



# MELHORIA DA LINGOTABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO AISI 409 NA ARCELORMITTAL INOX BRASIL<sup>1</sup>

*Joilson Moreira Ferreira da Silva<sup>2</sup>  
Roberto Parreiras Tavares<sup>5</sup>  
Daniel Luiz Coimbra<sup>2</sup>  
Helio José Batista Alves<sup>4</sup>  
Valdeci Paula Alvarenga<sup>3</sup>*

## Resumo

O aço inoxidável ferrítico P409A tem apresentado grande versatilidade de aplicações no setor automotivo em função das suas excelentes propriedades de resistência à corrosão, soldagem e estampagem. Para melhorar o desempenho do P409A, a ArcelorMittal Inox Brasil tem implementado melhorias ao longo de todo o processo de produção. Neste trabalho são apresentadas soluções relativas à Aciaria, onde o aumento da relação Si/Ti foi um fator importante para evitar a ocorrência de obstrução da válvula submersa no lingotamento contínuo e para minimizar o defeito esfoliação nas bobinas laminadas a frio.

**Palavras-chave:** Aço inoxidável; Titânio; Obstrução; Lingotamento contínuo.

## CASTABILITY IMPROVEMENT OF FERRITIC STAINLESS STEEL AISI 409 IN THE ARCELORMITTAL INOX BRAZIL

## Abstract

Ferritic stainless steel P409A presents great variety of applications in the sector automotive in function of their excellent properties corrosion resistance, welding and stamping. To improve P409A's performance, the ArcelorMittal Inox Brazil has implemented some actions in all production process. In this work, solutions in the Steelmaking are presented. Increase Si/Ti relationship had been important to prevent the occurrence of clogging in the nozzle in the continuous casting and minimize the skin lamination defect in the cold rolled coils.

**Key words:** Stainless steel; Titanium; Clogging; Continuous casting.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 41º Seminário de Aciaria – Internacional, 23 a 26 de maio de 2010, Resende, RJ, Brasil.*

<sup>2</sup> *Engenheiro Metalurgista Aciaria Aços Inoxidáveis – ArcelorMittal Timóteo.*

<sup>3</sup> *Analista Técnico Aciaria Aços Inoxidáveis – ArcelorMittal Timóteo.*

<sup>4</sup> *Pesquisador – ArcelorMittal Timóteo*

<sup>5</sup> *Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Minas Gerais*



## 1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis surgiram de estudos realizados pela Krupp Stahl em 1912 na Alemanha, sendo que, até 1950 a produção mundial não passava de 1 milhão de toneladas/ano. Atualmente os aços inoxidáveis fazem parte do nosso cotidiano, chegando à marca de 27,8 milhões de toneladas/ano em 2007.<sup>(1)</sup> Desde seu advento, é consagrado pela sua beleza e resistência à corrosão.

Os aços inoxidáveis ferríticos, sem adição de níquel, são responsáveis pelo aumento da demanda mundial, devido às vantagens econômicas em relação aos austeníticos em muitas aplicações, como por exemplo, linha branca e indústria automobilística.

Na indústria automobilística, principalmente nos sistemas de exaustão de automóveis, são utilizados os aços inoxidáveis ferríticos estabilizados ao titânio e/ou nióbio, com baixos teores de carbono e nitrogênio, com elevada resistência à corrosão. O aço AISI 409, que corresponde ao aço P409A conforme normalização interna na AMIB (ArcelorMittal Inox Brasil), é o mais utilizado nos sistemas de exaustão.<sup>(2)</sup> Este aço tem sido produzido pela AMIB desde 1984.

Um dos grandes desafios dos produtores mundiais do aço AISI 409 é o processo de solidificação do mesmo, uma vez que devido à presença de titânio na sua composição química e pela afinidade deste elemento pelo nitrogênio e oxigênio, ocorre a obstrução da válvula submersa e, conseqüentemente, a interrupção do processo de lingotamento contínuo, devido a formação de nitreto e óxido de titânio.

Neste trabalho foram realizados testes na metalurgia secundária (Forno Panela), através da redução gradativa do teor de titânio e aumento do teor de silício, reduzindo assim a obstrução da válvula submersa no lingotamento contínuo da ArcelorMittal Inox Brasil e, conseqüentemente, reduzindo o esmerilhamento de placas do aço P409A. O processo de esmerilhamento das placas e o índice de desvio pelo defeito esfoliação em bobinas laminadas à frio é um indicador da qualidade da placa, ou seja, placa com uma boa qualidade apresenta baixos índices de esmerilhamento e de desvios em bobinas laminadas à frio.

## 2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral a melhoria da lingotabilidade (relacionada com variação de nível de aço no molde e com ocorrência de obstrução da válvula submersa) do aço inoxidável ferrítico P409A na ArcelorMittal Inox Brasil.

Os objetivos específicos são:

- reduzir a ocorrência de obstrução da válvula submersa;
- reduzir o esmerilhamento de placas; e
- reduzir o índice de desvio por esfoliação em bobinas laminadas à frio.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Fluxo de Produção do Aço P409A

Desde o início da produção do aço P409A na ArcelorMittal Inox Brasil, têm sido implementadas melhorias no processo de Aciaria, destacando-se o desenvolvimento do



processo triplex (AODL ou MRPL=>VOD=>FP=>LC) com ultra baixos teores de C e N e a otimização do processo de adição de Ti no forno panela.  
A Figura 1 ilustra o fluxo de produção do aço P409A.

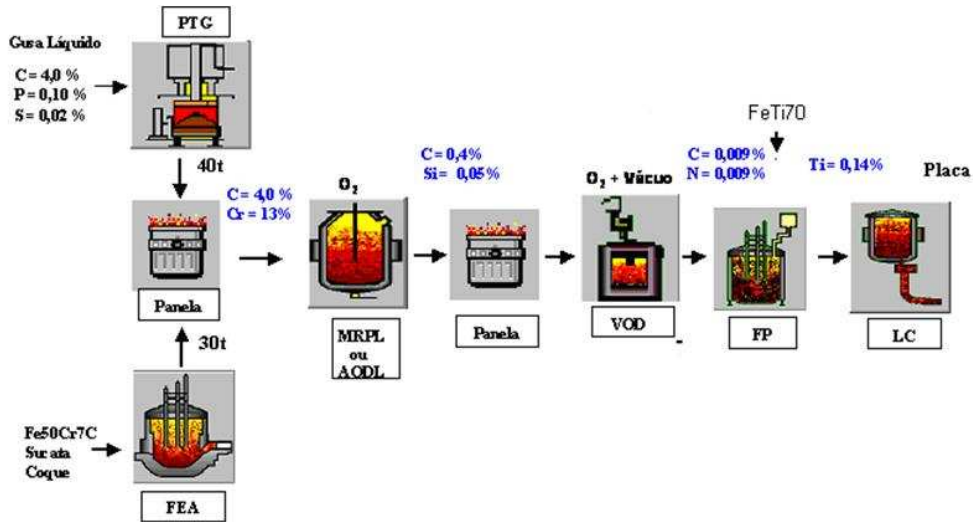


Figura 1 – Fluxo de produção do aço P409A.

### 3.2 Mecanismo de Obstrução da Válvula Submersa em Aços Inoxidáveis Estabilizados ao Titânio

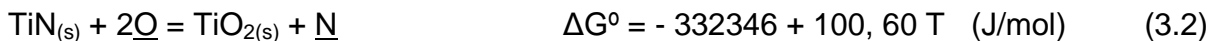
A presença do elemento titânio aumenta a tendência de obstrução de válvula submersa, através da deposição de óxidos, restringindo a passagem de aço do distribuidor para o molde, provocando a variação do nível de aço no molde, redução da velocidade de lingotamento e, em alguns casos extremos, a paralisação do lingotamento.

Os compostos encontrados nas válvulas submersas dos aços estabilizados ao titânio são, principalmente,  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $TiN$  e  $TiO_2$ , provenientes da passagem de escória do distribuidor para o molde e da reoxidação do aço.

A reação 3.1<sup>(3)</sup> mostra a formação de  $TiN$ , principal constituinte encontrado nas obstruções das válvulas submersas:



Parte dos precipitados de  $TiN$  reage com oxigênio presente no ar atmosférico ou no aço formando em  $TiO_2$ ,<sup>(4)</sup> segundo a reação abaixo:



Pela definição de  $\Delta G^0 = \Delta H^0 - T \cdot \Delta S^0$ , observa-se nas equações acima que o valor de  $\Delta H^0$  é negativo, portanto, as reações são exotérmicas. Pelo princípio de Le Chatelier, quando a reação é exotérmica, a redução de temperatura irá favorecer a formação de produtos e, conseqüentemente, a obstrução da válvula submersa ocorrerá devido à formação de  $TiO_2$ .



De acordo com GAO,<sup>(4)</sup> as medidas efetivas para reduzir a deposição de compostos na válvula submersa em aços estabilizados ao Ti são:

- reduzir o teor de nitrogênio no aço para evitar a formação de TiN, conforme reação 3.1;
- minimizar a reoxidação do aço durante o processo de lingotamento para evitar a formação de espinélio ( $Al_2O_3$  e MgO) e óxido de titânio ( $TiO_2$ ); e
- minimizar a queda de temperatura do aço no distribuidor.

O processo de obstrução da válvula submersa, além dos problemas operacionais, acarreta a perda da qualidade das placas lingotadas e, por consequência, a geração de defeitos em bobinas laminadas a quente e laminadas a frio, sendo mais comum o defeito chamado esfoliação.

### 3.3 Análise das Válvulas Submersas que Apresentaram Obstrução no Lingotamento Contínuo

A Figura 2 é um corte de uma válvula submersa que apresentou obstrução parcial durante o processo de lingotamento contínuo do aço P409A.



**Figura 2** – Válvula submersa com obstrução parcial durante o lingotamento do aço P409A.

Foram retiradas quatro amostras dos materiais impregnados nas válvulas submersas. Nestes materiais foram realizadas as análises químicas semi-quantitativas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) do Centro de Pesquisas da AMIB. Os resultados destas análises são apresentados na Tabela 1.



**Tabela 1** – Principais constituintes presentes na obstrução das válvulas submersas (porcentagem de massa)

Amostra	Elemento (% em massa)							
	Ca	Al	Si	Ti	Na	O	C	Mg
1	9,43	4,46	5,73	12,13	2,38	43,4	19,15	3,32
2	7,15	5,24	5,65	18,07	0,41	41,94	16,37	4,73
3	5,32	2,59	2,59	23,91	1,47	46,22	14,64	3,26
4	6,49	5,56	5,68	18,51	0,44	43,33	15,28	4,7

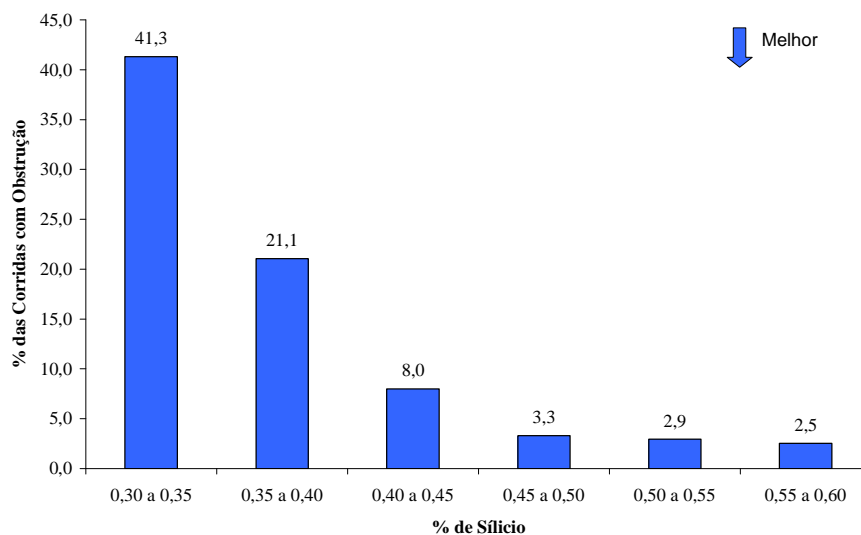
Pela Tabela 1 conclui-se que a obstrução do aço P409A está associada à presença de óxidos de titânio ( $TiO_2$ ), de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e de magnésio ( $MgO$ ). O óxido de cálcio ( $CaO$ ), a sílica ( $SiO_2$ ), o sódio ( $Na$ ) e o carbono ( $C$ ) são provenientes do pó fluxante usado durante o processo de lingotamento.

Com base nos resultados acima, verificou-se a influência dos teores de silício e titânio no processo de obstrução da válvula submersa.

### 3.4 Influência da Composição Química na Obstrução das Válvulas Submersas

#### 3.4.1 Influência do teor de Si na obstrução

A Figura 3 mostra o efeito do silício na obstrução das válvulas submersas durante o lingotamento contínuo, mostrando que quanto maior o teor de silício no aço, menor é a probabilidade da ocorrência de obstruções, uma vez que o silício é um indicador indireto do grau de oxidação do banho.



**Figura 3.** Influência do teor de silício na obstrução de válvula no lingotamento do aço P409A (período: janeiro de 2007 a maio de 2008).

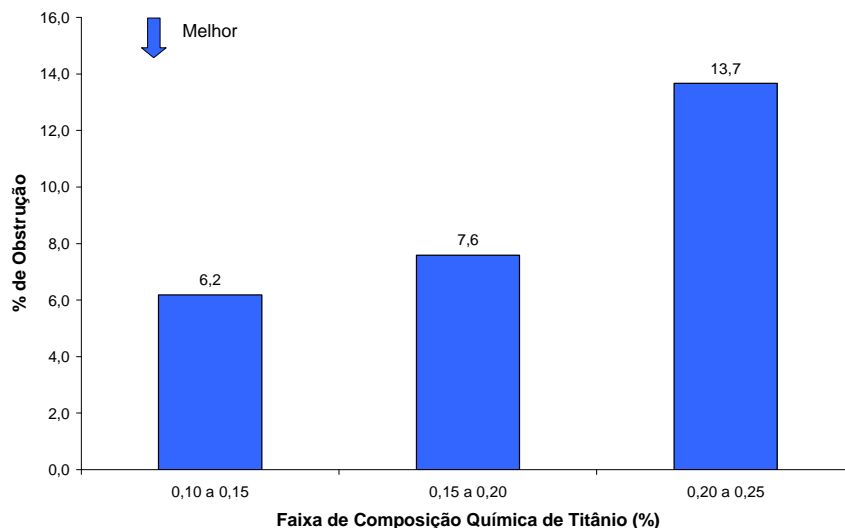
#### 3.4.2 Influência do teor de Ti na obstrução

A Figura 4 mostra o efeito do teor de titânio na obstrução das válvulas no lingotamento do aço P409A, confirmando que o aço com maiores teores de titânio apresenta uma





maior ocorrência do fenômeno de obstrução no LC. Isto se deve à grande afinidade do elemento titânio pelo oxigênio, o que acarreta a formação de  $TiO_2$ .



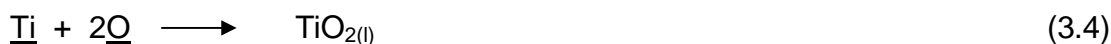
**Figura 4** – Influência do teor de titânio na obstrução de válvula no lingotamento do aço P409A (período: janeiro de 2007 a maio de 2008).

### 3.4.3 Influência da relação Si/Ti na obstrução

Como o teor de Si do aço é um indicador indireto do grau de oxidação do banho, ou seja, quanto maior o teor de Si no banho menor é o teor de oxigênio.



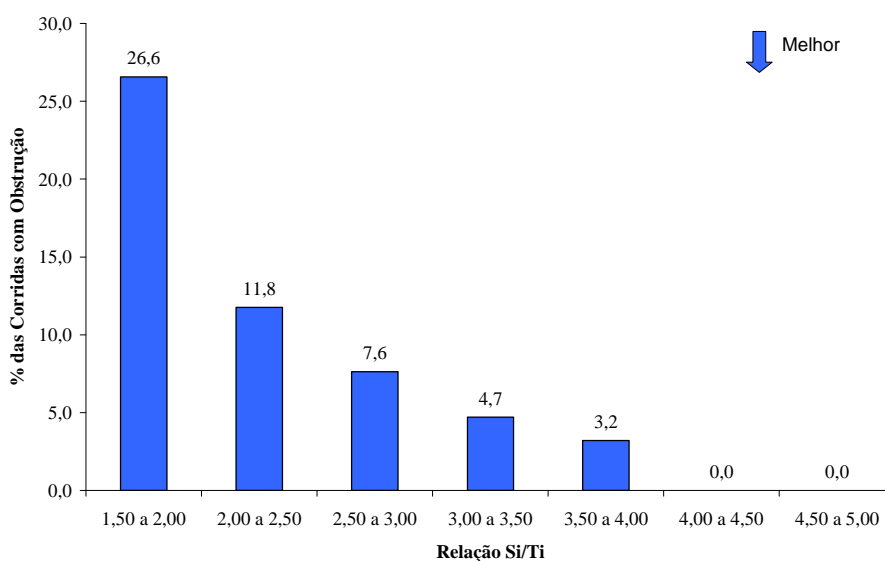
E como parte do oxigênio reagirá com o Si formando  $SiO_2$  (reação 3.4), haverá menos oxigênio disponível para reagir com o Ti, diminuindo assim a probabilidade da formação do  $TiO_2$  (reação 3.5).



A reação 3.4 é indesejada ao processo, pois além de favorecer a obstrução da válvula submersa durante o processo de lingotamento contínuo, provoca uma queda significativa do rendimento de Ti, o que causa um aumento no custo de produção do aço.

A Figura 5 comprova a teoria acima. Sendo assim, foi incorporado um novo conceito no estudo da obstrução da válvula submersa nos aços estabilizados ao Ti: a influência da relação Si/Ti.

A análise da Figura 5 mostra que valores de relação Si/Ti maiores que 3,5 conduzem a um menor índice de obstrução da válvula submersa.



**Figura 5** – Influência da relação Si/Ti na obstrução do aço P409A (período: janeiro de 2007 a maio de 2008).

Com base nas Figuras 3 a 5, foram propostas as seguintes alterações visando aumentar a relação Si/Ti:

- acerto do teor final de Ti no aço através da relação de estabilização  $Ti > 6^* (C+N)$ , garantindo a especificação mínima de Ti do aço pela norma ASTM A240/A240M -08;
- alteração da granulometria do FeTi de 10 a 50 mm para 30 a 80 mm, visando aumentar o rendimento de Ti, uma vez que a camada de escória do aço P409A na ArcelorMittal Inox Brasil é de 200 mm e parte do material adicionado fica aprisionado na escória, oxidando o titânio e, conseqüentemente, reduzindo o rendimento da liga FeTi70; e
- aumento do teor de silício no aço P409A.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Melhoria da Qualidade

Com base nos resultados apresentados, foi alterado o teor médio de silício de 0,37% para 0,47% e o teor médio de titânio de 0,18% para 0,14% no aço P409A.

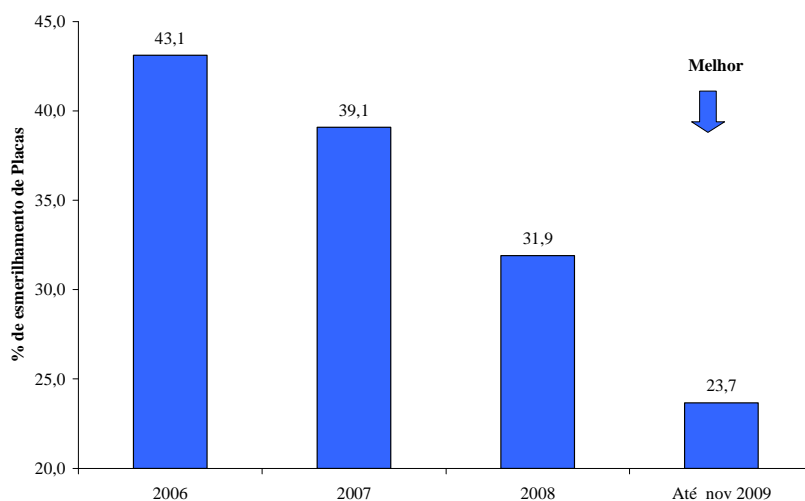
A média e o desvio padrão da relação Si/Ti de 2,89 e 0,45 (janeiro de 2007 a maio de 2008) foram alteradas para 3,44 e 0,51 (junho de 2008 a novembro de 2009) respectivamente, reduzindo o índice de obstrução das válvulas submersas. A Figura 6 é um corte de uma válvula submersa sem obstrução durante o processo de lingotamento contínuo, correspondente às corridas 901198B e 901199J do aço P409A.



**Figura 6** – Válvula submersa sem obstrução, lingotamento do aço P409A com relação de Si/Ti mais elevada.

A obstrução da válvula submersa afeta o índice de esmerilhamento: quanto menor a obstrução, menor o índice de esmerilhamento das placas, pois se o material apresentar obstrução e não for esmerilhado ocorrerá o defeito esfoliação no produto laminado a frio e como consequência, o sucateamento do mesmo.

A Figura 7 apresenta a evolução anual no índice de esmerilhamento de placas após o aumento da relação Si/Ti no aço P409A, saindo de 43,1% em 2006 para 23,7% em 2009.



**Figura 7** – Evolução do esmerilhamento de placas no aço P409A.

A Figura 8 mostra a evolução na qualidade do produto laminado a frio em relação ao índice de desvio por esfoliação (A35).



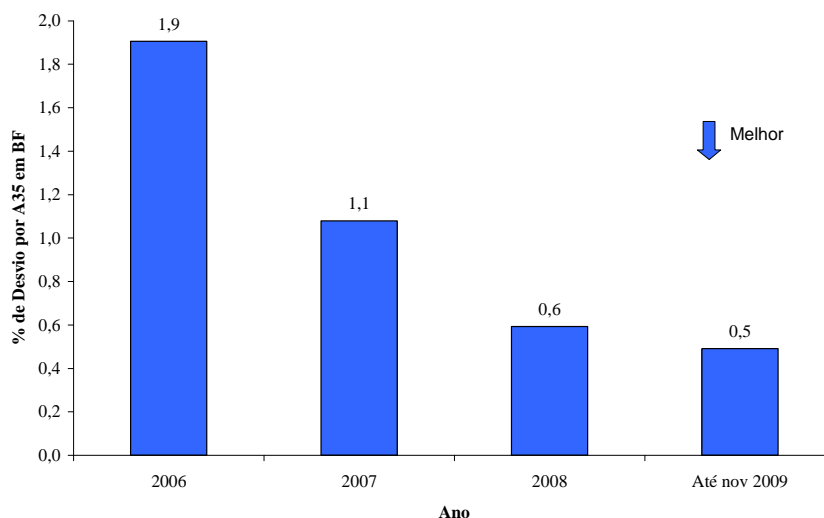


Figura 8 – Índice de desvio por A35 em BF do aço P409A

A alteração da granulometria da liga FeTi70 de 10 mm a 50 mm para 30 mm a 80 mm, juntamente com a alteração da relação Si/Ti, possibilitou um aumento no rendimento do Ti em placa das corridas do aço P409A de 51% em 2006 para 61,2 % em 2009, mostrado na Figura 9.

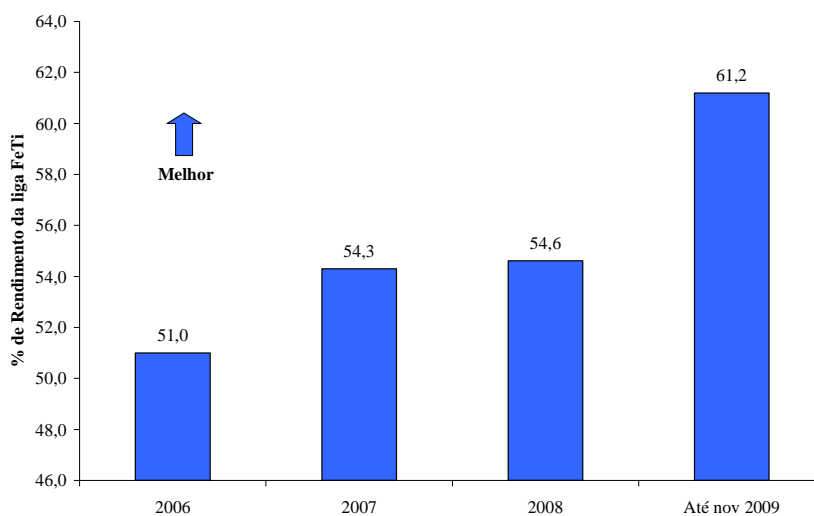


Figura 9 – Evolução do rendimento em placa da liga FeTi70 no aço P409A.

A Tabela 2 apresenta os resultados médios e os respectivos desvios padrão de propriedades mecânicas das corridas produzidas nos períodos de janeiro 2007 a maio de 2008 (antes das alterações de composição química do aço) e junho de 2008 a abril de 2009 (após as alterações de composição química do aço).



**Tabela 2** – Propriedades mecânicas média do aço P409A

Período	Numero de amostras analisadas	Limite de Escoamento 0,2 % (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento Total (%)	Dureza (HRb)
Jan 07 a maio 08	482	243,50 + 11,80	402,93 + 10,36	39,61 + 1,96	64,83 + 1,45
Junho 08 a Nov 09	374	251,14 + 20,30	407,17+ 13,28	38,94 + 1,89	65,86 + 2,14

Pela análise da tabela acima, constata-se que não ocorreram alterações significativas nas propriedades mecânicas do aço P409A com a alteração na sua composição química.

## 5 CONCLUSÃO

Foi constatada presença de óxidos de titânio ( $TiO_2$ ), de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e de magnésio ( $MgO$ ) nas obstruções da válvula submersa.

Foi constatado que quanto maior o teor de Si final no aço e menor o teor de Ti final no aço, menor é a ocorrência de obstrução no lingotamento contínuo. Desta forma, foi determinada uma nova relação Si/Ti, na qual se constatou que valores de relação Si/Ti maiores que 3,5 reduzem drasticamente a ocorrência de obstrução nas válvulas submersas. As alterações no teor de silício e na granulometria da liga FeTi70 de 10 mm a 50 mm para 30 mm a 80 mm possibilitou um aumento no rendimento da mesma de 51% em 2006 para 61,2% em 2009.

Como consequência da melhoria da lingotabilidade do aço P409A, foi reduzido o índice de esmerilhamento de placas de 43,1% em 2006 para 23,7% em 2009 e reduzido o índice de desvios por esfoliação em bobinas laminadas à frio de 1,9% em 2006 para 0,5% em 2009.

## Agradecimentos

Agradecemos as equipes da Aciaria, Centro de Pesquisa, Metalurgia de Inox e da UFMG que contribuíram para a realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 INTERNATIONAL STAINLESS STEEL FORUM. Disponível em: <http://www.worldstainless.org/Statistics/Crude/2007.html> (Página da Internet, acessada em 08/2008).
- 2 SILVA, J.M.F., Melhoria da Lingotabilidade do Aço Inoxidável Ferrítico AISI 409 na ArcelorMittal Inox Brasil, 2009. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte.
- 3 CARVALHO, J.L.R., et. alli, Dados Termodinâmicos para Metalurgistas, Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, 1977.
- 4 GAO, Y.; SORIMACHI, K., Formation of Clogging Materials in an Immersed Nozzle during Continuous Casting of Titanium Stabilized Stainless Steel, ISIJ International, v.33, n.2, p.291-297, 1993.