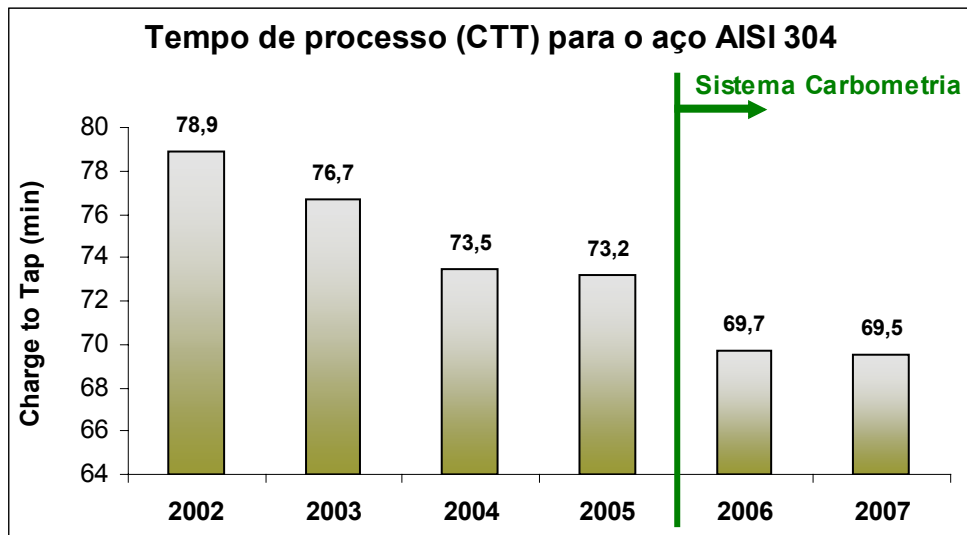


Figura 9. Evolução do tempo de processo nos aços inoxidáveis AISI 304.

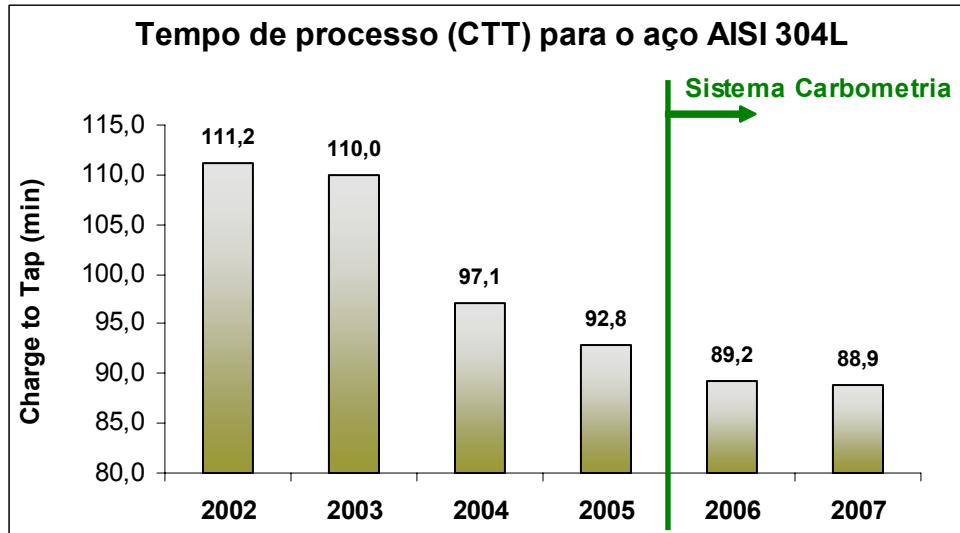


Figura 10. Evolução do tempo de processo nos aços inoxidáveis AISI 304L

Outro ponto importante é a redução de corridas reprocessadas por carbono fora da faixa, passando de 1,43% para 1,11% em 2007, conforme mostra a Figura 11. Isto foi possível devido a maior precisão do teor de carbono final do aço, evitando assim, o vazamento de corridas com teor de carbono acima do especificado.

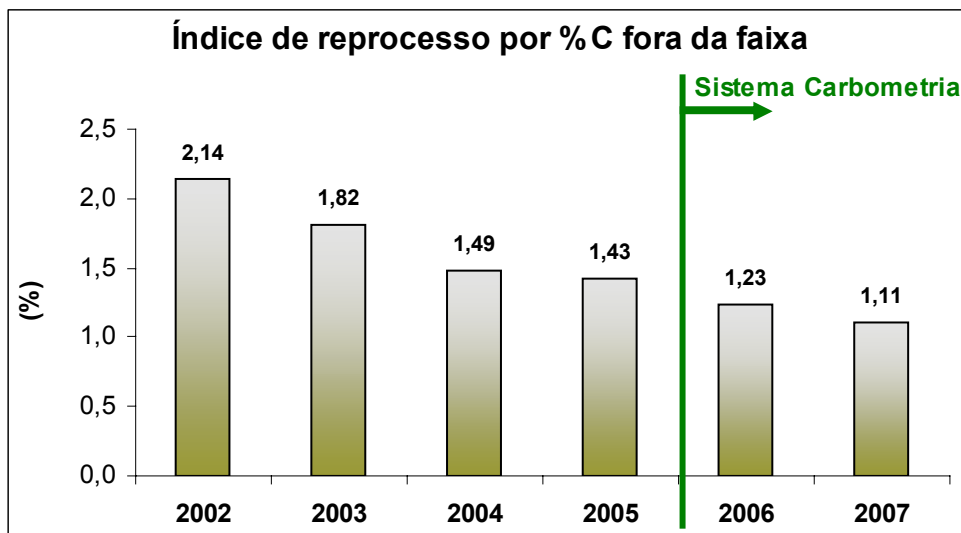
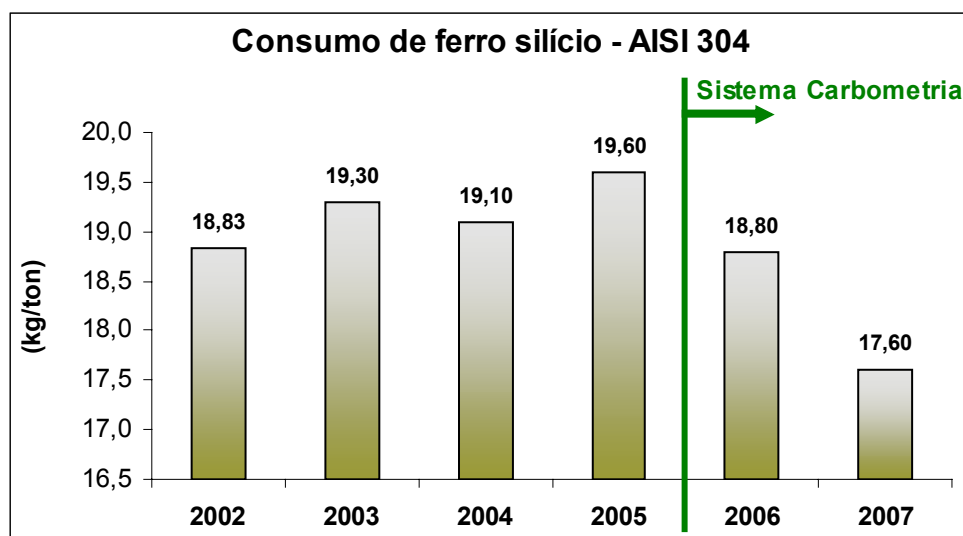


Figura 11. Redução do reprocesso para queima de carbono no AOD-L

Outro benefício advindo foi a redução do custo de fabricação dos aços, decorrente da redução de consumo de ferro silício que apresentou em 2007 o melhor resultado desde o início da operação do convertidor em 2002, conforme mostra a Figura 12.



**Figura 12.** Consumo de Ferro silício gasto na redução dos aços AISI 304.

#### 4 CONCLUSÃO

A implantação da carbometria aprimorou as condições de controle operacional no convertedor AOD-L, aumentando a flexibilidade do fluxo produtivo e proporcionando melhor desempenho global da Aciaria.

Obteve-se aumento consistente da produtividade do convertedor AOD-L bem como redução significativa no custo de fabricação dos aços inoxidáveis.

#### Agradecimentos

Nossos agradecimentos aos colaboradores Jean Baptiste Marquet, Philippe Troboe e Jean Claude Roux, representantes da equipe da Arcelor System, Jean Claude Grisvard, representante da Arcelor Resarch, e a equipe operacional do convertedor AOD-L pelas contribuições em prol deste trabalho.

#### BIBLIOGRAFIA

- 1 GRISVARD, Claude. AOD CARBOMETRY USER MANUAL version v1.0, 2005.
- 2 PALAU, Christine. *Intégration du module Carbométrie dans TopAOD version 0.3.*
- 3 FRUEHAN, R. *The Making, Shaping and Treating the Steel 13<sup>rd</sup> edition.* AISE Steel Foundation, 1998, pg. 248-258.
- 4 FRUEHAN, R. J.; *Nitrogenation and Decarburization of Stainless Steel.* Metallurgical Transactions. 1975, V.6B, pg. 573-577.
- 5 PRETORIUS, E. B., NUNNINGTON, R. C.; *Stainless steel slag fundamentals: from furnace to tundish;* Ironmaking and Steelmaking, 2002, V. 29, N° 2, pg. 133-139.
- 6 URGINE&ALZ. Usine de l'ardoise. *Informatisation modèle CARBOMETRIE A.O.D.*
- 7 VAI – INGDESI Automation. *Interface Nível 1 com sistema de análise de gás*