

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
METALÚRGICA E DE MINAS

**Dissertação de Mestrado**  
**Metalurgia Extrativa**

**“MELHORIA DA LINGOTABILIDADE  
DO AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO AISI 409  
NA ARCELORMITTAL INOX BRASIL”**

Autor: Joilson Moreira Ferreira da Silva

Orientador: Prof. Roberto Parreiras Tavares

Co-orientadores: Eng. M.Sc. Helio José Batista Alves  
Eng. M.Sc. Daniel Luiz Coimbra

Belo Horizonte, Novembro de 2009

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas**

**Joilson Moreira Ferreira da Silva**

**“MELHORIA DA LINGOTABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL  
FERRÍTICO AISI 409 NA ARCELORMITTAL INOX BRASIL”**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, da Universidade Federal de Minas Gerais, em novembro de 2009.

**Área de concentração: Metalurgia Extrativa**  
**Orientador: Prof. Roberto Parreiras Tavares**  
**Co-orientadores: Eng. M. Sc. Helio José Batista Alves**  
**Eng. M. Sc. Daniel Luiz Coimbra**

**Belo Horizonte - Minas Gerais**  
**Escola de Engenharia da UFMG**

**2009**

**Aos meus pais: José Ferreira e Sônia Maria.**

**Aos meus irmãos: Eduardo, Jesusmar,  
Joiceany, Ilcilainy e Josie Mara.**

**E em especial à minha noiva Kátia.**

## AGRADECIMENTOS

Desejo manifestar aqui meus agradecimentos, aos que de alguma ou outra forma contribuíram na realização deste trabalho.

Aos professores Roberto Parreiras Tavares, orientador, e Luiz Fernando Andrade de Castro, aos Engenheiros Helio José Batista Alves e Daniel Luiz Coimbra, co-orientadores, ao Engenheiro Pedro José Nolasco Sobrinho, pelo apoio incondicional, paciência, dedicação e facilidades oferecidas durante curso e no desenvolvimento deste trabalho.

A ARCELORMITTAL INOX BRASIL S.A., nas pessoas dos gerentes Ronaldo Claret Ribeiro da Silva, Alexandre Tadeu Lopes Serrano, Marco Antônio Nunes de Carvalho, pela aprovação do mestrado e pelo constante apoio. Aos colegas das áreas de formação e treinamento, metalurgia, centro de pesquisas, laboratórios, controle de processo da aciaria, e em especial, aos profissionais Valdeci de Paula Alvarenga, Francisco Manoel Perez do Nascimento, João Geraldo Alves, Geovane Martins Castro, Décio Sartori Felix Filho, Adão Adécio Campos e Marli Jerônimo da Silva, pela prestação de contas, transporte, amostragem, realização de ensaios, discussões, sugestões, orientações, soluções de problemas, entre outros, que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Aos professores do DEMET que me acompanharam durante o curso, aos colegas e funcionários do DEMET pelo desenvolvimento de trabalhos, sugestões, artigos, troca de informações e documentação.

Aos meus pais José Ferreira e Sônia Maria, e irmãos Eduardo, Jesusmar, Joisceany, Ilcilainy e Josie Mara, pelo acolhimento, apoio e compreensão. À minha noiva Kátia, pela compreensão, apoio, carinho e discussões de idéias.

Finalmente a Deus por ter me proporcionado esta oportunidade.

## SUMÁRIO

|   | Página |
|---|--------|
| AGRADECIMENTOS.....   | iv     |
| SUMÁRIO .....   | v      |
| LISTA DE FIGURAS.....   | vii    |
| LISTA DE TABELAS .....  | x      |
| LISTA DE NOTAÇÕES.....  | xi     |
| RESUMO .....  | xii    |
| ABSTRACT.....   | xiii   |
| 1 INTRODUÇÃO .....  | 1      |
| 2 OBJETIVOS .....   | 2      |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....                                    | 3      |
| 3.1 AÇOS INOXIDÁVEIS .....                                      | 3      |
| 3.1.1 Aços Inoxidáveis Austeníticos .....                       | 4      |
| 3.1.2 Aços Inoxidáveis Martensíticos.....                       | 5      |
| 3.1.3 Aços Inoxidáveis Ferríticos.....                          | 5      |
| 3.1.3.1 Estampagem do aço inoxidável ferrítico .....            | 7      |
| 3.1.3.2 Aço inoxidável ferrítico AISI 409.....                  | 9      |
| 3.2 FLUXO DE PRODUÇÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS NA AMIB.....         | 10     |
| 3.3 FORNO PANELA.....   | 12     |
| 3.4 PROCESSO DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO.....                      | 14     |
| 3.5 INCLUSÕES .....   | 19     |
| 3.5.1 Composição química das inclusões .....                    | 19     |
| 3.5.2 Origem das inclusões não metálicas.....                   | 20     |
| 3.5.3 Plasticidade das inclusões.....                           | 20     |
| 3.5.4 Tamanho das Inclusões.....                                | 20     |
| 3.6 DESOXIDAÇÃO .....   | 22     |
| 3.7 OBSTRUÇÃO DA VÁLVULA SUBMERSA NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO..... | 24     |
| 3.7.1 Obstrução da válvula submersa por efeito térmico.....     | 25     |
| 3.7.2 Obstrução da válvula submersa por efeito químico.....     | 26     |

|   |    |
|---|----|
| 3.7.3 Mecanismo de obstrução da válvula submersa em aços inoxidáveis estabilizados ao titânio.....                          | 28 |
| 3.8 ESFOLIAÇÃO NO AÇO AISI 409 .....  | 30 |
| 4 METODOLOGIA.....  | 32 |
| 4.1 ANÁLISE DA VÁLVULA SUBMERSA E DO DEFEITO ESFOLIAÇÃO EM BF .....   | 32 |
| 4.2 CORRELAÇÕES ENTRE COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO P409A E OBSTRUÇÃO NO LC E ÍNDICE DE DESVIO POR ESFOLIAÇÃO EM BF .....       | 34 |
| 4.3 REALIZAÇÃO DAS CORRIDAS EXPERIMENTAIS DO AÇO P409A .....  | 34 |
| 4.3 TESTES LABORATORIAIS .....  | 36 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....  | 39 |
| 5.1 ANALISE DAS VÁLVULAS SUBMERSAS E DO DEFEITO ESFOLIAÇÃO EM BOBINAS LAMINADAS A FRIO.....                                 | 39 |
| 5.2 INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA NA OBSTRUÇÃO DAS VÁLVULAS SUBMERSAS E NA ESFOLIAÇÃO EM PRODUTOS LAMINADOS A FRIO ..... | 42 |
| 5.3 RESULTADOS LABORATORIAIS .....  | 52 |
| 6 CONCLUSÕES .....  | 59 |
| 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....   | 60 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....  | 61 |
| BIBLIOGRAFIA .....  | 64 |
| APÊNDICE .....  | 66 |

## LISTA DE FIGURAS

|  | Página |
|--|--------|
| Figura 3.1: Formação da camada passiva dos aços inoxidáveis .....  | 3      |
| Figura 3.2: Tipos de aços inoxidáveis e suas aplicações. ....  | 4      |
| Figura 3.3: Diagrama Fe-Cr com destaque para o domínio dos aços inoxidáveis ferríticos .....                                 | 6      |
| Figura 3.4: Diagrama de Kaltenhauser.....  | 7      |
| Figura 3.5: Sistema de exaustão de um veículo automotivo com seus principais constituintes.....                              | 10     |
| Figura 3.6: Fluxo de produção do aço inoxidável na ArcelorMittal Inox Brasil.....  | 11     |
| Figura 3.7: Fluxo de produção do aço inoxidável na aciaria da ArcelorMittal Inox Brasil.....                                 | 11     |
| Figura 3.8: Representação esquemática de um Forno Panela .....   | 13     |
| Figura 3.9: Vista esquemática do processo de lingotamento contínuo.....  | 15     |
| Figura 3.10: Desenho esquemático de uma válvula submersa .....   | 16     |
| Figura 3.11: Desenho esquemático de um molde de lingotamento contínuo de placa ...   | 17     |
| Figura 3.12: Visão esquemática das principais regiões do distribuidor e do molde, com destaque para a válvula submersa ..... | 18     |
| Figura 3.13: Exemplos das características de inclusões após o lingotamento e após a laminação.....                           | 21     |
| Figura 3.14: Esquema de diferentes tipos de obstruções de válvulas submersas .....   | 25     |
| Figura 3.15: Morfologia do TiN encontrado na obstrução da válvula submersa no lingotamento contínuo do aço AISI 409 .....    | 29     |
| Figura 3.16: Partícula de espinélio presente na superfície do cubo de TiN .....  | 30     |
| Figura 3.17: Defeito esfoliação em BF no aço P409A .....   | 31     |
| Figura 4.1: Carta gráfica do processo de lingotamento contínuo do aço P409A na Arcelor Mittal Inox Brasil .....              | 33     |
| Figura 4.2: Válvula submersa do processo de lingotamento contínuo, com destaque para a obstrução parcial .....               | 33     |
| Figura 4.3: Diagrama de fase para a liga FeTi .....  | 35     |
| Figura 4.4: Ilustração da amostra retirada para testes laboratoriais .....   | 36     |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.5: Dimensões do corpo de prova para teste de tração no Centro de Pesquisas da ArcelorMittal Inox Brasil .....                         | 37 |
| Figura 5.1: Válvula submersa com obstrução parcial durante o lingotamento do aço P409A .....   | 39 |
| Figura 5.2: Área analisada da inclusão encontrada na válvula submersa do aço P409A .....   | 41 |
| Figura 5.3: Área analisada do defeito esfoliação em bobinas laminadas a frio do aço P409A .....  | 41 |
| Figura 5.4: Influência do teor de silício na obstrução de válvula no lingotamento do aço P409A (período: janeiro de 2007 a maio de 2008) ..... | 42 |
| Figura 5.5: Variação do índice de desvio por esfoliação em BF em função do teor de Si (período: janeiro de 2007 a maio de 2008).....           | 43 |
| Figura 5.6: Influência do teor de titânio na obstrução de válvula no lingotamento do aço P409A (período: janeiro de 2007 a maio de 2008).....  | 44 |
| Figura 5.7: Variação do índice de desvio por esfoliação em BF em função do teor de Ti (período: janeiro de 2007 a maio de 2008).....           | 44 |
| Figura 5.8: Influência da relação Si/Ti na obstrução do aço P409A (período: janeiro de 2007 a maio de 2008).....                               | 45 |
| Figura 5.9: Histograma da relação Si/Ti no período de janeiro de 2007 a maio de 2008.....  | 46 |
| Figura 5.10: Histograma da relação Si/Ti no período de junho de 2008 a abril de 2009.....  | 46 |
| Figura 5.11: Válvula submersa sem obstrução, lingotamento do aço P409A com relação de Si/Ti mais elevada.....                                  | 47 |
| Figura 5.12: Evolução da relação Si/Ti no aço P409A .....  | 48 |
| Figura 5.13: Evolução do esmerilhamento de placas no aço P409A .....   | 48 |
| Figura 5.14: Índice de desvio por A35 em BF do aço P409A .....   | 49 |
| Figura 5.15: Evolução do rendimento da liga FeTi70 no aço P409A .....  | 50 |
| Figura 5.16: Histograma da relação de estabilização Ti/(C+N) no período de janeiro de 2007 a maio de 2008 .....                                | 51 |
| Figura 5.17: Histograma da relação de estabilização Ti/(C+N) no período de junho de 2008 a abril de 2009.....                                  | 51 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 5.18: Gráfico comparativo dos resultados laboratoriais do limite de escoamento (MPa) do aço P409A .....  | 52 |
| Figura 5.19: Gráfico comparativo dos resultados laboratoriais do limite de resistência (MPa) do aço P409A ..... | 53 |
| Figura 5.20: Gráfico comparativo dos resultados laboratoriais do alongamento total (%) do aço P409A .....       | 53 |
| Figura 5.21: Gráfico comparativo dos resultados laboratoriais da dureza (HrB) do aço P409A .....                | 54 |
| Figura 5.22: Análise de micropureza da unidade metálica 901529H3000B [Ti/(C+N) entre 7,0 a 8,0] .....           | 55 |
| Figura 5.23: Análise de micropureza da unidade metálica 901528J2000B [Ti/(C+N) entre 6,0 a 7,0].....            | 55 |
| Figura 5.24: Resultado de anisotropia planar para diferentes estabilizações do aço P409A .....                  | 56 |
| Figura 5.25: Microestrutura do aço P409A para relação de estabilização menor do que 7,0 .....                   | 57 |
| Figura 5.26: Microestrutura do aço P409A para relação de estabilização maior do que 7,0 .....                   | 57 |

**LISTA DE TABELAS**

|  | Página |
|--|--------|
| Tabela III.1: Valores médios e limites máximos de emissão de poluentes para veículos leves de passageiros .....      | 9      |
| Tabela III.2: Principais reações que ocorrem na desoxidação do aço e sua respectiva $\Delta G^\circ$ .....           | 23     |
| Tabela III.3: Fatores que influenciam e medidas contra a obstrução de válvulas submersas.....                        | 27     |
| Tabela V.1: Principais constituintes em porcentagem de massa (%) presentes na obstrução das válvulas submersas ..... | 40     |
| Tabela V.2: Principais constituintes em porcentagem de massa (%) presentes no defeito esfoliação.....                | 40     |
| Tabela V.3: Propriedades mecânicas médias do aço P409A.....  | 57     |

## LISTA DE NOTAÇÕES

- AISI - American Iron and Steel Institute;
- AOD - Argon Oxygen Decarburization;
- AMIB - ArcelorMittal Inox Brasil;
- BF - Bobina laminada a frio;
- BQ - Bobina laminada a quente;
- FP - Forno Panela;
- IK - Fator de Kaltenhauser;
- LC - Lingotamento Contínuo;
- MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura;
- TS - Trimming Station;
- VOD - Vacuum Oxygen Decarburization;
- $r$  - Coeficiente de Lankford;
- $\bar{r}$  - Coeficiente de Anisotropia Normal;
- $\Delta r$  - Coeficiente de Anisotropia Planar;
- $\varepsilon_w$  - Deformação Verdadeira na Largura;
- $\varepsilon_t$  - Deformação Verdadeira na Espessura;
- $W$  – Largura Instantânea;
- $W_0$  – Largura Inicial;
- $t$  – Espessura Instantânea;
- $t_0$  – Espessura Inicial.

## RESUMO

O aço inoxidável é consagrado pela sua beleza e resistência a corrosão. O aço inoxidável ferrítico, sem adição de níquel, é responsável pelo aumento da demanda mundial, devido às vantagens econômicas em relação aos austeníticos.

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.

Um dos desafios para a produção do aço inoxidável P409A é a obstrução da válvula submersa durante o processo de lingotamento na aciaria o que acarreta na perda da qualidade das placas.

Neste trabalho, foram analisadas as válvulas que apresentaram obstrução e constatado a presença de óxidos de titânio ( $TiO_2$ ), de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e de magnésio (MgO). Após o levantamento dos óxidos presentes nas válvulas submersas, foram feitas correlações entre os teores de Ti, Si e da relação Si/Ti versus o índice de obstrução, visando obter uma faixa ótima de composição química que possibilitasse uma melhora na lingotabilidade do aço.

Foi constatado que relação Si/Ti maior do que 3,5 reduz drasticamente a ocorrência de obstrução nas válvulas submersas e, como consequência da melhoria da lingotabilidade do aço P409A, foi reduzido o índice de esmerilhamento de placas de 43,1% em 2006 para 27,9% em 2009 e reduzido o índice de desvio por esfoliação em bobinas laminadas a frio de 1,9% em 2006 para 0,5% em 2009.

Visando garantir a qualidade intrínseca do material foram analisadas a microestrutura, micropureza, anisotropia e propriedades mecânicas do aço P409A e não foram constatadas alterações nas mesmas após as modificações propostas na composição química.

## ABSTRACT

Stainless steels are known for their beauty and corrosion resistance. Ferritic stainless steels, without nickel, are responsible for the increase the consumption of stainless steels in the world, due to the economic advantage as compared to austenitic stainless steels.

In the automobile industry, more specific in the car's exhaust system, the use of ferritic stainless steels stabilized with titanium and/or niobium, with low carbon and nitrogen contents and good corrosion resistance, is very common. The AISI 409 steel, corresponding to the P409A steel in the internal ArcelorMittal Inox Brazil normalization, is the most used steel in the exhaust system.

During the casting of P409A steels, a frequent problem is the clogging of the submerged entry nozzle. This clogging affects productivity and quality of the steel.

In the present work, submerged entry nozzles presenting clogging were analyzed. Titanium ( $\text{TiO}_2$ ), aluminum ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) and magnesium oxides ( $\text{MgO}$ ) were detected in these nozzles. The effects of Ti and Si contents and of the Si/Ti ratio on the occurrence of nozzle clogging were then investigated.

It was determined that Si/Ti ratio inferior than 3.5 significantly reduced nozzle clogging and improved the castability of the P409 steel, without affecting its the microstructure, cleanliness, anisotropy and mechanical properties.

The improvement in the castability lead to a reduction in slab grinding index from 43.1 % in 2006 to 27.9 % in 2009 and also in the deviation in cold rolling due to skin lamination from 1.9% in 2006 to 0.5% in 2009.

## 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 (ISSF, 2008). 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. 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 a 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;
- Reduzir o índice de desvio por esfoliação em bobinas laminadas à frio.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são ligas à base de Fe contendo no mínimo 10,5% de Cr como principal elemento de liga para torná-lo resistente à corrosão e oxidação, em condições ambientais agressivas.

O cromo contribui para a formação de uma fina camada de filme passivo no aço, que o protege contra o ataque corrosivo. Este filme é também conhecido como Camada Passiva, sendo impermeável e insolúvel nos meios corrosivos usuais. Mesmo quando rompido, esse filme se regenera em atmosfera oxidante, e mantém a capacidade de proteção à corrosão (CARVALHO, 2000).

A figura 3.1 ilustra a formação da camada passiva nos aços inoxidáveis.

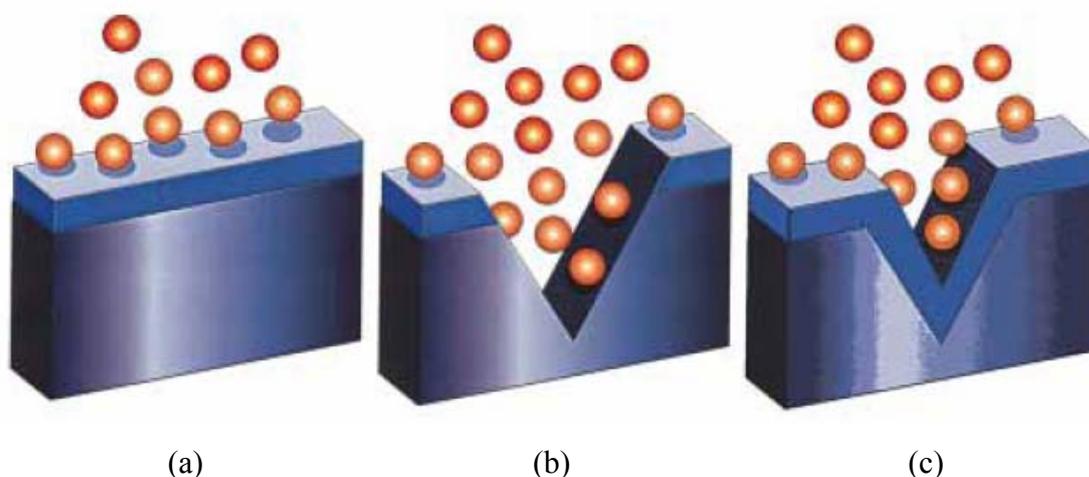
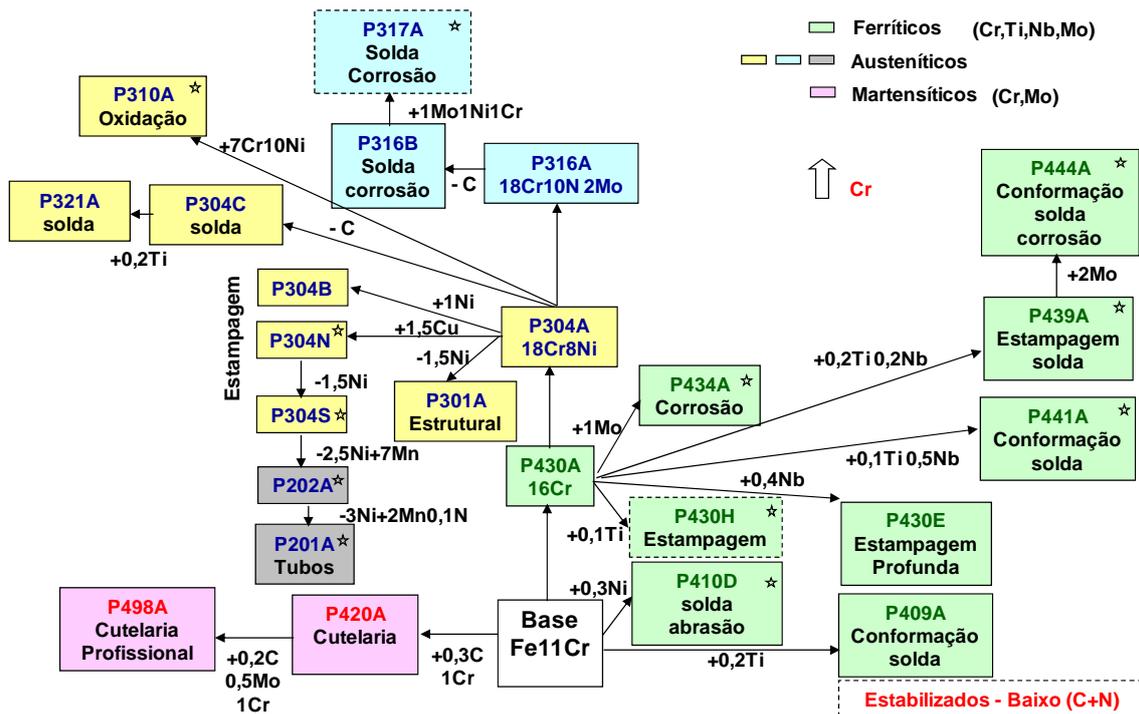


Figura 3.1: (a) Camada passiva – em azul celeste – sobre o aço inox impedindo a ação do oxidante – esferas laranjas; (b) Rompimento da Camada Passiva, leve ação do oxidante; (c) Repassivação quase que imediata. (CARVALHO, 2000)

Diversos outros elementos de liga, tais como: Ni, Mo, Mn, Cu, Ti, Si, Nb são adicionados para melhorar suas características e propriedades metalúrgicas, físicas, químicas e mecânicas, adequando-o às condições específicas de uso (CASTRO, 2005).

Dependendo da composição química e microestrutura, os aços inoxidáveis podem ser classificados em diferentes grupos, dentre os quais, podem ser mencionados os austeníticos, martensíticos e ferríticos.

Na figura 3.2 são mostrados os tipos de aços inoxidáveis e as suas principais aplicações.



☆ Aços Desenvolvidos pela ArcelorMittal Inox Brasil nos últimos 10 anos.

Figura 3.2: Tipos de Aços Inoxidáveis e suas Aplicações. (Documentos Internos da ArcelorMittal Inox Brasil, 2008).

### 3.1.1 Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços austeníticos contêm 18 a 30% de Cr para garantir a resistência à corrosão e 6 a 20% de Ni para garantir a estrutura austenítica à temperatura ambiente e melhorar a resistência à corrosão. Estes aços são identificados como série AISI 300 e apresentam elevada resistência à corrosão, excelente conformabilidade e boa soldabilidade.

Estes aços são utilizados em uma ampla gama de aplicações tais como: indústria aeronáutica, química, naval, construção civil, alimentícia, caldeiraria, fabricação de tubos, etc.

### **3.1.2 Aços Inoxidáveis Martensíticos**

Os aços martensíticos contêm 11 a 18% de Cr e  $C > 0,15\%$ . Sua principal característica é ser endurecível por tratamento térmico, pela formação de martensita quando aquecido à temperatura de austenitização e resfriado à temperatura ambiente (operação realizada no recozimento em caixa). Os aços martensíticos são geralmente utilizados em aplicações que requerem elevada dureza e razoável resistência à corrosão. Aplicações com soldagem e necessidade de elevada resistência à corrosão são fatores limitantes para utilização destes aços.

### **3.1.3 Aços Inoxidáveis Ferríticos**

Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas de ferro e cromo, com teor de cromo de 11% a 27%, e baixo conteúdo de carbono e nitrogênio (LACOMBE,2000). Geralmente possuem teor de carbono menor que 0,08% e cromo entre 13% e 18%, podendo sofrer pequenas adições de nióbio, titânio, níquel e molibdênio (CASTRO,2005).

Não são endurecíveis por têmpera, pela ausência ou pouca formação de martensita no resfriamento. Devido à ausência ou pouca adição de níquel, estes aços apresentam competitividade de custo frente aos austeníticos. Em alguns casos os aços ferríticos superam os austeníticos, como, por exemplo, na resistência à corrosão sob tensões, pois o modo de deformação na estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) é cruzado, diferente da estrutura cúbica de face centrada (CFC) que é planar, isto é, existem muitos sistemas de deslizamento atuando simultaneamente, o que impede um acúmulo de deslocamentos num determinado plano, evitando com isso concentração de tensões. Também são mais resistentes à fadiga térmica devido a seu baixo coeficiente de expansão (CASTRO, 2005).

Na condição de estabilizado pela adição de nióbio, titânio ou pela associação dos dois elementos, não há carbono e nitrogênio livre para a formação de martensita e as propriedades de resistência à corrosão, soldabilidade e formabilidade são melhoradas. Um aço está estabilizado quando todo o carbono e o nitrogênio encontram-se na forma de carbonitreto de nióbio ou titânio (CASTRO, 2005).

Uma limitação dos aços ferríticos acontece nas aplicações criogênicas, devido a temperatura de transição dúctil-frágil (LACOMBE, 2000).

Na figura 3.3, está destacado o domínio dos aços inoxidáveis ferríticos no diagrama de fase Fe-Cr.

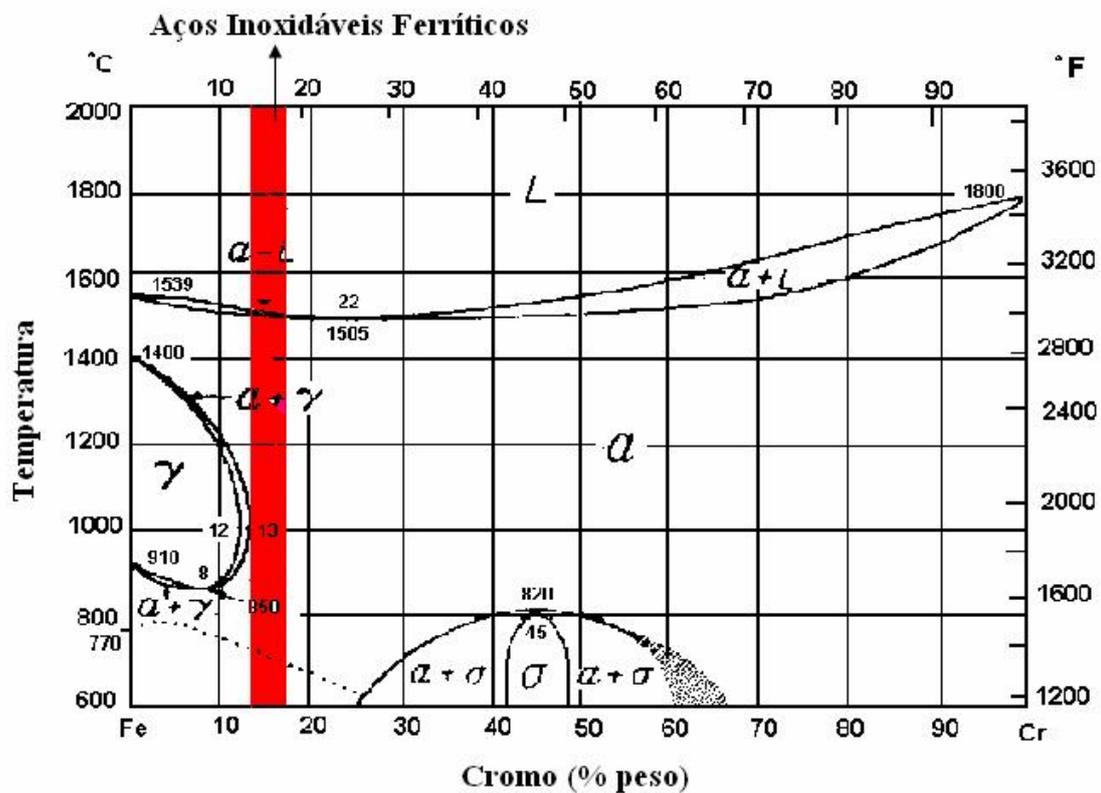


Figura 3.3: Diagrama Fe-Cr com destaque para o domínio dos aços inoxidáveis ferríticos (LACOMBE, 2000).

O diagrama de Kaltenhauser, mostrado na figura 3.4, tem a finalidade de quantificar a martensita possível de ser formada em aços ferríticos no resfriamento. Trata-se de um balanço entre os elementos alfa-gênios e gama-gênios (LACOMBE, 2000). Os números

distribuídos de 30 a 100, mostrados na figura 3.4, representam a porcentagem de ferrita presente na estrutura do material.

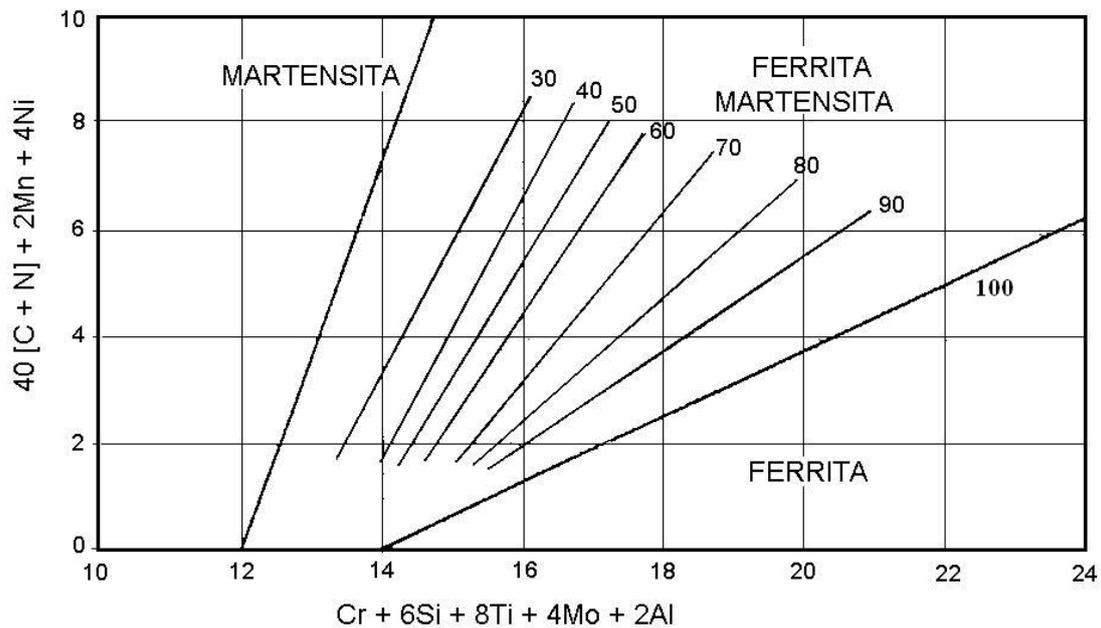


Figura 3.4: Diagrama Kaltenhauser (LACOMBE, 2000).

A equação para cálculo do fator de Kaltenhauser para o aço 409, segundo documentos internos da ArcelorMittal Inox Brasil, é dada por:

$$IK = \%Cr + 6*\%Si + 8*\%Ti + 4*\%Mo + 2*\%Al - 40*(\%C + \%N_2) - 2*Mn - 4*Ni - 2*Cu \quad (3.1)$$

O fator de Kaltenhauser acima de 13 garante uma estrutura completamente ferrítica, (CASTRO,2005; FARIA,2000).

### 3.1.3.1 Estampagem do aço inoxidável ferrítico

A estampagem implica simultaneamente em deformações de tração e compressão. A estampabilidade é melhorada reduzindo as deformações perpendiculares à espessura e portanto, aumentando as deformações na largura (KARL,1977). A relação de deformação  $r$  (Coeficiente de Lankford) é definida como a relação entre deformações na espessura e na largura, ou seja, no ensaio de tração, a deformação da amostra no sentido

da força pode ser acomodada pela redução de espessura e/ou da largura no plano da chapa (LABIAPARI, 2003):

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{W}{W_o}\right)}{\ln\left(\frac{t}{t_o}\right)} \quad (3.2)$$

Onde:  $\varepsilon_w$ ,  $\varepsilon_t$  = deformação verdadeira (na largura e na espessura respectivamente);

$W$ ,  $W_o$  = largura (instantânea e inicial, respectivamente);

$t$ ,  $t_o$  = espessura (instantânea e inicial, respectivamente).

As relações de deformação são usualmente medidas em um ensaio de tração uniaxial em corpos de provas extraídos paralelos à direção de laminação, a 45° e 90° em relação à mesma e são designados como  $r_0$ ,  $r_{45}$  e  $r_{90}$ , respectivamente. Definem-se o coeficiente de anisotropia planar  $\Delta r$  e coeficiente de anisotropia normal  $\bar{r}$  como sendo (LABIAPARI,2003):

$$\bar{r} = 0,25 \times (r_0 + 2r_{45} + r_{90}) \quad (3.3)$$

$$\Delta r = 0,5 \times (r_0 + r_{90} - 2r_{45}) \quad (3.4)$$

A anisotropia normal  $\bar{r}$  é assim chamada porque mede a resistência à deformação na espessura da chapa. A anisotropia planar  $\Delta r$  mede a variação de  $\bar{r}$  entre as direções longitudinal e transversal de laminação. Um coeficiente  $\bar{r} = 1$  indica que existe igualdade entre resistência à deformação na largura e na espessura (LABIAPARI,2003). Para  $\bar{r} > 1$ , significa que a chapa oferece maior resistência à deformação plástica na espessura (SILVA, 1990). O que se deseja para um aço de boa estampagem é que este tenha um elevado  $\bar{r}$  (alta preferência de deformar-se no plano da chapa e pouco na espessura) e um  $\Delta r$  próximo de zero (mínimo de variação planar) (VIANA,2000).

### 3.1.3.2 Aço inoxidável ferrítico AISI 409

O aço AISI 409 é um aço inoxidável ferrítico estabilizado ao Ti. O titânio é o elemento estabilizante mais comumente utilizado, formando precipitados como TiN, TiC e Ti(C+N). Geralmente estes precipitados têm uma temperatura de dissolução muito elevada, podendo chegar até a temperatura *liquidus* do aço (para o caso do TiN). Desta forma, TiN age como sítio de nucleação para solidificação heterogênea, resultando em estruturas de grãos finos (FARIA, 2006).

A indústria automobilística utiliza o aço AISI 409 em componentes do sistema de exaustão, na forma de tubos ou cápsulas de catalisadores e silenciosos, conforme mostrado na figura 3.5. A utilização deste aço nos automóveis nacionais foi motivada pelas restrições impostas à emissão de poluentes, conforme mostrado na Tabela III.1.

Nestas aplicações, a utilização de aços carbono implica na contaminação dos alvéolos do catalisador por produtos de oxidação, aumentando assim, a emissão de poluentes.

Tabela III.1 – Valores médios e limites máximos de emissão de poluentes para veículos leves de passageiros (FARIA, 2006).

| Poluentes                   | Ano   |       |      |      |       |       | Limites Máximos          |                          |
|-----------------------------|-------|-------|------|------|-------|-------|--------------------------|--------------------------|
|                             | 1980  |       | 1985 |      | 2004  |       | Ano                      |                          |
|                             | Gás.  | Álc.  | Gás. | Álc. | Gás.  | Álc.  | > 2005                   | > 2009                   |
| CO (g/km)                   | 54    | ----- | 28   | 16,9 | 0,35  | 0,82  | 2,0                      | 2,0                      |
| HC (g/km)                   | 4,7   | ----- | 2,4  | 1,6  | 0,11  | 0,17  | 0,30                     | 0,30                     |
| NOx (g/km)                  | 1,2   | ----- | 1,6  | 1,2  | 0,09  | 0,08  | 0,25/0,60 <sup>(a)</sup> | 0,12/0,25 <sup>(a)</sup> |
| CHO (g/km)                  | 0,05  | ----- | 0,05 | 0,18 | 0,004 | 0,016 | 0,03                     | 0,02                     |
| Em.(g/teste) <sup>(b)</sup> | ----- | ----- | 23   | 10   | 0,69  | ----- | 2,0                      | 2,0                      |

(a) Valores correspondentes à gasolina/diesel

(b) Emissão evaporativa de combustível

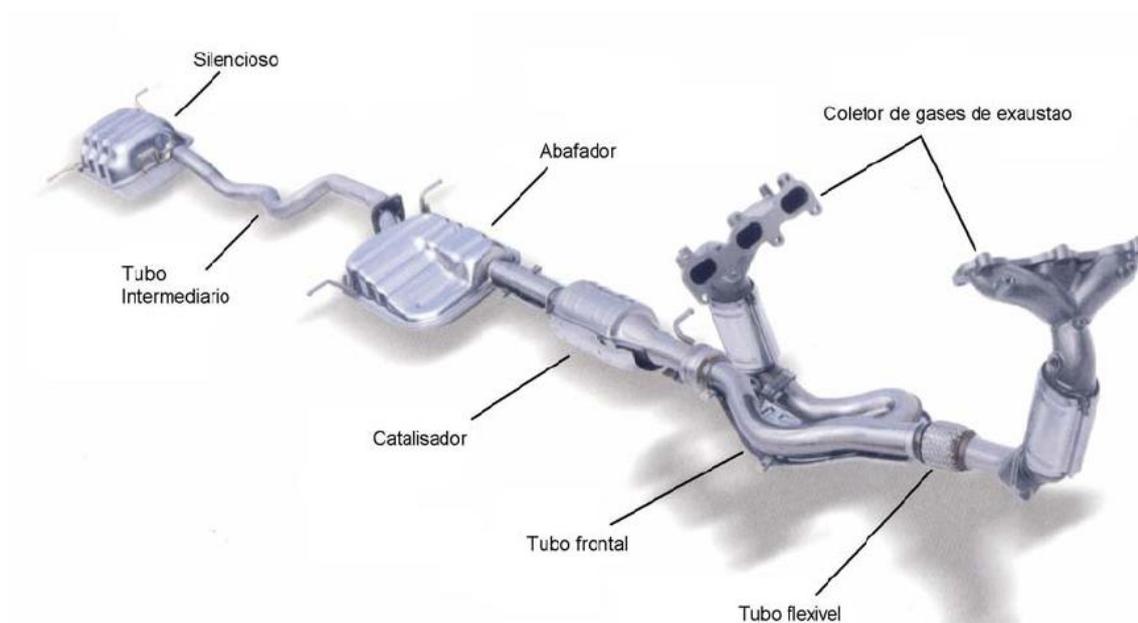


Figura 3.5: Sistema de exaustão de um veículo automotivo com os seus principais constituintes (Fonte: Documentos Internos da ArcelorMittal Inox Brasil, 2008).

### 3.2 Fluxo de Produção dos Aços Inoxidáveis na AMIB

O fluxo de produção do aço inoxidável na ArcelorMittal Inox Brasil é mostrado na figura 3.6.

Este trabalho tem o foco no processo de fabricação na aciaria, cujo produto são placas de aço inoxidável. O fluxograma detalhado da produção na aciaria é apresentado na figura 3.7.

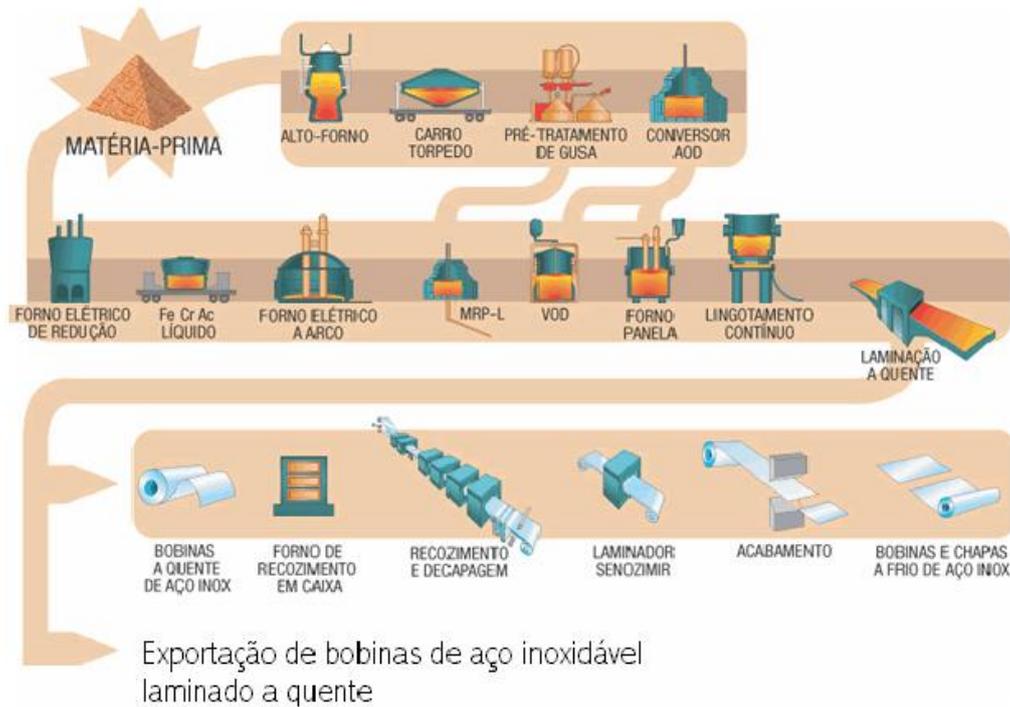


Figura 3.6: Fluxo de produção do aço inoxidável na ArcelorMittal Inox Brasil (Documentos Internos da ArcelorMittal Inox Brasil, 2008).

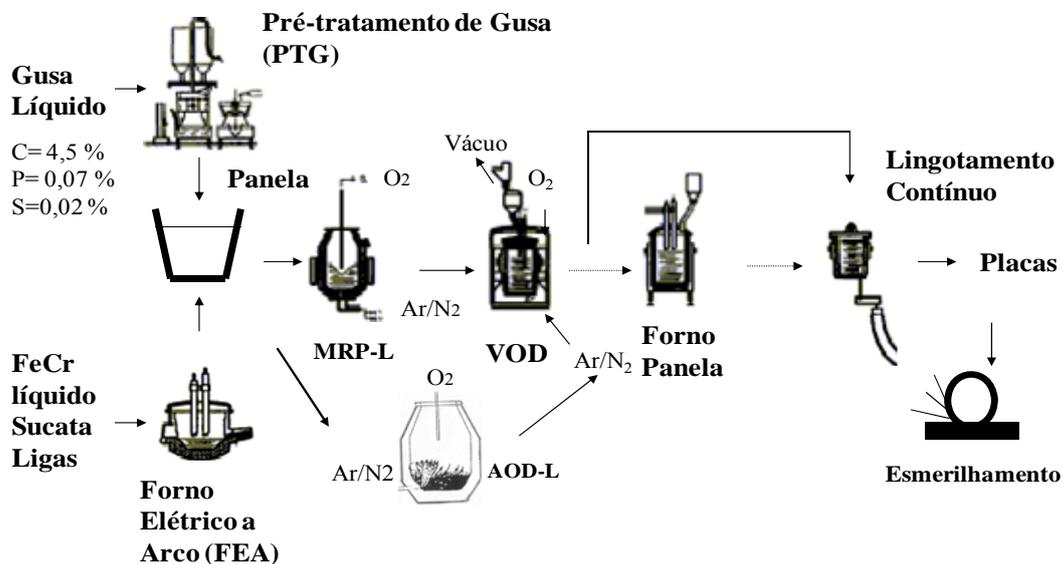


Figura 3.7: Fluxo de produção do aço inoxidável na aciaria da ArcelorMittal Inox Brasil (Documentos Internos da ArcelorMittal Inox Brasil, 2008).

De forma sucinta, as duas rotas de produção do aço inoxidável na aciaria são:

Rota Duplex: Neste tipo de processo, cabe ao Forno Elétrico apenas a função de fundir uma carga especialmente preparada, vazando um produto denominado aço inoxidável semi-elaborado (pré-metal). As etapas de descarburização, refino (redução e dessulfuração) e ajuste são realizadas em um equipamento de metalurgia secundária, mais especializado para estas funções. Dependendo do equipamento utilizado, pode-se ter os fluxos: Forno Elétrico – Convertedor (AODL) – Forno Panela ou Estação de Tratamento (TS) e Lingotamento Contínuo.

Rota Triplex: O objetivo do desenvolvimento do processo triplex foi combinar as vantagens dos processos duplex somado a um processo a vácuo. De acordo com os equipamentos utilizados, pode-se ter os seguintes fluxos: Forno Elétrico - Convertedor (AODL ou MRPL) - Processo a Vácuo (VOD) - Forno Panela e Lingotamento Contínuo. Neste caso, o Forno Elétrico continuaria com sua função de fundir a carga, com maior flexibilidade na escolha de sucatas e ferro-ligas, o Convertedor (AODL ou MRPL) faria uma primeira descarburização, trazendo o teor de carbono a valores de forma a não comprometer o rendimento de cromo e tornando mais rápido o processo no VOD. Uma vantagem do uso do processo VOD é a obtenção de ultrabaixos teores de carbono e nitrogênio nos aços inoxidáveis, principalmente nos aços estabilizados ao Ti (409, 444, 439, 441).

Caso ocorra alguma anormalidade que possa afetar a qualidade superficial da placa, a mesma é submetida a um esmerilhamento após o lingotamento contínuo.

### **3.3 Forno Panela**

Muitos dos processos de metalurgia secundária são limitados devido ao balanço térmico desfavorável. O decréscimo de temperatura nestes processos é um fator limitante à sua aplicação.

O forno panela surgiu para suprir esta deficiência, gerando uma série de vantagens sobre outros processos, e se tornando praticamente obrigatório em qualquer usina que deseje fabricar aços de boa qualidade e baixos custos. O forno panela é basicamente um pequeno forno a arco elétrico, onde a panela substitui a cuba do forno e a tampa

substitui a abóbada. Na maioria das instalações, a panela é colocada em um carro sobre trilhos, que se move por baixo dos eletrodos e da tampa (abóboda), conforme figura 3.8.

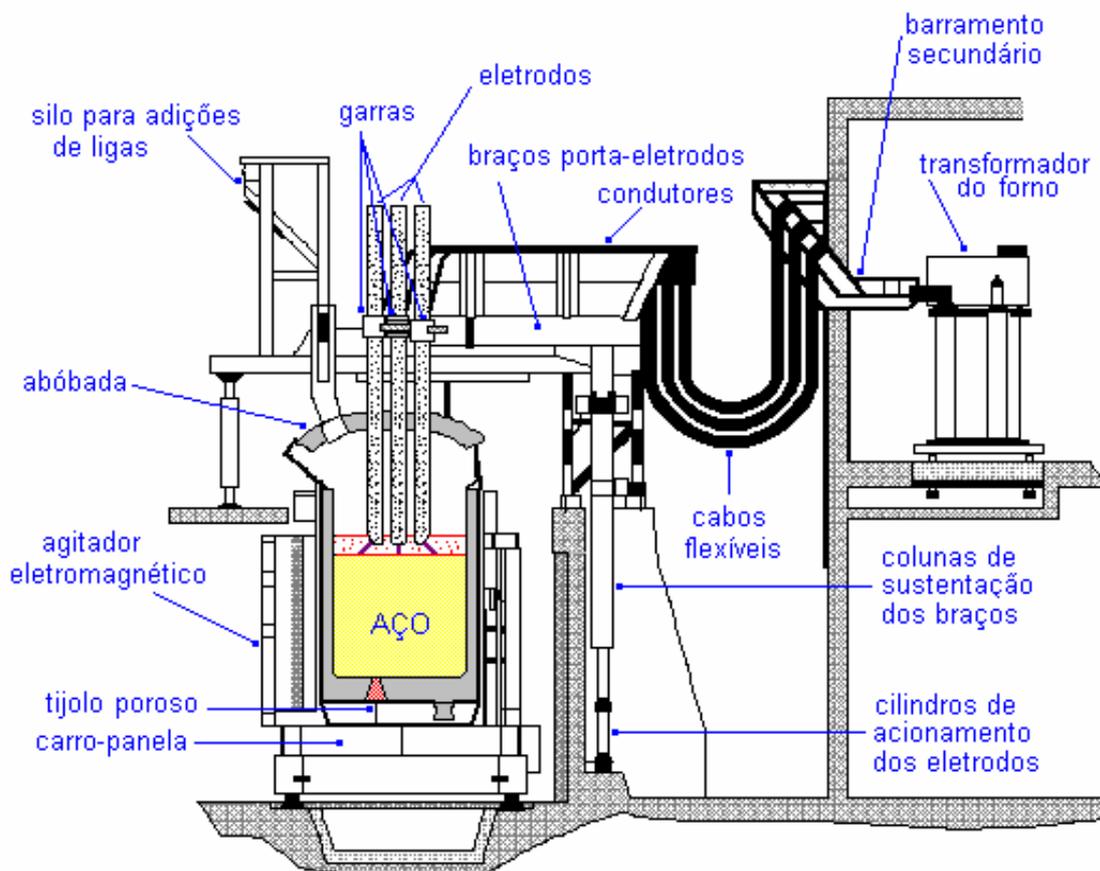


Figura 3.8 – Representação esquemática de um Forno Panela (RIBEIRO, 2002).

A agitação do banho no forno panela da ArcelorMittal Inox Brasil é feita através de um agitador eletromagnético e/ou injeção de gás inerte pelo plug poroso.

As principais finalidades do forno panela são:

- Homogeneização da temperatura e da composição química através da agitação do banho;
- Controle preciso da temperatura e composição química do aço, economizando em adições de ligas;
- Eliminação da etapa de refino, diminuindo o tempo de corrida e aumentando a produtividade do forno primário;

- Possibilidade de vazamento do aço no forno primário em temperaturas mais baixas aumentando a vida do revestimento refratário;
- Melhoria na limpeza do aço, eliminando inclusões e melhorando a qualidade;
- Garantia de corridas seqüenciais no lingotamento contínuo, aumentando a produtividade da aciaria;
- Recuperação de corridas devolvidas do lingotamento por baixa temperatura, diminuindo o índice de sucateamento de corridas;
- Viabilização da produção de novos tipos de aço, que antes não podiam ser produzidos na aciaria;
- Maior flexibilidade de operação de uma aciaria.

### **3.4 Processo de Lingotamento Contínuo**

O processo de lingotamento contínuo consiste basicamente de três sistemas metalúrgicos, a panela, o distribuidor e o molde. A figura 3.9 mostra uma vista esquemática do processo de lingotamento contínuo, incluindo os três sistemas mencionados.

Dentro do processo de lingotamento, cada sistema tem uma função específica. A panela é onde se faz a homogenização e acerto da temperatura do aço líquido, e a separação de parte das macroinclusões. O controle da temperatura é importante, pois um superaquecimento (diferença entre a temperatura de vazamento do aço e a temperatura *liquidus* do aço) elevado pode causar ruptura do veio ou uma estrutura fortemente colunar, que normalmente está associada a uma má qualidade interna (PEREIRA, 2004). Um superaquecimento muito baixo pode causar dificuldades no lingotamento, devido à obstrução das válvulas de alimentação do aço. A uniformidade da temperatura na panela é normalmente obtida através da agitação com nitrogênio ou argônio.

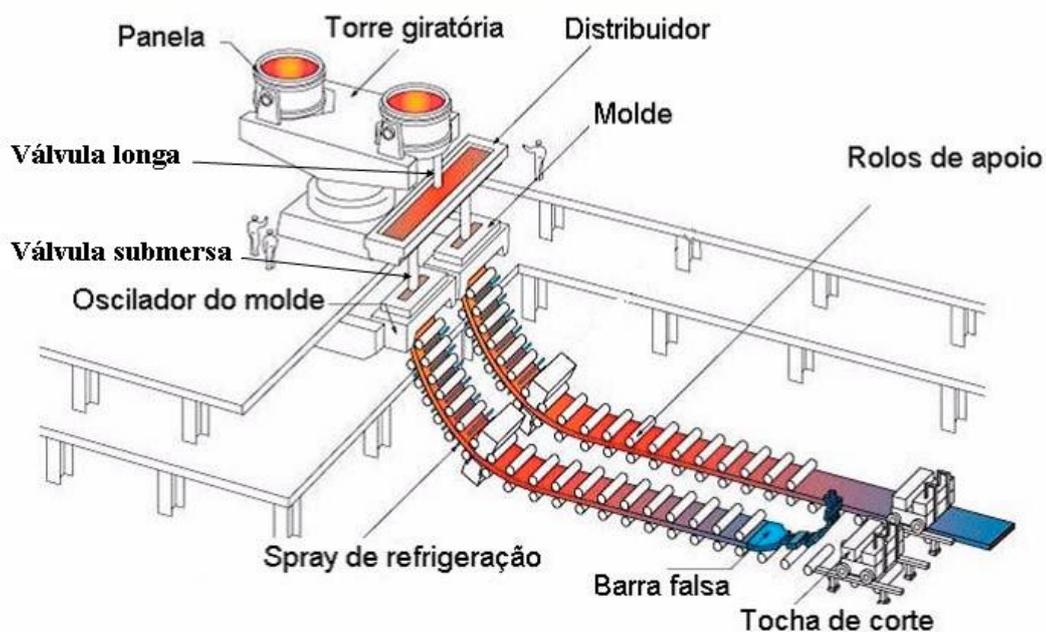


Figura 3.9 – Vista esquemática do processo de lingotamento contínuo ([http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter\\_2/2j\\_2\\_img.html](http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter_2/2j_2_img.html), 08 de outubro 2008).

O distribuidor, por sua vez, deve permitir o fornecimento de metal líquido ao molde numa vazão tanto quanto possível constante, além de propiciar a separação das inclusões. O controle da vazão que sai do distribuidor pode ser feito por um tampão ou válvula gaveta. O distribuidor deve ter ainda uma capacidade que permita a troca de panelas sem interrupção do lingotamento. Outro cuidado que se deve ter é fazer com que a queda de temperatura do aço líquido no distribuidor seja mínima. O superaquecimento no distribuidor deve ficar entre 5 e 20 °C no caso do lingotamento de placas, e entre 5 e 50 °C no caso de lingotamento de tarugos (PEREIRA, 2004).

Na transferência do metal líquido do distribuidor para o molde deve-se buscar minimizar a oxidação do metal e a incorporação de inclusões pelo material solidificado. A utilização de válvulas submersas permite que isto seja conseguido, pois não há contato do metal com o ar, e a turbulência na interface entre o metal líquido e o pó fluxante é bem menor, diminuindo a probabilidade da incorporação de material escorificado pelo metal líquido.

A figura 3.10 mostra um exemplo de válvula submersa com um ângulo de saída de 10° para cima.

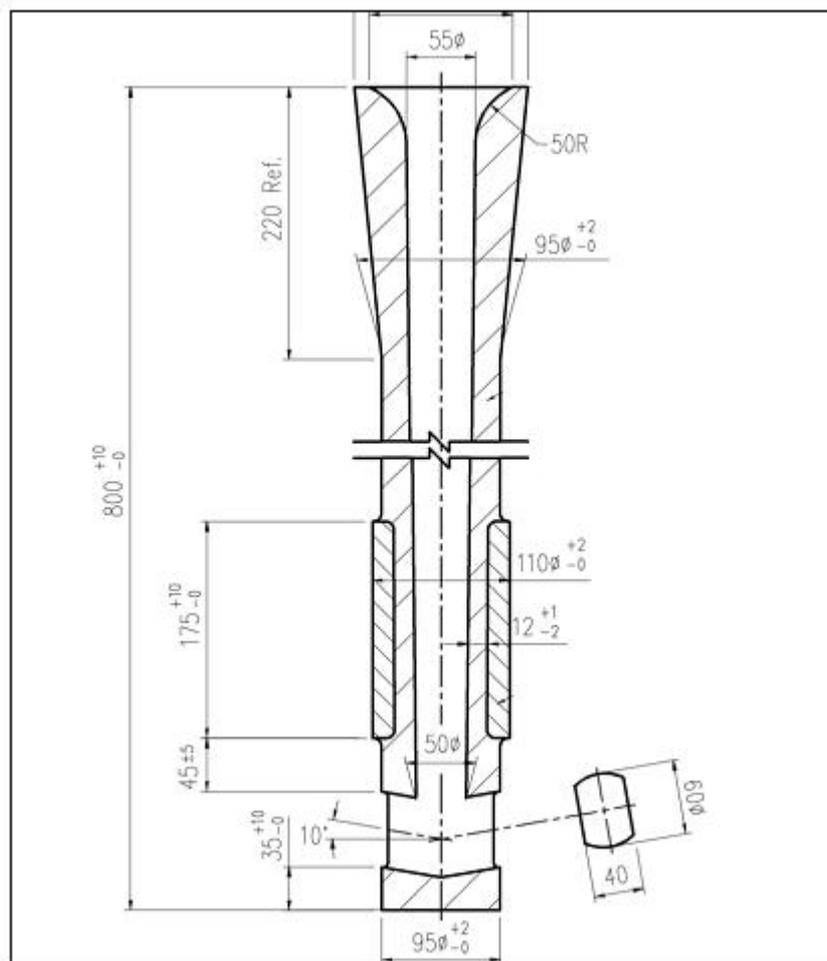


Figura 3.10 – Desenho esquemático de uma válvula submersa, com as dimensões em mm (Documentos internos da ArcelorMittal Inox Brasil, 2008).

O molde é responsável pelo início da solidificação do aço, envolvendo a formação da pele sólida. As características do molde (tipo de material e dimensões), as características do pó fluxante, a profundidade e geometria da válvula submersa, além dos parâmetros de oscilação (frequência e amplitude) e a intensidade da agitação eletromagnética são os principais parâmetros que devem ser controlados no molde.

Ao sair do molde, a placa apresenta cerca de 15 a 25mm de pele sólida, dependendo da velocidade de lingotamento, temperatura de alimentação do aço e vazão de água no molde. Essa pele solidificada é que sustenta o interior ainda líquido e permite a extração da placa. A espessura da pele solidificada vai aumentando ao longo do veio, que é

envolvido por rolos guias montados em segmentos. Entre esses rolos são colocados os conjuntos de bicos de spray (água e ar ou apenas água), que são os responsáveis por promover a extração de calor da superfície da placa, contribuindo para completar a solidificação (COSTA, 2003).

A figura 3.11 mostra um exemplo de um molde para lingotamento contínuo de placa.

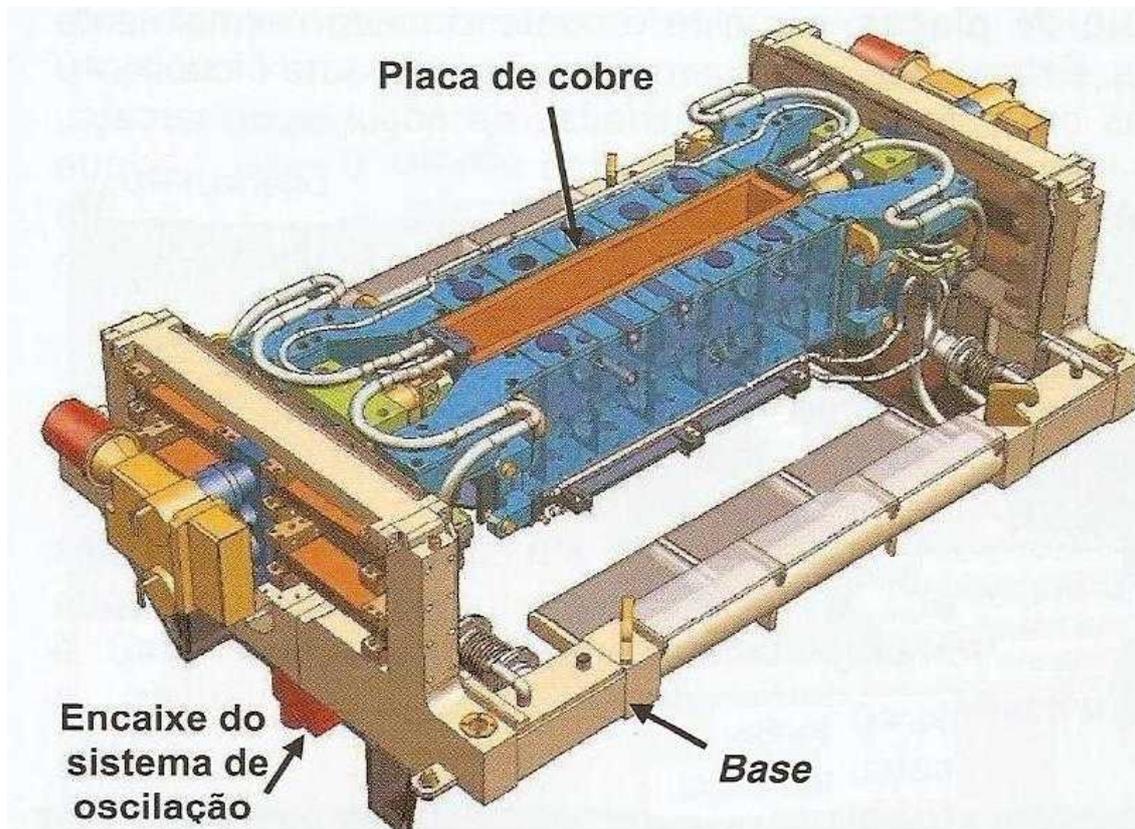


Figura 3.11 - Desenho esquemático de um molde de lingotamento contínuo de placa (ALVES,2008).

A figura 3.12 mostra esquematicamente as principais regiões do distribuidor e do molde, com destaque para a válvula submersa.

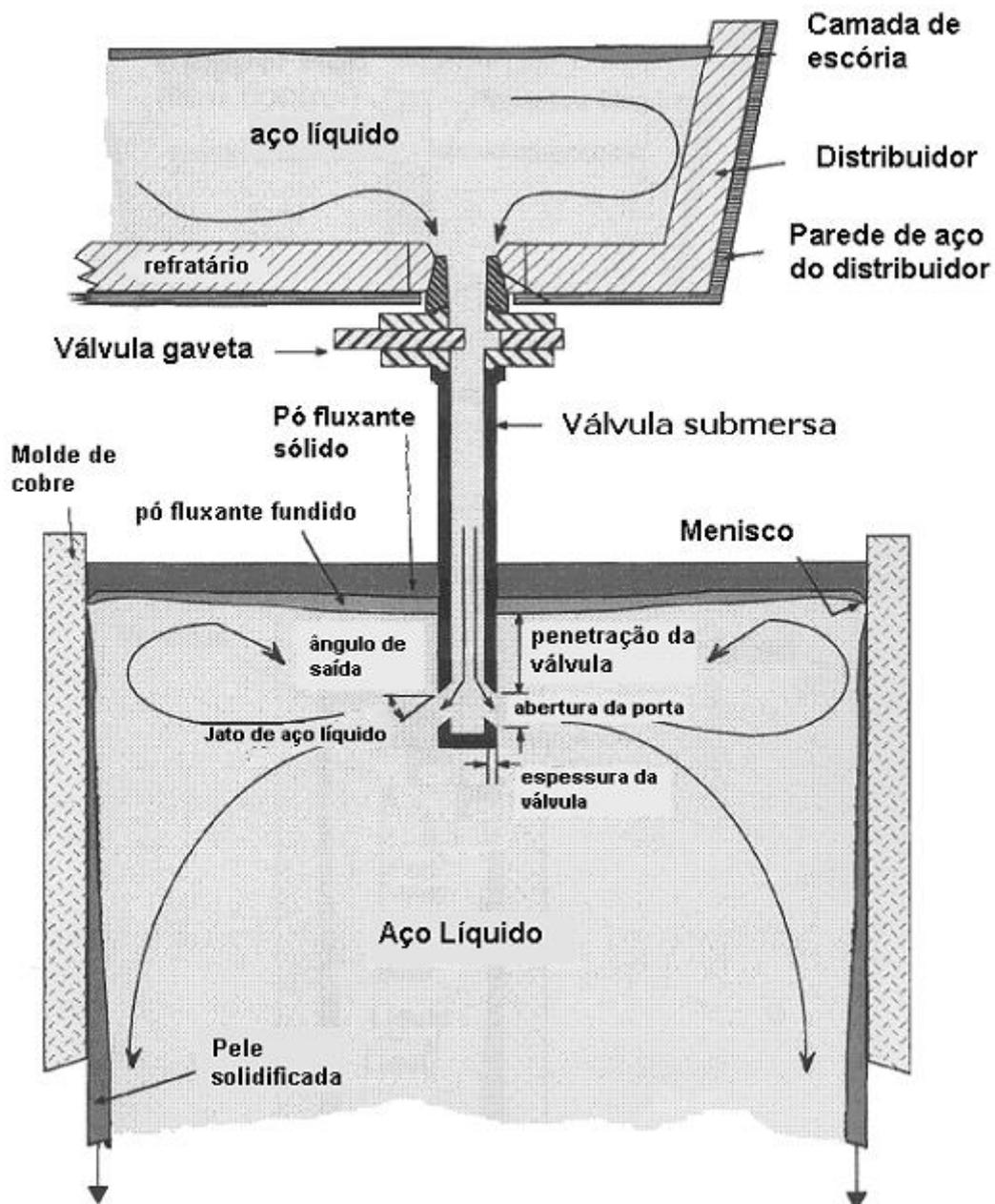


Figura 3.12 – Visão esquemática das principais regiões do distribuidor e do molde, com destaque para a válvula submersa (OLIVEIRA, 2003).

Além dos três sistemas apresentados acima, outros dispositivos fazem parte de uma máquina de lingotamento contínuo. São eles: spray para o resfriamento secundário, rolos extratores, máquina de corte, máquina de marcação automática e rebarbador.

O aumento da demanda por aços cada vez mais limpos tem promovido o desenvolvimento de técnicas modernas para a remoção de inclusões do aço líquido, seja na panela, no distribuidor ou no molde. Dessa forma, a máquina de lingotamento tem

um papel fundamental na qualidade do produto final, sendo considerada um dos principais desenvolvimentos tecnológicos das últimas décadas na siderurgia mundial, em virtude de aliar produtividade, rendimento, versatilidade e qualidade (COSTA, 2003).

Um aspecto importante para a qualidade de produtos lingotados é a presença de inclusões. O próximo item trata das características destes materiais.

### **3.5 Inclusões**

Inclusões são partículas presentes no aço líquido que durante a solidificação do mesmo ficam retidas no sólido e que, em função de suas características, como, por exemplo, tamanho ou composição química, influenciam diferentemente as propriedades do aço. A presença destas inclusões pode ser desejável ou indesejável, dependendo da necessidade de propriedades finais do aço.

As inclusões podem ser classificadas de diversas maneiras. As principais divisões estão relacionadas com a composição química, com a origem das inclusões, com a plasticidade e com o tamanho.

#### **3.5.1 Composição química das inclusões**

Em relação à sua composição química, as inclusões podem ser classificadas em metálicas e não metálicas.

As inclusões metálicas são na forma de metal puro, como por exemplo, inclusões de chumbo e cobre.

As inclusões não metálicas estão sob a forma combinada, como por exemplo, óxidos, sulfetos, nitretos, fosfetos e carbonetos.

### 3.5.2 Origem das inclusões não metálicas

Em relação à sua origem, as inclusões podem ser classificadas como exógenas ou endógenas.

As inclusões exógenas são de origem externa, resultante da entrada de escória juntamente com o metal, da erosão mecânica do refratário do forno ou do material do molde e de reações químicas entre o refratário do forno e o metal e/ou escória.

Por outro lado, as inclusões provenientes de reações no banho líquido são chamadas de endógenas. Estas reações são normalmente as reações de desoxidação do aço.

### 3.5.3 Plasticidade das inclusões

Quando à plasticidade, as inclusões podem ser classificadas em:

- Deformáveis;
- Indeformáveis.

As inclusões deformáveis são conformadas mecanicamente seguindo a direção de laminação do aço e as indeformáveis não são conformadas mecanicamente durante o processo de laminação, prejudicando a estrutura interna do material (HAHNE, 1998).

### 3.5.4 Tamanho das Inclusões

Em termos de tamanho, as inclusões podem ser classificadas em três categorias:

- Submicroscópicas (menores que  $1\mu\text{m}$ );
- Microscópicas (entre  $1\mu\text{m}$  e  $100\mu\text{m}$ );
- Macroscópicas (acima de  $100\mu\text{m}$ ).

A figura 3.13 mostra alguns exemplos das características das inclusões após o lingotamento do metal e após a sua conformação mecânica.

| Tipo de inclusão  | Forma característica no produto lingotado | Forma característica no produto laminado |
|---|---|--|
| Sulfetos<br>MnS   |   |  |
| Alumina<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   |   |  |
| Aluminato de cálcio<br>C <sub>12</sub> A <sub>7</sub> ou<br>12CaO·7Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |   |  |
| Aluminato de cálcio<br>CA <sub>2</sub> ou<br>CaO·2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                  |   |  |
| Aluminato de cálcio<br>C <sub>12</sub> A <sub>7</sub> com anel<br>de sulfeto                      |   |  |
| Sílica<br>SiO <sub>2</sub>  |   |  |

Figura 3.13 – Exemplos das características de inclusões após o lingotamento e após a laminação (RIBEIRO, 2002).

Se no processo de desoxidação do aço for produzida uma grande quantidade de inclusões de alumina, pode se fazer uso da adição de ligas contendo cálcio para possibilitar a formação de inclusões globulares de óxidos de alumínio e cálcio ( $x\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot y\text{CaO}$ ). Dependendo da proporção entre alumina e cal (relação entre os valores de  $x$  e  $y$ ) podem ser produzidas inclusões com um reduzido ponto de fusão, que faz com que as mesmas estejam no estado líquido na temperatura de tratamento do aço na panela. Estas características facilitam a rápida flotação e absorção da inclusão pela escória. Isto normalmente ocorre se as inclusões apresentarem um teor de CaO em torno de 50%.

### 3.6 Desoxidação

O processo de desoxidação tem a finalidade de reduzir o teor de oxigênio dissolvido no aço, sendo que este pode provocar porosidades e inclusões durante o processo de solidificação.

A desoxidação ocorre através da adição de um elemento com alta afinidade pelo oxigênio. Isto significa que a variação de energia livre da reação de oxidação deste elemento a ser adicionado tem que ser mais negativa que a reação de oxidação do ferro.

As inclusões endógenas são relacionadas diretamente com os processos de desoxidação. Desse modo, entender os fenômenos que ocorrem durante este procedimento de refino siderúrgico é fundamental para a produção de aços com as mais diversas propriedades requeridas. Na prática, a adição em seqüência de desoxidantes promove diferentes teores de oxigênio dissolvido no banho até um nível mínimo constante. Para melhorar a eficiência da desoxidação é necessário favorecer a cinética da reação pela redução do potencial de oxigênio através da utilização de vácuo.

Há três categorias de desoxidação de aços (TURKDOGAN, 1996):

- (i) Aços resulfurados e desoxidados com liga ferro manganês para oxigênio residual na faixa de 100 a 200 ppm;
- (ii) Aços semi-acalmados:
  - a) Aços semi-acalmados, desoxidados com Si/Mn para oxigênio residual de 50 a 70 ppm;
  - b) Aços semi-acalmados, desoxidados com Si/Mn/Al para oxigênio residual de 25 a 40 ppm;
  - c) Aços semi-acalmados, desoxidados com Si/Mn/Ca para oxigênio residual de 15 a 20 ppm;
- (iii) Aços acalmados ao alumínio para oxigênio residual na faixa de 2 a 4 ppm.

A desoxidação complexa com Si/Mn é análoga à reação de desoxidação combinada de Al seguido por Ca. Ambos Mn e Ca têm por finalidade modificar quimicamente os compostos da desoxidação para formar inclusões líquidas (TURKDOGAN, 1996; MARCON, 2007).

Uma melhor compreensão da desoxidação do aço pode ser obtida quando associada com a variação de energia livre molar. XIAOBING (2004), lista em seu trabalho as principais reações de desoxidação, que estão apresentadas na tabela III.2.

Tabela III.2 - Principais reações que ocorrem na desoxidação do aço e sua respectiva  $\Delta G^\circ$  (Xiaobing, 2004).

| Reação Química   | $\Delta G^\circ$ (kJ/mol)            |
|--|--------------------------------------|
| $2 \underline{\text{Al}} + 3 \underline{\text{O}} = \text{Al}_2\text{O}_{3(l)}$                          | $\Delta G^\circ = -1225 + 0,393T$    |
| $\underline{\text{Ca}} + \underline{\text{O}} = \text{CaO}_{(l)}$  | $\Delta G^\circ = -491,14 + 0,1465T$ |
| $\underline{\text{Si}} + 2 \underline{\text{O}} = \text{SiO}_{2(l)}$                                     | $\Delta G^\circ = -576,44 + 0,218T$  |
| $\underline{\text{Mn}} + \underline{\text{O}} = \text{MnO}_{(l)}$  | $\Delta G^\circ = -288,12 + 0,1283T$ |
| $\text{SiO}_{2(l)} + 4/3 \underline{\text{Al}} = 2/3 \text{Al}_2\text{O}_{3(l)} + \underline{\text{Si}}$ | $\Delta G^\circ = -207,01 + 0,0324T$ |

Essas reações são importantes para analisar as relações entre os elementos desoxidantes, o oxigênio dissolvido no aço e o equilíbrio entre aço/escória e aço/inclusões.

O processo de desoxidação pode ser simples ou complexo. A desoxidação é dita simples quando conduzida usando um desoxidante apenas e tem como produto de desoxidação (inclusões) geralmente um óxido puro. A desoxidação é chamada complexa quando mais que um desoxidante é empregado. Neste caso, o produto de desoxidação é uma solução de óxidos na qual a atividade de cada componente óxido é menor do que 1 (CHOUDHARY et al, 2002). Assim, grandes quantidades de oxigênio podem ser retiradas do banho usando menores teores de desoxidantes quando comparado com a desoxidação simples. A desoxidação complexa é uma ferramenta importante para a

modificação química e morfológica das inclusões. Além disso, é possível obter produtos de desoxidação líquidos, que têm certas vantagens em relação aos produtos sólidos (TURKDOGAN, 1996; MARCON, 2007).

Conhecer as práticas de desoxidação e seus efeitos é importante para controlar os tipos, as características físico-químicas e a quantidade de inclusões formadas. O controle da desoxidação também é importante para garantir a produtividade na aciaria, bem como prover a adequada limpeza ao aço, característica essa ligada diretamente ao conceito de qualidade do aço (TURKDOGAN, 1996).

O aço inoxidável P409A na ArcelorMittal Inox Brasil é um aço semi-acalmado desoxidado pelo Si/Ca, pois aços desoxidados com alumínio apresentam uma maior probabilidade de obstrução da válvula submersa durante o processo de lingotamento contínuo e desoxidar através da adição do manganês aumenta o custo de fabricação do mesmo.

### **3.7 Obstrução da Válvula Submersa no Lingotamento Contínuo**

O processo de obstrução da válvula submersa está associado à redução da vazão e/ou interrupção da passagem de aço do distribuidor para o molde. Este fenômeno pode gerar as seguintes conseqüências:

- Redução da produtividade na aciaria;
- Aumento do custo de produção do aço;
- Redução da qualidade interna das placas.

Segundo RACKERS (1995), existem quatro mecanismos de obstrução de válvula submersa:

- Obstrução por efeito térmico;
- Obstrução proveniente da desoxidação;
- Obstrução de óxidos complexos;
- Obstrução devido a produtos de reação.

Em linhas gerais, a obstrução proveniente da desoxidação, óxidos complexos e produtos de reação podem ser classificadas como obstrução por efeito químico. Resumindo, pode-se considerar apenas dois mecanismos: obstrução por efeito térmico e/ou químico.

A figura 3.14 ilustra as diferentes intensidades de obstrução da válvula submersa.

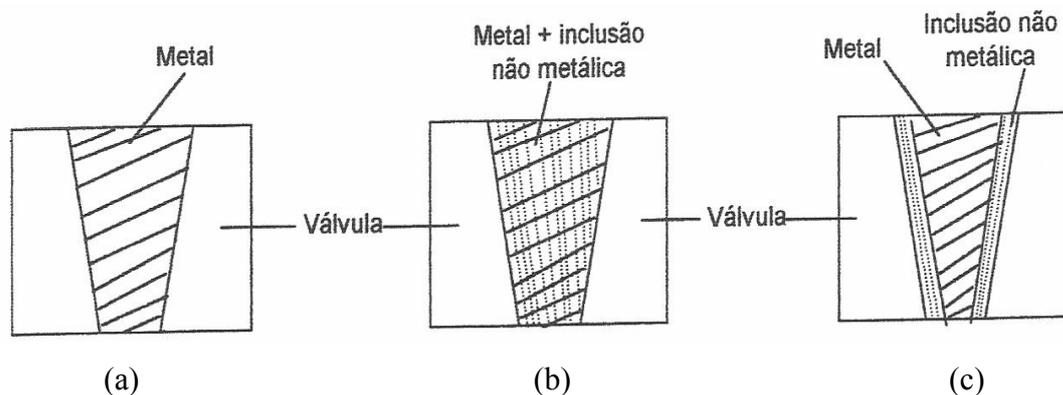


Figura 3.14 – Esquema das diferentes intensidades de obstrução da válvula submersa; (a) Válvula submersa sem obstrução; (b) Com obstrução total; (c) Com obstrução parcial (HAHNE, 1998).

### 3.7.1 Obstrução da válvula submersa por efeito térmico

A obstrução por efeito térmico é causada pelo baixo superaquecimento do aço e/ou pela grande extração de calor durante o processo de lingotamento, provocando uma solidificação do metal na válvula submersa.

Para evitar a obstrução por efeito térmico é necessário ter um controle da temperatura no distribuidor. A utilização de escória sintética para cobertura do distribuidor durante o processo de lingotamento minimiza a perda de temperatura. Caso a mesma se encontre abaixo da temperatura especificada para lingotamento do aço, é necessário aumentar a velocidade de lingotamento para evitar uma solidificação pré-matura do metal na válvula submersa com a conseqüente interrupção do seqüencial.

### 3.7.2 Obstrução da válvula submersa por efeito químico

A obstrução da válvula submersa por efeito químico envolve principalmente duas etapas (HAHNE, 1998). Na primeira etapa, forma-se uma camada compacta de óxidos devido à reação entre alguns elementos presentes no aço com o material refratário, como por exemplo, a redução do MgO através do Al na reação 3.5 (CARVALHO et. alii, 1977).



Na segunda etapa no mecanismo de obstrução, as inclusões são depositadas e acumuladas sobre esta camada de óxidos. Este processo envolve a ocorrência de diferentes fenômenos:

- Adesão e acumulação das inclusões suspensas no metal líquido na parede da válvula submersa;
- Formação de inclusões não metálicas ( $\text{Al}_2\text{O}_{3(s)}$ ) por reação entre o metal líquido e o material refratário da válvula submersa;
- Precipitação de óxidos (alumina, óxido de titânio, óxido de cálcio, entre outros) pela queda de temperatura nas proximidades com a parede de refratários;
- Formação de óxidos através da reação com o ar difundido através da parede da válvula submersa e no encaixe entre a válvula submersa e o distribuidor.

Segundo HAHNE (1998), os dois últimos mecanismos têm uma pequena probabilidade de acontecer desde que haja uma boa vedação entre a válvula submersa e o distribuidor e que o primeiro mecanismo mencionado é a principal origem da obstrução de válvulas submersas. O segundo mecanismo tem grande importância no início do lingotamento (HAHNE, 1998), pois durante a passagem de aço pela parede do refratário, o alumínio dissolvido do aço é oxidado formando alumina, que gradualmente é depositada nas paredes da válvula submersa (CRAMB et al, 2003).

Os principais fatores que influenciam a obstrução das válvulas submersas são: os métodos de desoxidação, a composição química e a temperatura do aço, a composição do refratário da válvula submersa e a passagem de escória da panela para o distribuidor.

A tabela III.3 mostra os principais fatores e as contramedidas para evitar as obstruções de válvulas (OGIBAYASHI, 1995).

Tabela III.3 – Fatores que influenciam e contramedidas a obstrução de válvulas submersas (OGIBAYASHI, 1995).

| Fatores Influentes                               | Contramedidas   | Mecanismo da contramedida                                      |
|--|---|--|
| Método de desoxidação                            | Conversão do produtos de desoxidação em compostos de baixo ponto de fusão (*) | Decréscimo da força atrativa da tensão interfacial.            |
| Pureza do aço                                    | Desgaseificação do aço ou flotação das inclusões. (*)                         | Decréscimo da frequência de adesão de produto da desoxidação   |
| Injeção de argônio                               | Injeção de argônio através da parede da válvula submersa (*)                  | Decréscimo da frequência de adesão de produto da desoxidação   |
| Temperatura do aço                               | Controle de temperatura no distribuidor (*)                                   | Prevenção da solidificação do aço na válvula                   |
| Composição do refratário da válvula submersa     | Decréscimo de SiO <sub>2</sub> na composição do refratário                    | Prevenção na formação de alumina na superfície de trabalho     |
| Geometria da válvula submersa                    | Eliminação da separação de fluxo na válvula submersa                          | Decréscimo da frequência de adesão de produtos da desoxidação  |
| Rugosidade da parede interna da válvula submersa | Redução da rugosidade interna da válvula submersa                             | Decréscimo da frequência de adesão de produtos da desoxidação. |

Obs: (\*) contramedidas efetivas

As contramedidas efetivas são operacionais e de mais fácil controle, uma vez que para mudar os demais itens, é necessário alterar o projeto da válvula submersa.

### 3.7.3 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.

As figuras 3.15 e 3.16 indicam que os materiais encontrados nas válvulas submersas dos aços estabilizados ao titânio são, principalmente,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiN}$  e  $\text{TiO}_2$ , provenientes da passagem de escória do distribuidor para o molde e da reoxidação do aço.

A reação 3.6 (CARVALHO et. alii, 1977) mostra a formação de  $\text{TiN}$ , principal constituinte encontrado nas obstruções das válvulas submersas.



Parte dos precipitados de  $\text{TiN}$  reage com oxigênio presente no ar atmosférico ou no aço formando em  $\text{TiO}_2$  (GAO, 1993), segundo a reação abaixo:



O logaritmo da constante de equilíbrio é dado por:

$$\log (h_{\text{N}}/h_{(\text{O})}^2) = - 5,255 + (17360 / T) \quad (3.8)$$

Assumindo  $\text{TiN}$  e  $\text{TiO}_2$  sólidos puros.

Pela definição de  $\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T.\Delta S^\circ$ , observa-se nas equações acima que o valor de  $\Delta H^\circ$  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, ocorrerá a obstrução da válvula submersa devido à formação de  $\text{TiO}_2$ .

De acordo com GAO (1993), as medidas efetivas para reduzir a deposição de materiais na válvula submersa em aço estabilizados ao Ti são:

- Reduzir o teor de nitrogênio no aço para evitar a formação de TiN, conforme reação 3.6;
- Minimizar a reoxidação do aço durante o processo de lingotamento para evitar a formação de espinélio ( $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{MgO}$ ) e óxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ );
- Minimizar a queda de temperatura do aço no distribuidor.

A figura 3.15 ilustra a morfologia do nitrreto de titânio encontrado na obstrução no aço 409.

A figura 3.16 ilustra a presença da partícula de espinélio ( $\text{Al}_2\text{O}_{3(s)}$  e  $\text{MgO}_{(s)}$ ) na superfície do cubo de TiN.

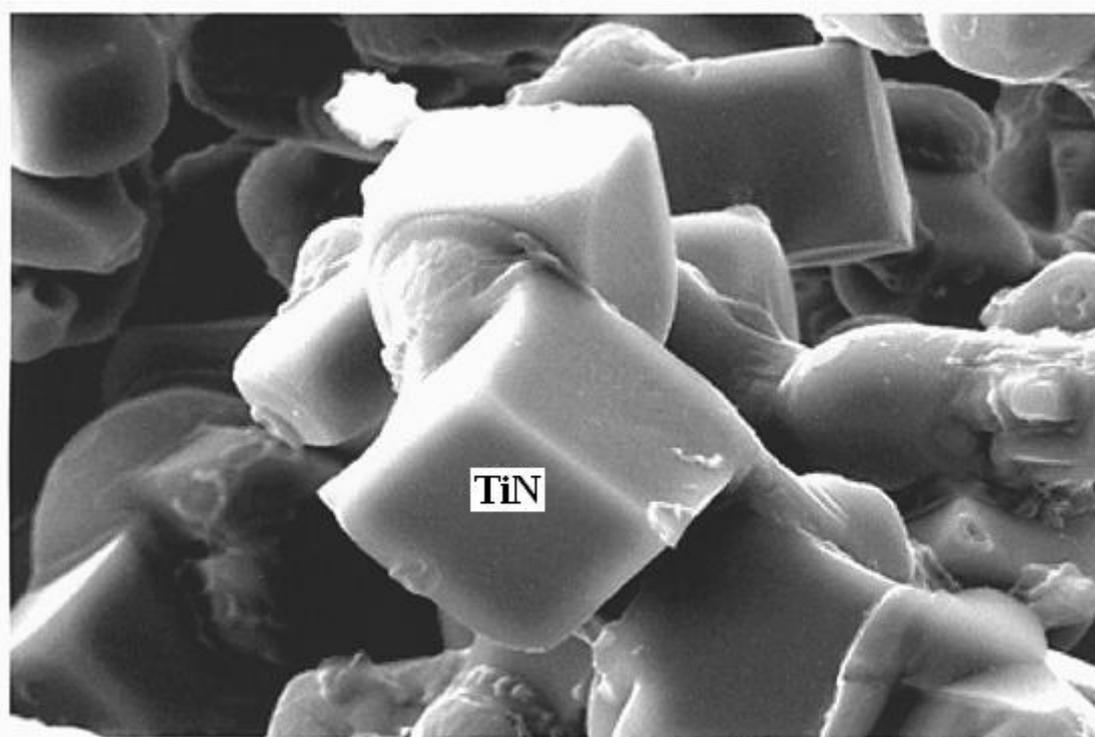


Figura 3.15 – Morfologia do TiN encontrado na obstrução do aço 409 ( CRAMB et. alii, 2003)

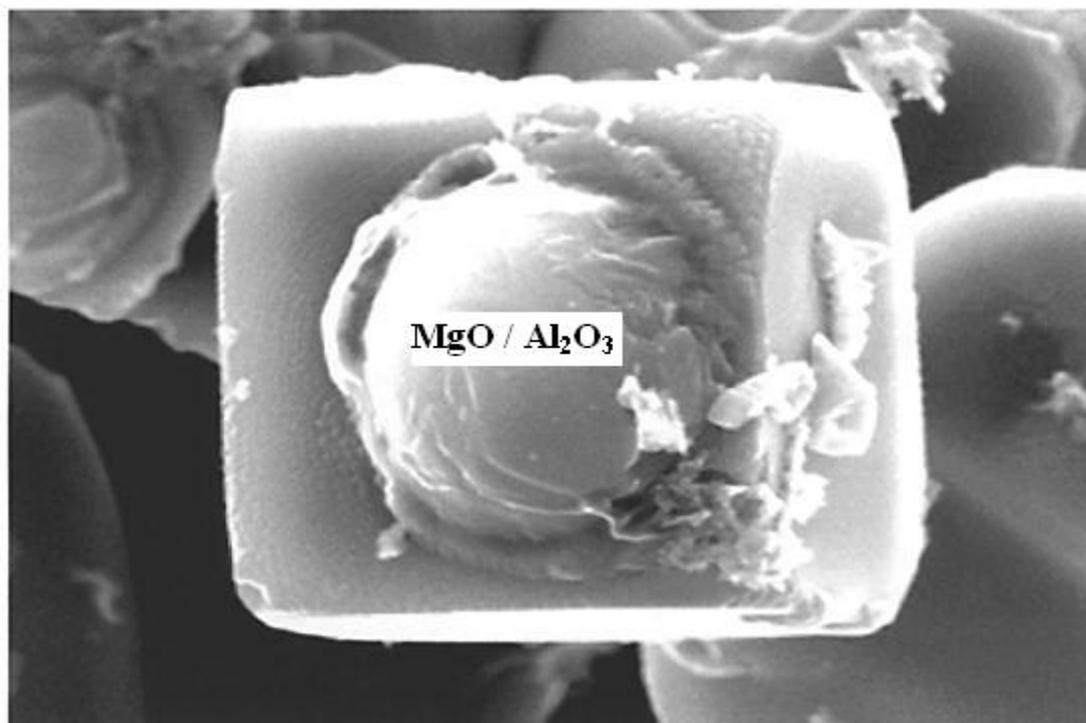


Figura 3.16 – Partícula de espinélio presente na superfície do cubo de TiN (CRAMB et alii, 2003)

Segundo documentos internos da ArcelorMittal Inox Brasil, para reduzir a incidência de obstrução em corridas do aço P409A é importante manter o produto  $(\%Ti \times \%N) < 30 \times 10^{-4}$ , visando garantir uma boa fluidez do aço.

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.

### 3.8 Esfoliação no aço AISI 409

A esfoliação está relacionada com a presença de inclusões não metálicas que afloram à superfície da tira laminada a frio ou laminada a quente, com ou sem escamações, com dimensões variáveis, que podem chegar a um metro na fase de BQ (bobina laminada à quente) e a três metros em BF (bobina laminada à frio). A esfoliação apresenta-se

orientada segundo a direção de laminação e localização aleatória ao longo da bobina (Documentos internos da ArcelorMittal Inox Brasil, 2008).

A presença destas inclusões está normalmente associada a:

- Obstrução da válvula submersa;
- Variação do nível de aço no molde ou no distribuidor durante o lingotamento, causando o arraste de escória para dentro da placa solidificada;
- Arraste do pó fluxante para a placa solidificada no início ou no final do lingotamento.

A figura 3.17 mostra o defeito esfoliação em uma bobina laminada à frio na ArcelorMittal Inox Brasil.

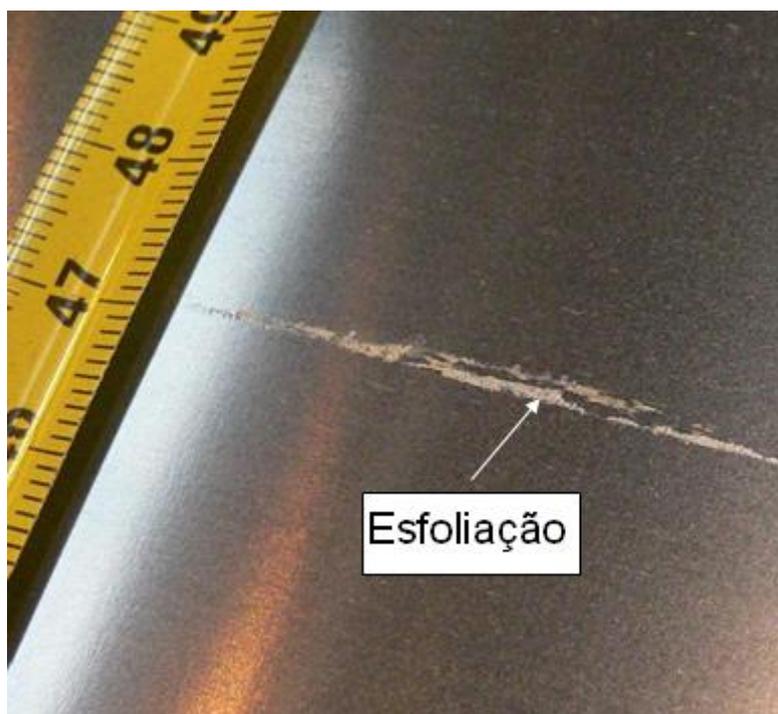


Figura 3.17 – Defeito esfoliação em BF no aço 409 (Documentos internos da ArcelorMittal Inox Brasil).

## **4 METODOLOGIA**

Neste capítulo será apresentada a metodologia para desenvolvimento do trabalho. Este projeto foi composto de três etapas principais: análise das correlações entre composição química do aço e a obstrução no lingotamento contínuo e composição química com o defeito esfoliação em bobinas laminadas à frio, testes industriais visando reduzir esta obstrução e análise da qualidade do aço P409A (limite de escoamento, limite de resistência, dureza, alongamento, microestrutura, micropureza).

### **4.1 Análise da Válvula Submersa e do Defeito Esfoliação em BF**

Para determinar quais óxidos estão presentes no defeito esfoliação em bobinas laminadas à frio e na obstrução durante o processo de lingotamento contínuo, foram retiradas 2 e 4 amostras respectivamente, que apresentaram estas anormalidades.

A obstrução da válvula submersa é detectada pela análise das cartas gráficas durante o processo de lingotamento, através da variação do nível do tampão no distribuidor, uma vez que para manter o fluxo de aço constante do distribuidor para o molde, o tampão abrirá para compensar o estrangulamento da válvula submersa pela obstrução. A figura 4.1 mostra uma carta gráfica do aço P409A com obstrução (linha azul) e variação de nível de aço no molde (linha vermelha).

As análises da camada de óxido presente nas válvulas submersas e no defeito esfoliação, com a respectiva composição química, foram feitas no MEV (Microscópico Eletrônico de Varredura) no Centro de Pesquisa da ArcelorMittal Inox Brasil, equipamento Philips XL30.

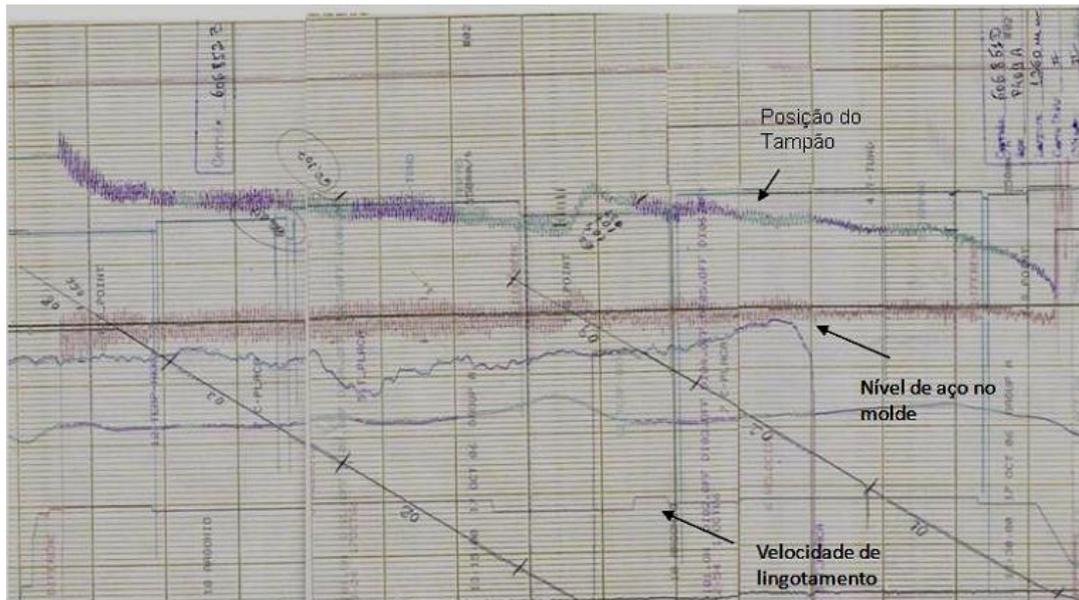


Figura 4.1 – Carta gráfica do processo de lingotamento contínuo do aço P409A na ArcelorMittal Inox Brasil (Documentos internos da ArcelorMittal Inox Brasil, 2006).

A figura 4.2 representa uma válvula com obstrução.



Figura 4.2 – Válvula submersa, com destaque para a obstrução parcial (material de coloração mais clara). (Documentos internos da ArcelorMittal Inox Brasil, 2007).

## **4.2 Correlações Entre Composição Química do Aço P409A e Obstrução no LC e Índice de Desvio por Esfoliação em BF**

Foi verificada a influência do teor de silício, titânio e da relação Si/Ti versus obstrução no lingotamento contínuo e índice de esfoliação em BF das corridas produzidas entre janeiro de 2007 a maio de 2008, período com elevado índices de obstrução e esmerilhamento de placas. Após as análises, foram propostos testes experimentais alterando a composição química do aço.

## **4.3 Realização das Corridas Experimentais do Aço P409A**

Os testes experimentais para o aço inoxidável ferrítico P409A foram programados na metalurgia secundária, mais especificamente no Forno Panela da ArcelorMittal Inox Brasil.

Segundo GAO (1993), para evitar a obstrução nos aços estabilizados ao titânio, deve-se reduzir o teor de nitrogênio do aço, o que aumenta o seu custo de fabricação. Como no aço P409A o teor de nitrogênio é de 80 ppm em média, a alternativa encontrada para minimizar a formação de TiN e TiO<sub>2</sub> foi trabalhar na redução do teor de titânio do aço. Desse modo, foram produzidas 10 corridas em cada etapa abaixo, no total de 20 corridas experimentais:

- Acerto do teor final de Ti no aço através da relação de estabilização  $Ti \geq 6 * (C + N)$ , 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.

A alteração na granulometria não influenciou a cinética de dissolução do FeTi, uma vez que a temperatura de processo no FP é de 1610 °C e o ponto de fusão da liga FeTi70 é de aproximadamente 1100 °C, conforme diagrama de fase para a liga Fe-Ti da figura 4.3.

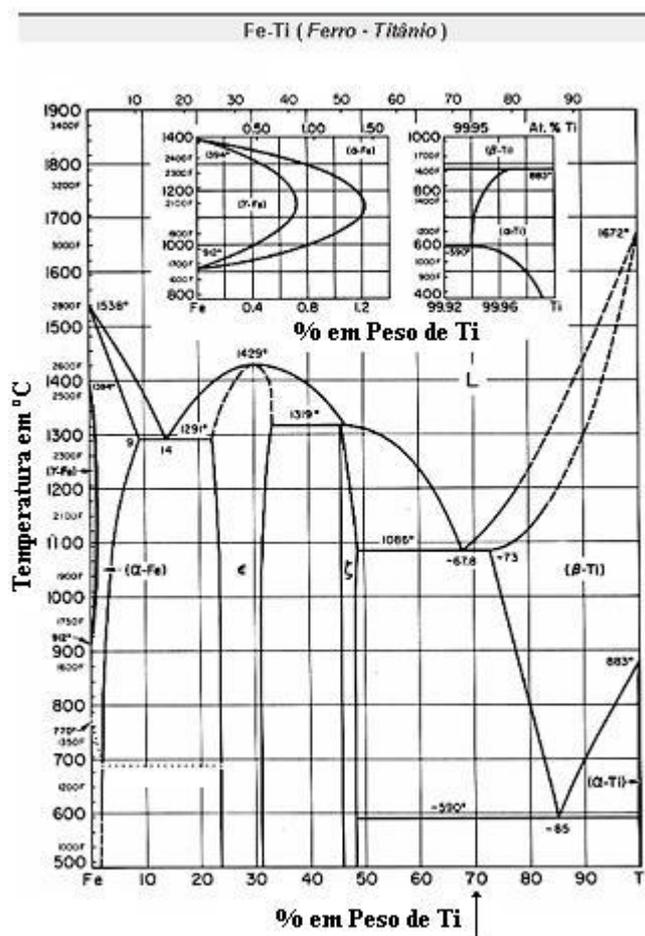


Figura 4.3 – Diagrama de fase para a liga Fe-Ti (<http://www.infomet.com.br/diagramas-fases>, 15 de dezembro de 2008).

Para garantir uma melhor desoxidação, foi aumentado o teor de Si no aço P409A. Documentos internos da ArcelorMittal Inox Brasil afirmam que o Si é um indicador indireto do grau de oxidação do banho, ou seja, quanto maior o teor de Si, menor será o teor de oxigênio no aço.

As demais variáveis de processo no forno panela, inclusive o tempo de flotação de inclusões com gás inerte após as adições, foram mantidas conforme prática padrão para o aço.

Foram verificados, simultaneamente, os seguintes parâmetros durante o processo de lingotamento contínuo, através da análise das cartas gráficas de cada corrida experimental:

- Abertura do tampão do distribuidor;
- Variação do nível de aço no molde.

No caso de aços estabilizados ao Ti, a abertura do tampão durante o lingotamento contínuo é o limitador para a continuidade do processo, portanto, a variável mais importante durante o lingotamento. As demais condições operacionais de lingotamento foram mantidas conforme prática padrão da ArcelorMittal Inox Brasil.

#### 4.3 Testes Laboratoriais

Visando garantir as propriedades intrínsecas do aço P409A, foram retiradas 9 amostras das corridas experimentais que apresentaram relação de estabilização  $[Ti/(C+N)]$  entre 6,0 a 7,0 (baixa estabilização); 7,0 a 8,0 (média estabilização) e maiores que 8,0 (alta estabilização), no total de 27 amostras de bobinas laminadas à frio na espessura de 1,5 mm, para testes laboratoriais (condição padrão e experimental) no Centro de Pesquisa da ArcelorMittal Inox Brasil. As peças tinham 300 mm de comprimento e largura igual à da bobina, conforme ilustrado na figura 4.4.

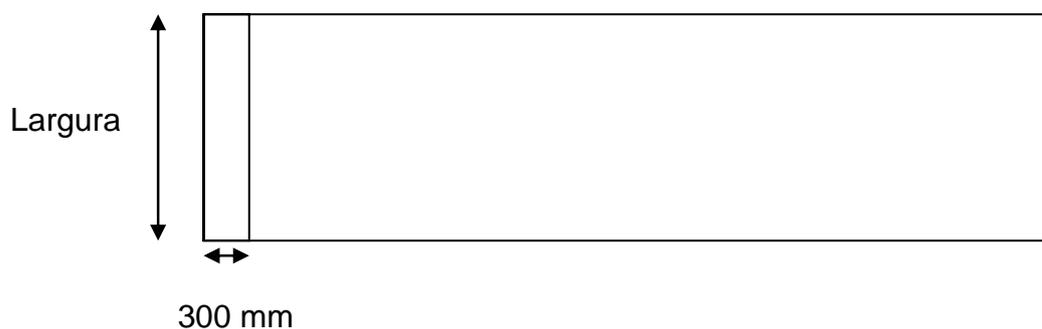


Figura 4.4 – Ilustração da amostra retirada para testes laboratoriais

Nos testes laboratoriais, as seguintes propriedades do aço P409A foram analisadas:

- Micropureza (análise dimensional das inclusões de óxidos e silicatos);

- Anisotropia ( $\bar{r} > 1,0$ );
- Microestrutura (tamanho de grão do aço);
- Propriedades Mecânicas (limite de escoamento, limite de resistência, dureza e alongamento).

Os corpos de prova para teste de tração foram preparados conforme mostrado na figura 4.5.

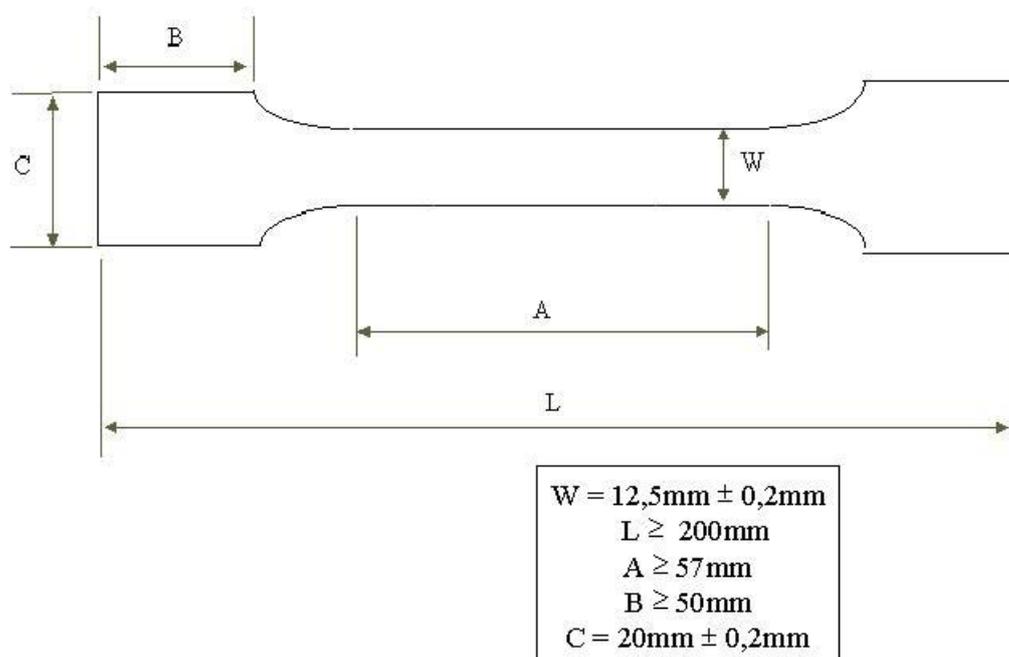


Figura 4.5 – Dimensões do corpo de prova para teste de tração no Centro de Pesquisas da ArcelorMittal Inox Brasil

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de tração do Centro de Pesquisa da ArcelorMittal Inox Brasil, marca INSTRON, modelo 5583, com capacidade de 15 toneladas. Foram obtidos valores de limite de resistência, limite de escoamento, alongamento, limite de ruptura nas três direções, ou seja, direção de laminação, 45° com a direção de laminação e 90° com a direção de laminação.

Os ensaios de micropureza e microestrutura foram realizados em um analisador de imagens (Fabricante – LECO), composto de um microscópio LEITZ DMRXE e do “software” de análise IA3001, do Centro de Pesquisa da ArcelorMittal Inox Brasil.

Para determinação da dureza, foi utilizado o durômetro do centro de pesquisas da ArcelorMittal Inox Brasil, marca INSTRON WOLPERT, modelo Testor 930.

A seguir, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no presente trabalho.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento do projeto e das etapas 4.1 e 4.2. Inicialmente foi feita a análise das válvulas submersas para verificação dos materiais presentes na obstrução do aço P409A. Em seguida, foi alterada a sua composição química visando reduzir a formação de  $\text{TiO}_2$ . Finalmente, é feita uma discussão dos resultados e influência da alteração de composição química nas propriedades intrínsecas do aço.

### 5.1 Análise das Válvulas Submersas e do Defeito Esfoliação em Bobinas Laminadas a Frio

A figura 5.1 é um corte de uma válvula submersa que apresentou obstrução parcial durante o processo de lingotamento contínuo, cujas corridas lingotadas foram 804538G e 804539E do aço P409A.



Figura 5.1 – 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.

A tabela V.1 apresenta os resultados obtidos nas análises das válvulas submersas que apresentaram obstrução durante o processo de lingotamento contínuo do aço P409A.

Tabela V.1 – Principais constituintes presentes na obstrução das válvulas submersas.

| 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  |

A tabela V.2 apresenta os resultados obtidos nas análises do defeito de esfoliação em BF do aço P409A.

Tabela V.2 – Principais constituintes presentes no defeito esfoliação.

| Amostra | Elemento (% em massa) |      |      |       |      |       |      |
|---------|-----------------------|------|------|-------|------|-------|------|
|         | Fe                    | Al   | Cr   | Ti    | O    | N     | Mg   |
| 1       | 2,34                  | 0,92 | 1,14 | 62,73 | 31,8 | 0,00  | 1,08 |
| 2       | 2,66                  | 0,00 | 1,53 | 80,96 | 0,00 | 14,85 | 0,00 |

Pela tabela V.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 ( $SiO_2$ ) e o sódio ( $Na$ ) são provenientes do pó fluxante usado durante o processo de lingotamento. Na amostra 2 da tabela V.2 foi constatada a presença do nítreto de titânio ( $TiN$ ), o que confirma a teoria proposta por GAO (1993).

A figura 5.2 mostra a área analisada pelo MEV na amostra de número 3 da válvula submersa.

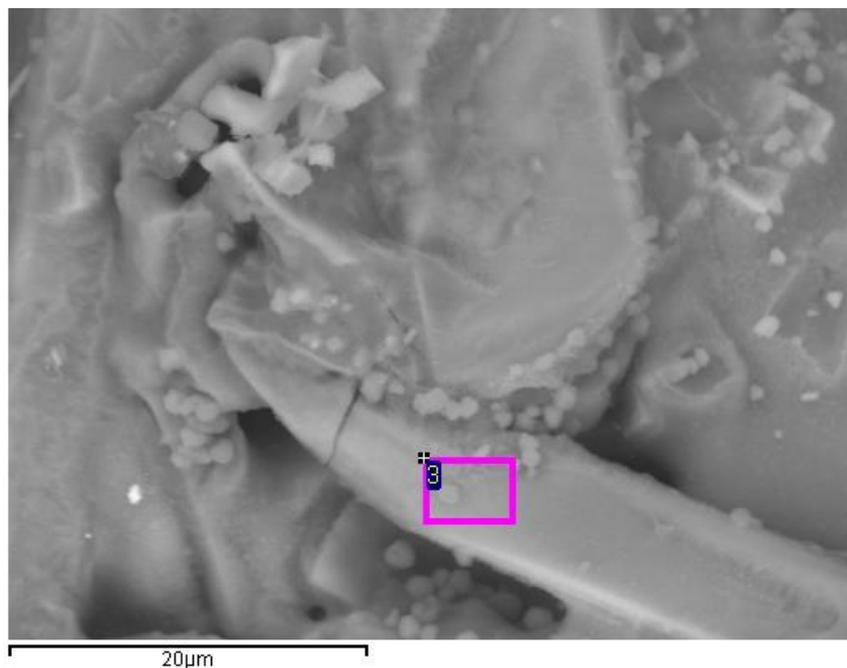


Figura 5.2 – Área analisada da inclusão encontrada na válvula submersa do aço P409A

A figura 5.3 representa a área analisada do defeito esfoliação analisada pelo MEV na amostra de número 2.

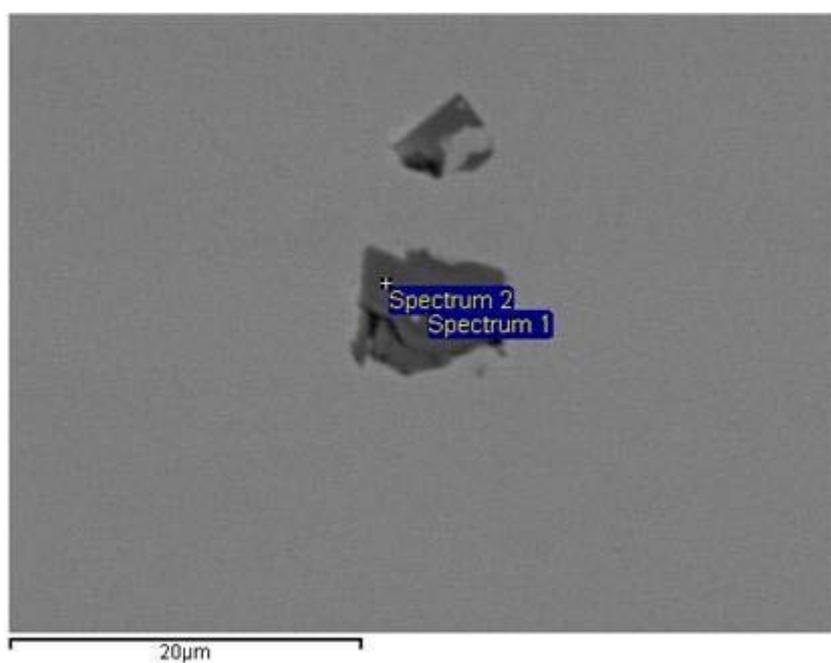


Figura 5.3 – Área analisada do defeito esfoliação em bobinas laminadas a frio do aço P409A

## 5.2 Influência da Composição Química na Obstrução das Válvulas Submersas e na Esfoliação em Produtos Laminados a Frio

A figura 5.4 mostra o efeito do silício na obstrução das válvulas submersas durante o lingotamento contínuo, de acordo com o apêndice 1, 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.

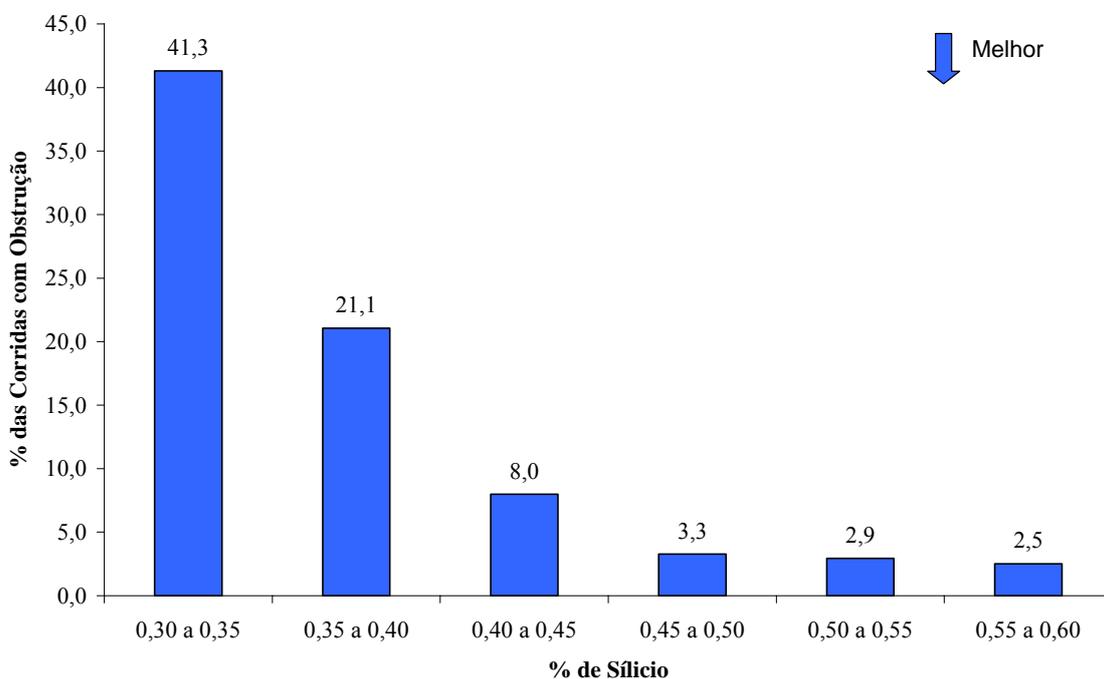


Figura 5.4 – Influência do teor de silício na obstrução de válvula no lingotamento do aço P409A (período: janeiro de 2007 a maio de 2008).

A figura 5.5 mostra o efeito do silício sobre o defeito de esfoliação em bobinas laminadas a frio (BF), de acordo com o apêndice 2, confirmando a influência do teor de silício no índice de esfoliação.

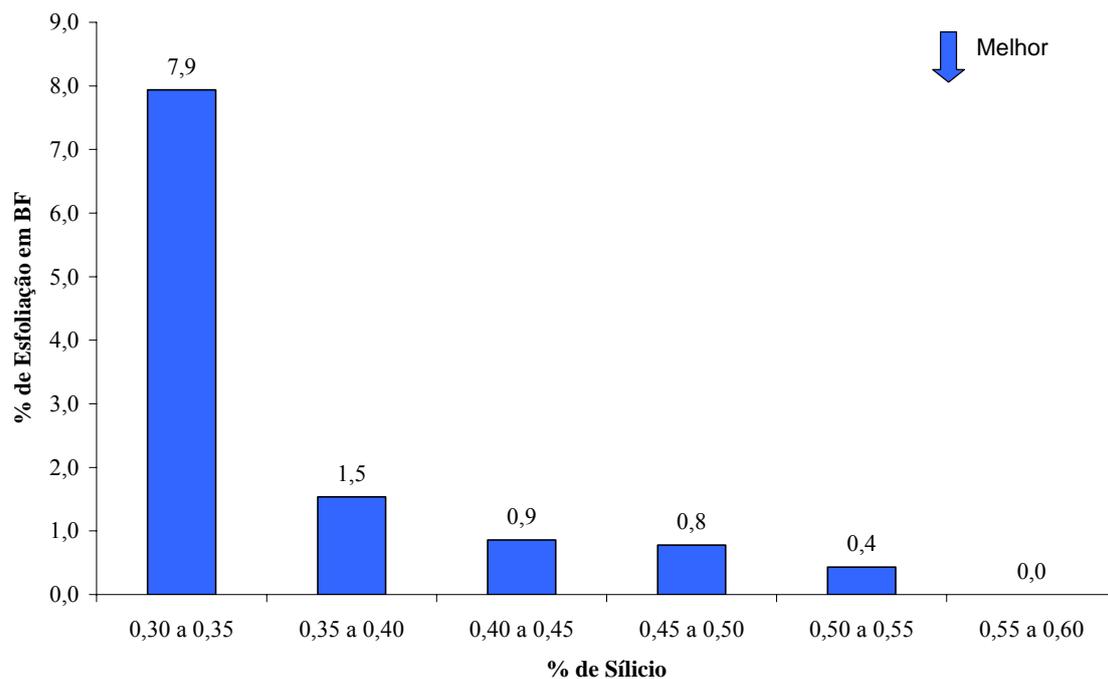


Figura 5.5 – Variação do índice de desvio por esfoliação em BF em função do teor de Si (período: janeiro de 2007 a maio de 2008).

Com base nos gráficos acima, foi alterado o teor mínimo de silício no aço P409A de 0,30 % para 0,35%. Em corridas com teor de silício maior do que 0,35%, o índice de desvio por esfoliação no aço reduz de 7,9% para 1,5%, aumentando o índice de satisfação dos clientes internos e externos.

A figura 5.6 mostra o efeito do teor de titânio na obstrução no aço P409A, de acordo com o apêndice 3, confirmando que o aço com maiores teores de titânio apresenta uma maior ocorrência do fenômeno de obstrução no LC.

A figura 5.7 mostra o índice de desvio por esfoliação em BF, de acordo com o apêndice 4. Constata-se que não há uma correlação direta do defeito esfoliação com o teor de titânio.

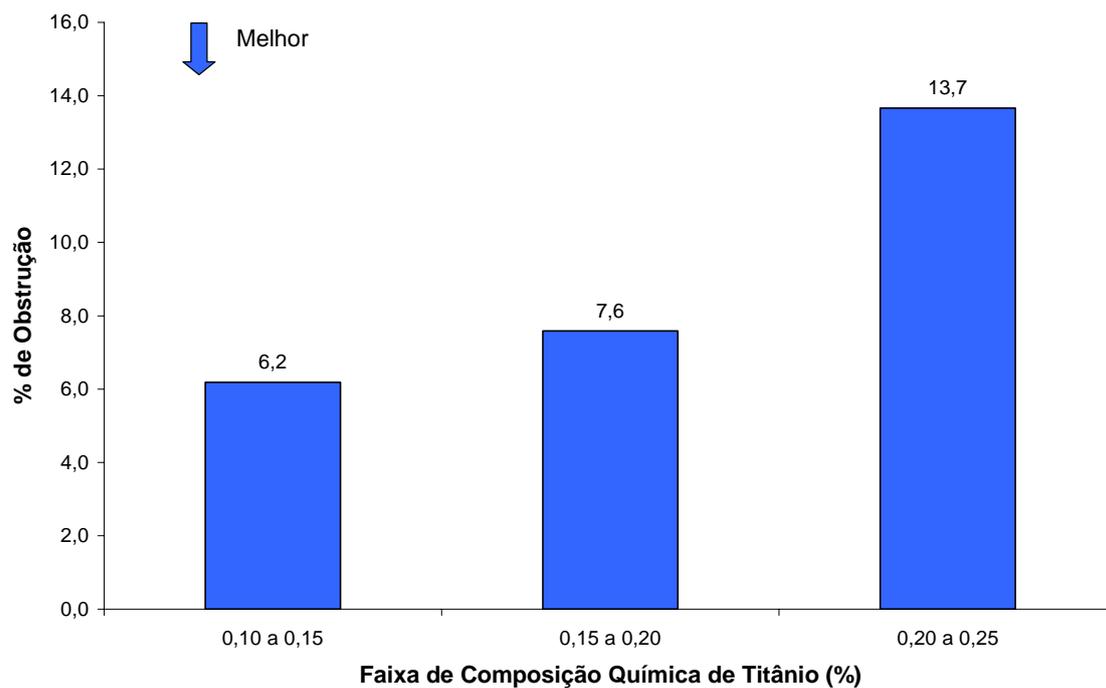


Figura 5.6 – Influência do teor de titânio na obstrução de válvula no lingotamento do aço P409A (período: janeiro de 2007 a maio de 2008).

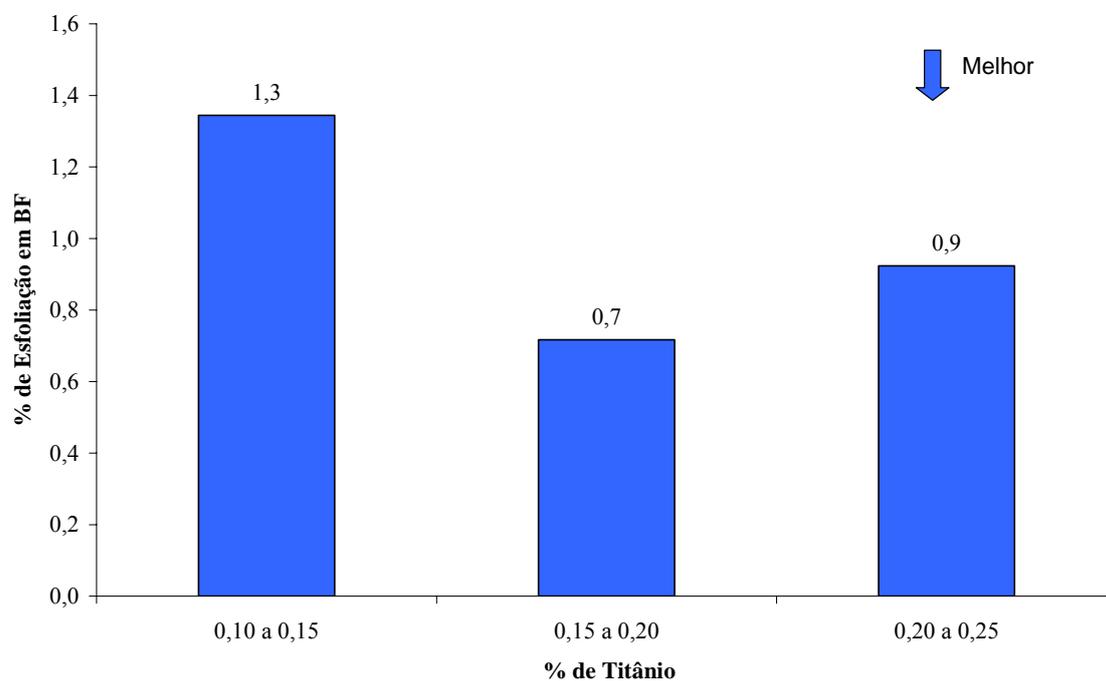


Figura 5.7 – Variação do índice de desvio por esfoliação em BF em função do teor de Ti (período: janeiro de 2007 a maio de 2008).

Combinando os resultados anteriores, foi feita uma análise do efeito da relação %Si/%Ti no aço sobre a ocorrência da obstrução da válvula submersa. Os resultados são apresentados na figura 5.8, conforme apêndice 5. Observa-se que quanto maior a relação Si/Ti, menor é a ocorrência de obstrução da válvula durante o processo de lingotamento contínuo.

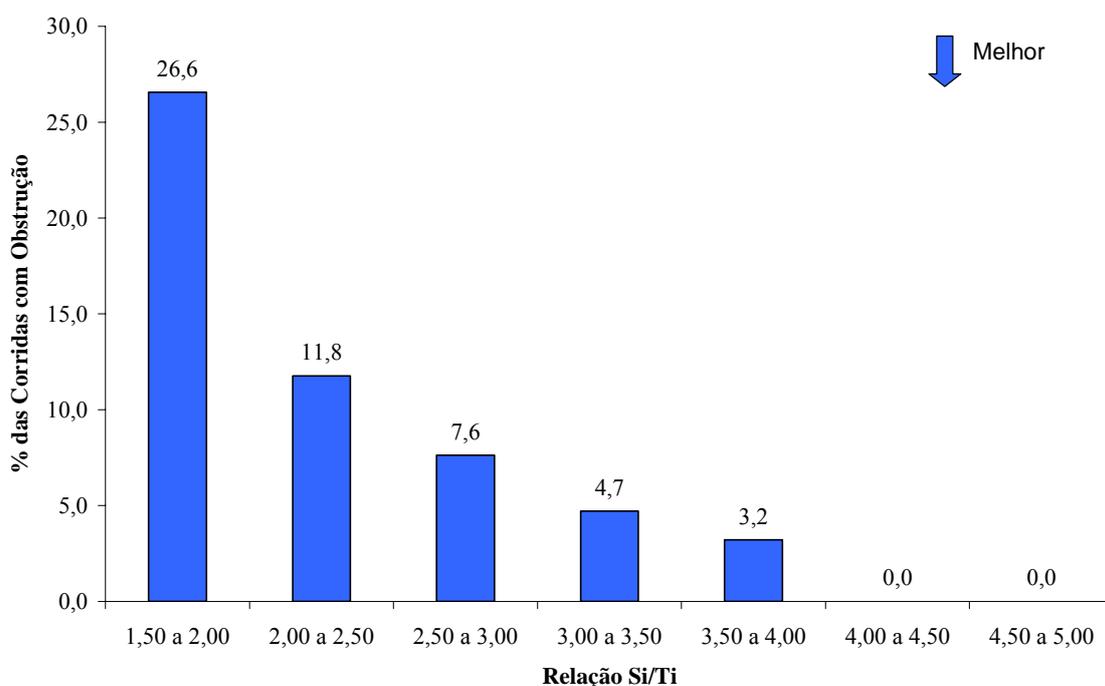


Figura 5.8 – Influência da relação Si/Ti na obstrução do aço P409A (período: janeiro de 2007 a maio de 2008).

Baseando nestes resultados, foi realizada a redução do teor de titânio do aço P409A, visando aumentar a relação Si/Ti do aço e com isso diminuir a ocorrência de obstrução da válvula submersa.

As figuras 5.9 e 5.10 mostram os histogramas da relação Si/Ti nos períodos de janeiro de 2007 a maio de 2008 (antes das alterações de composição química do aço) e no período de junho de 2008 a abril de 2009 (após as alterações de composição química do aço), respectivamente.

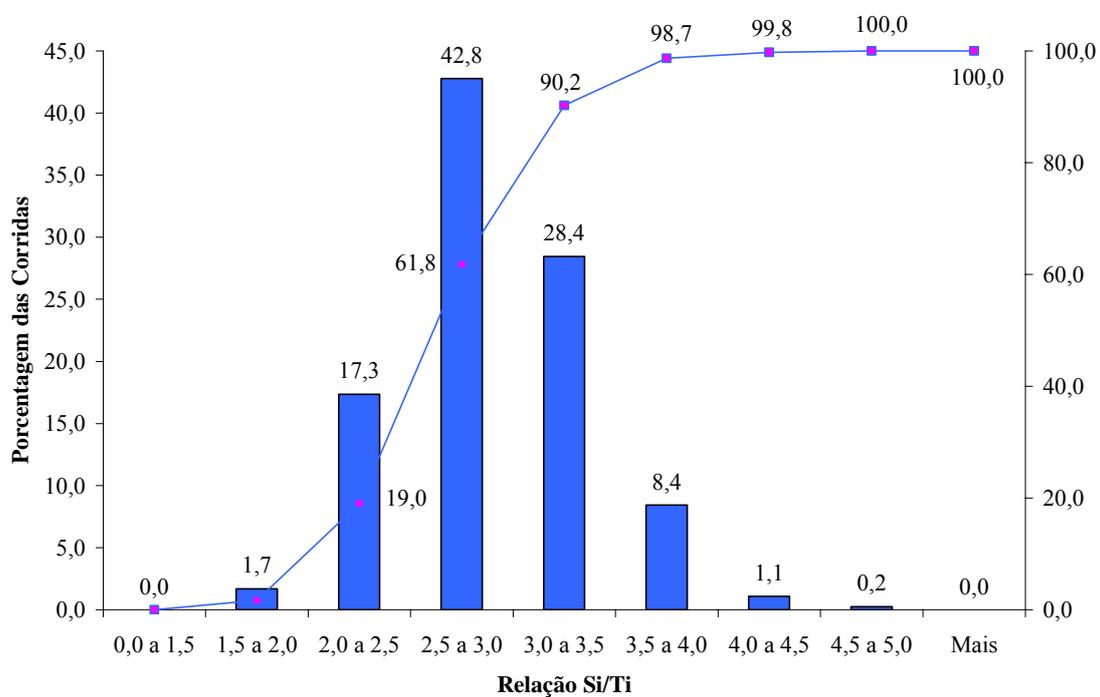


Figura 5.9 – Histograma da relação Si/Ti no período de janeiro de 2007 a maio de 2008.

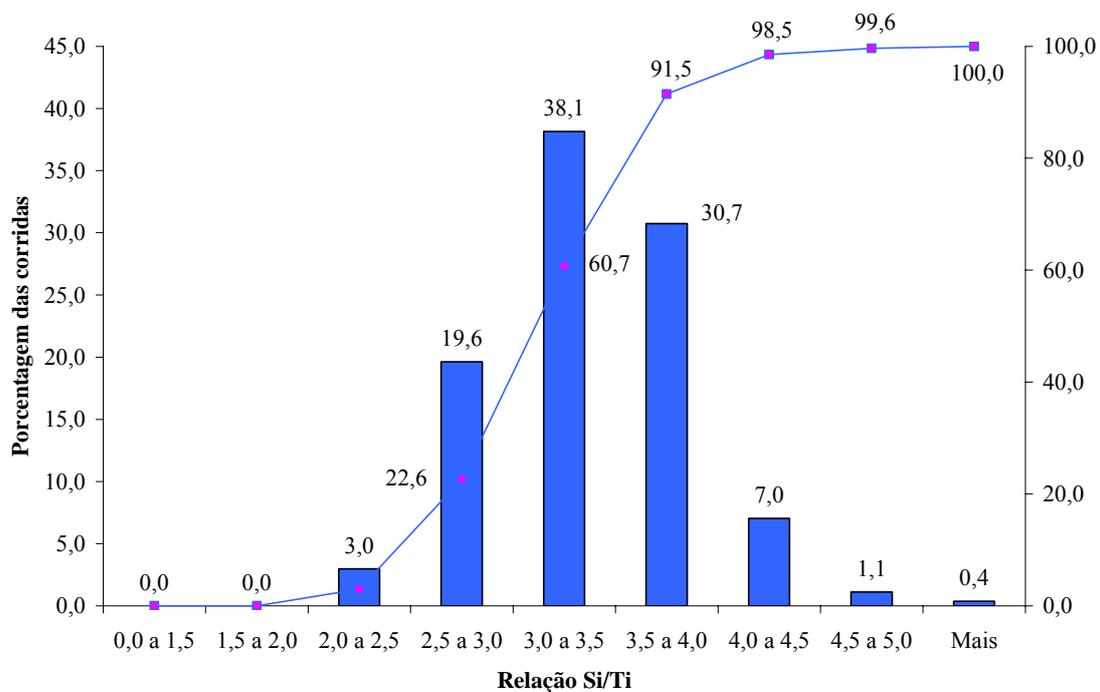


Figura 5.10 – Histograma da relação Si/Ti no período de junho de 2008 a abril de 2009.

A média e o desvio padrão da relação Si/Ti de 2,89 e 0,45 (janeiro de 2007 a maio de 2008) foi alterada para 3,34 e 0,47 (junho de 2008 a abril de 2009) respectivamente, reduzindo o índice de obstrução das válvulas submersas. A figura 5.11 é um corte de uma válvula submersa sem obstrução durante o processo de lingotamento contínuo, correspondente às corridas 901198B e 901199J do aço P409A.

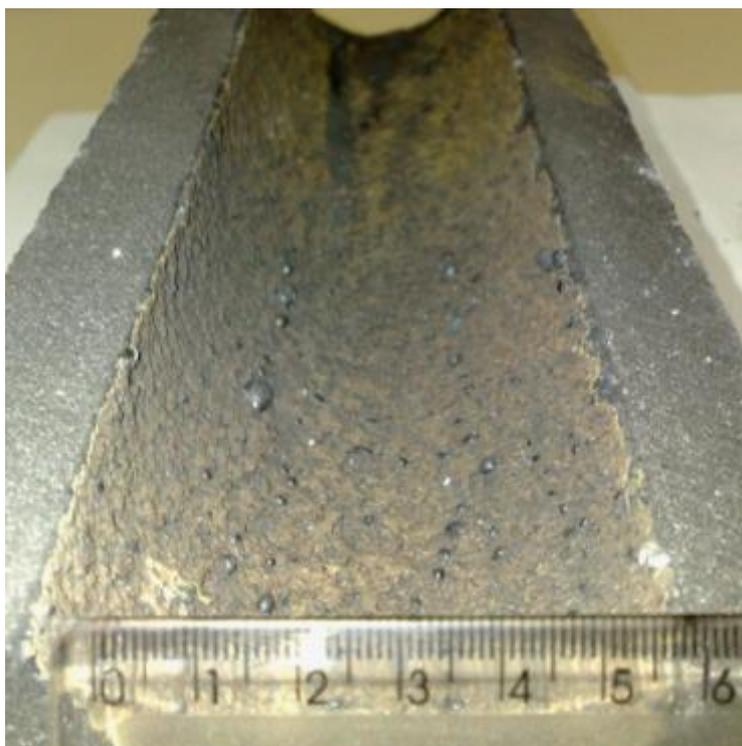


Figura 5.11 – Válvula submersa sem obstrução, lingotamento do aço P409A com relação de Si/Ti mais elevada.

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.

O aumento da relação Si/Ti foi efetuada no mês de junho de 2008. A figura 5.12 apresenta a evolução da mesma no aço P409A.

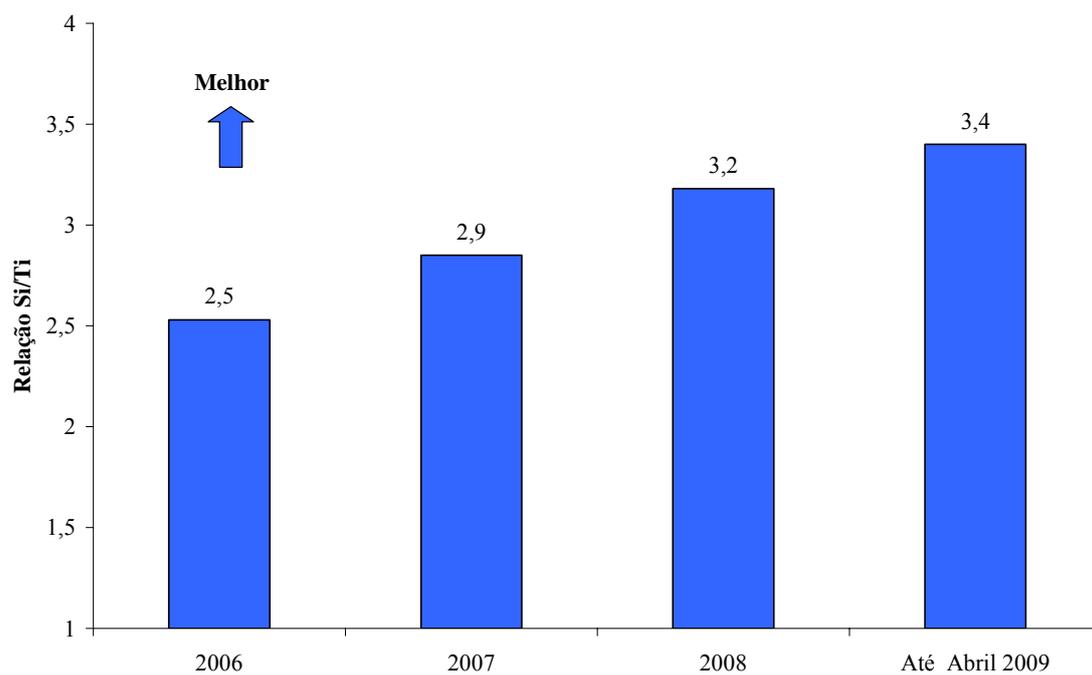


Figura 5.12 – Evolução da relação Si/Ti no aço P409A

A figura 5.13 apresenta a evolução anual no índice de esmerilhamento de placas após o aumento da relação Si/Ti no aço P409A, conforme apêndice 6.

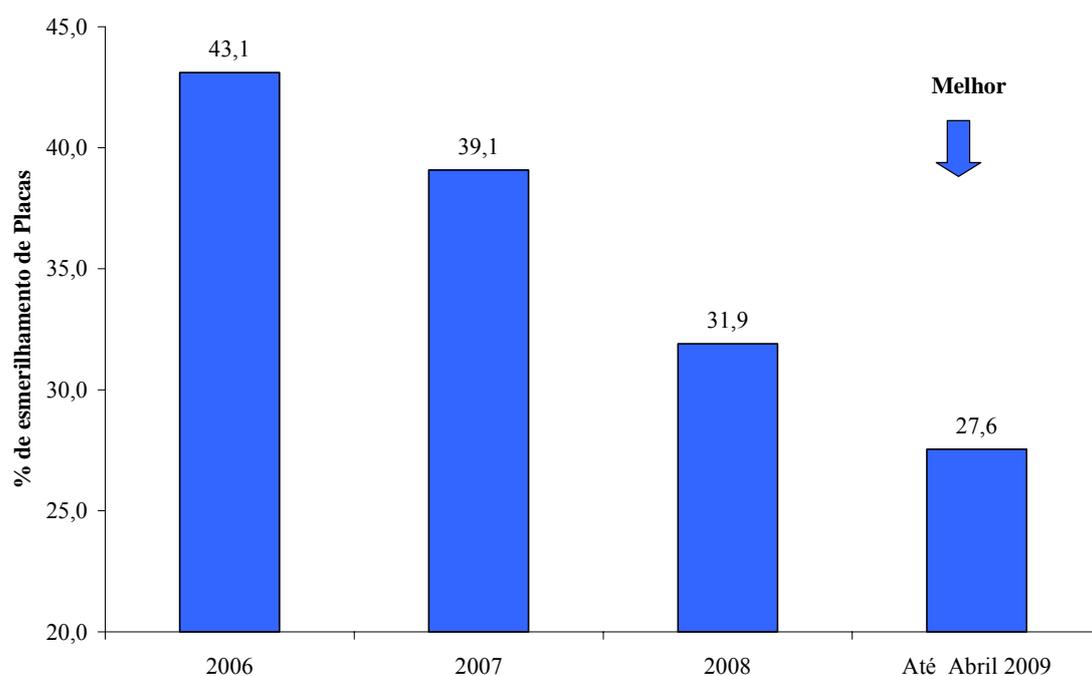


Figura 5.13 – Evolução do esmerilhamento de placas no aço P409A.

A figura 5.14 mostra a evolução na qualidade do produto laminado a frio em relação ao índice de desvio por esfoliação (A35), de acordo com o apêndice 7.

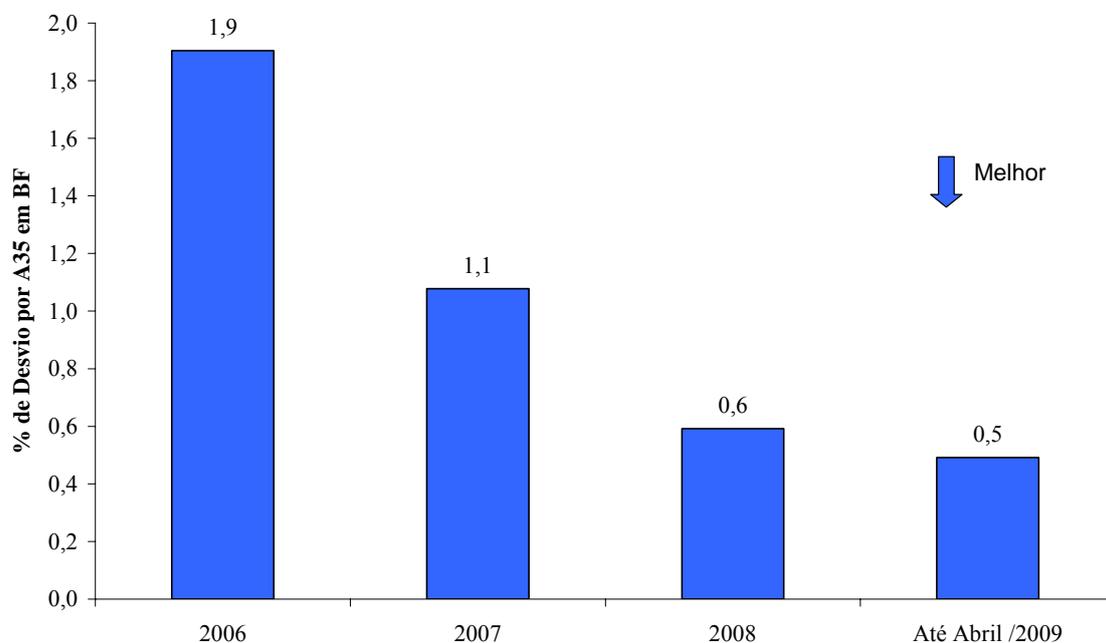


Figura 5.14 – Índice de desvio por A35 em BF do aço P409A

A alteração da granulometria da liga FeTi70 de 10 a 50 mm para 30 a 80 mm, juntamente com a alteração da relação Si/Ti, possibilitou um aumento no rendimento do Ti nas corridas do aço P409A conforme gráfico 5.15 e de acordo com o apêndice 8.

O rendimento de titânio é calculado através da equação 5.1:

$$\text{Rendimento de Ti} = \frac{\% \text{ de Ti final no aço} \times \text{massa da corrida (kg)}}{\text{massa de Titânio adicionado no FP (kg)}} \times 100 \quad (5.1)$$

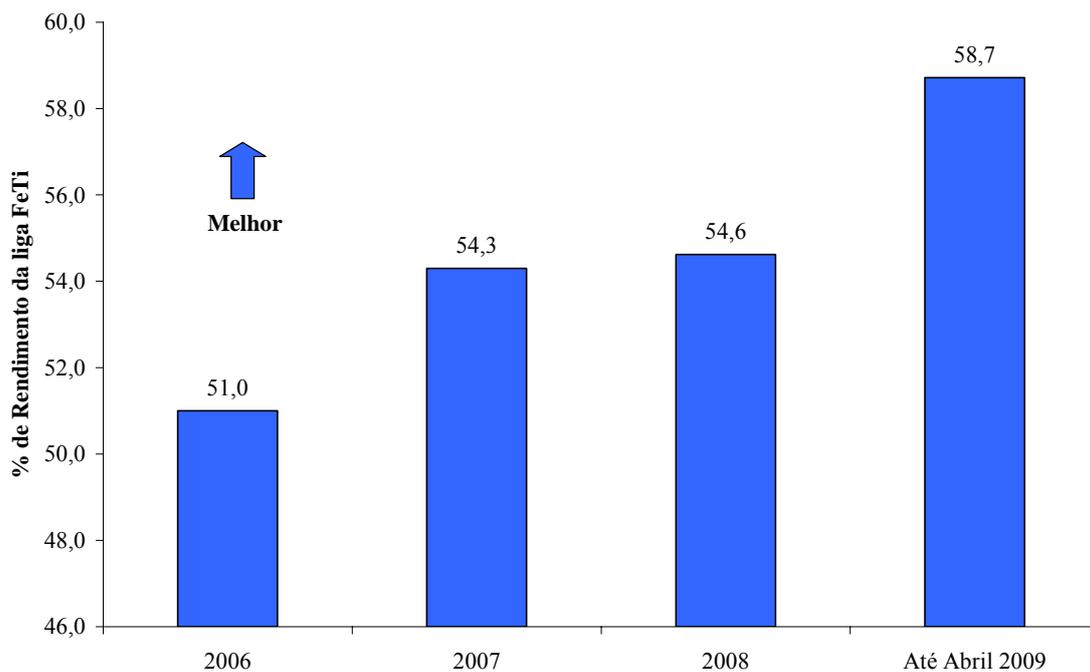


Figura 5.15 – Evolução do rendimento da liga FeTi70 no aço P409A.

As figuras 5.16 e 5.17 mostram os histogramas da relação de estabilização  $Ti/(C+N)$  nos períodos de janeiro de 2007 a maio de 2008 (antes das alterações de composição química do aço) e no período de junho de 2008 a abril de 2009 (após as alterações de composição química do aço), respectivamente.

Após as ações implementadas, a média e o desvio padrão da relação de estabilização  $[Ti/(C+N)]$  de 10,64 e 1,93 (janeiro de 2007 a maio de 2008) foi alterada para 9,04 e 1,50 (junho de 2008 a abril de 2009) respectivamente, garantindo o atendimento em 100% das corridas com relação maior do que 6,0 para o aço P409A conforme ASTM A240.

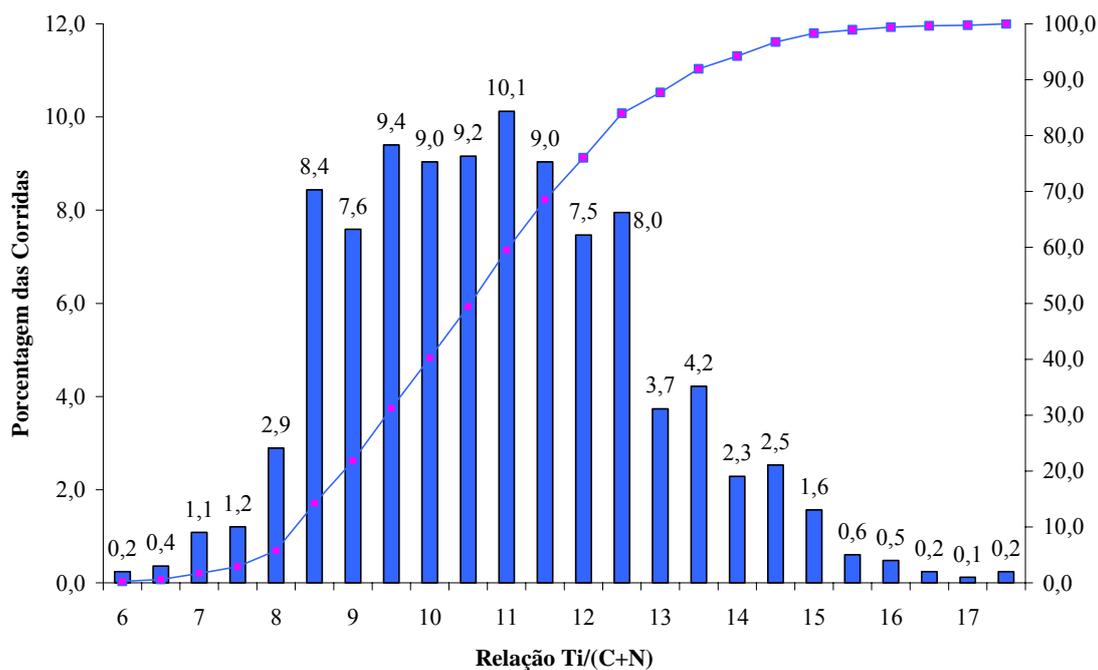


Figura 5.16 – Histograma da relação de estabilização Ti/(C+N) no período de janeiro de 2007 a maio de 2008.

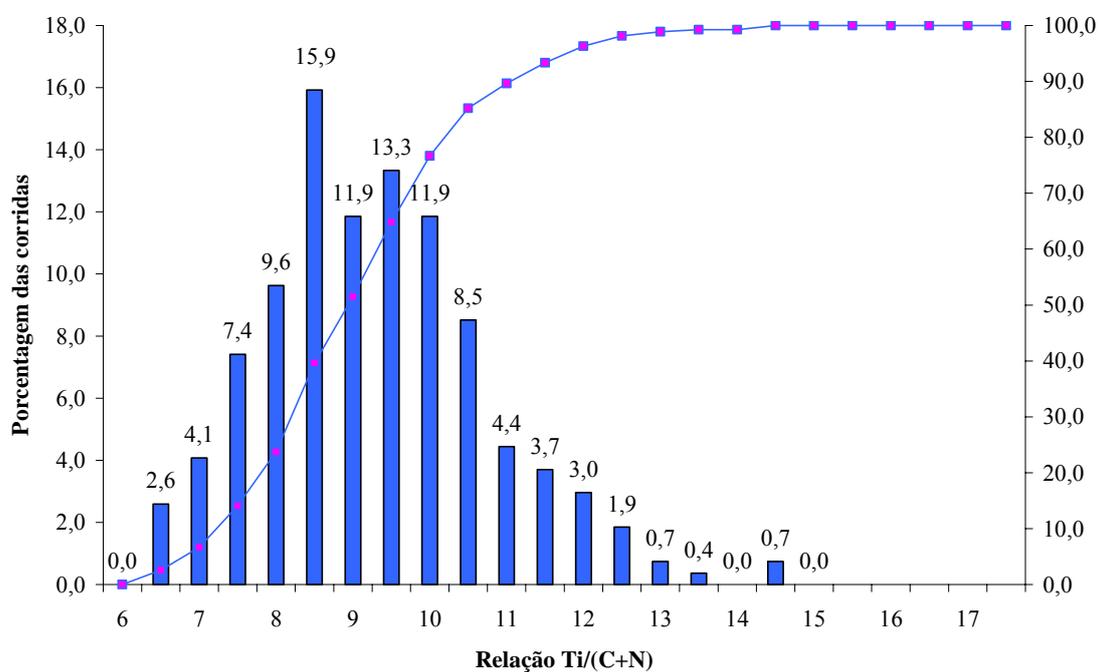


Figura 5.17 – Histograma da relação de estabilização Ti/(C+N) no período de junho de 2008 a abril de 2009.

### 5.3 Resultados Laboratoriais

Visando avaliar a qualidade intrínseca do material após as alterações na composição química do aço, foram feitos testes laboratoriais no Centro de Pesquisa da ArcelorMittal Inox Brasil.

As figuras de 5.18 a 5.21 mostram os gráficos do limite de escoamento, limites de resistência, alongamento total e dureza respectivamente, para valores de estabilização  $Ti/(C+N)$  entre 6,0 a 7,0; 7,0 a 8,0 e maiores do que 8,0.

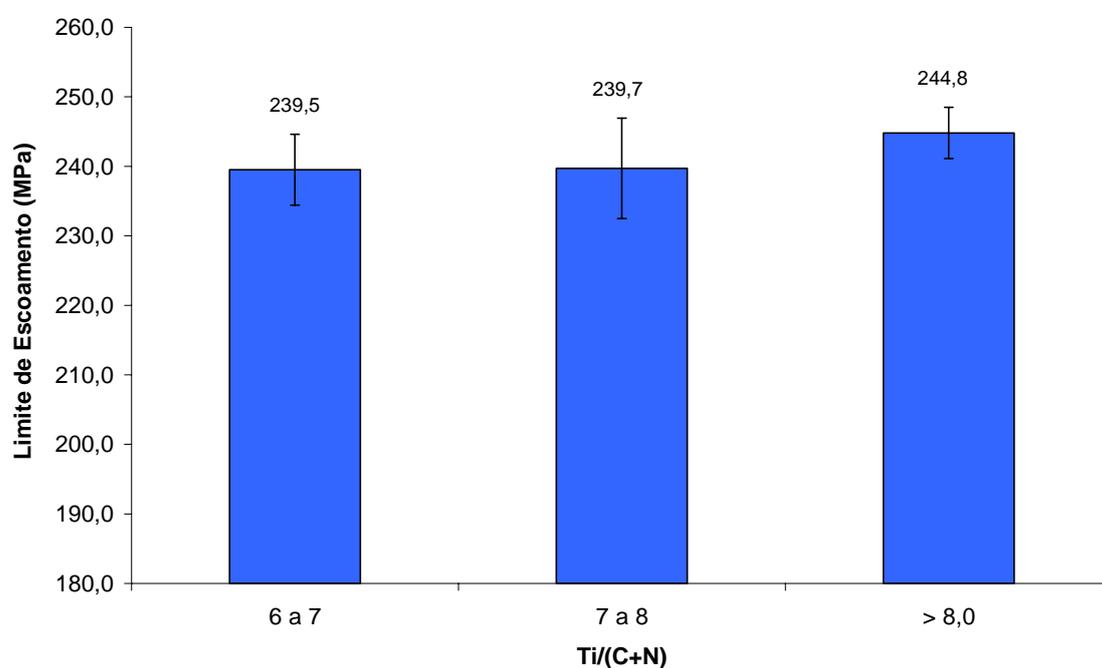


Figura 5.18 – Gráfico comparativo dos resultados laboratoriais do limite de escoamento (MPa) do aço P409A.

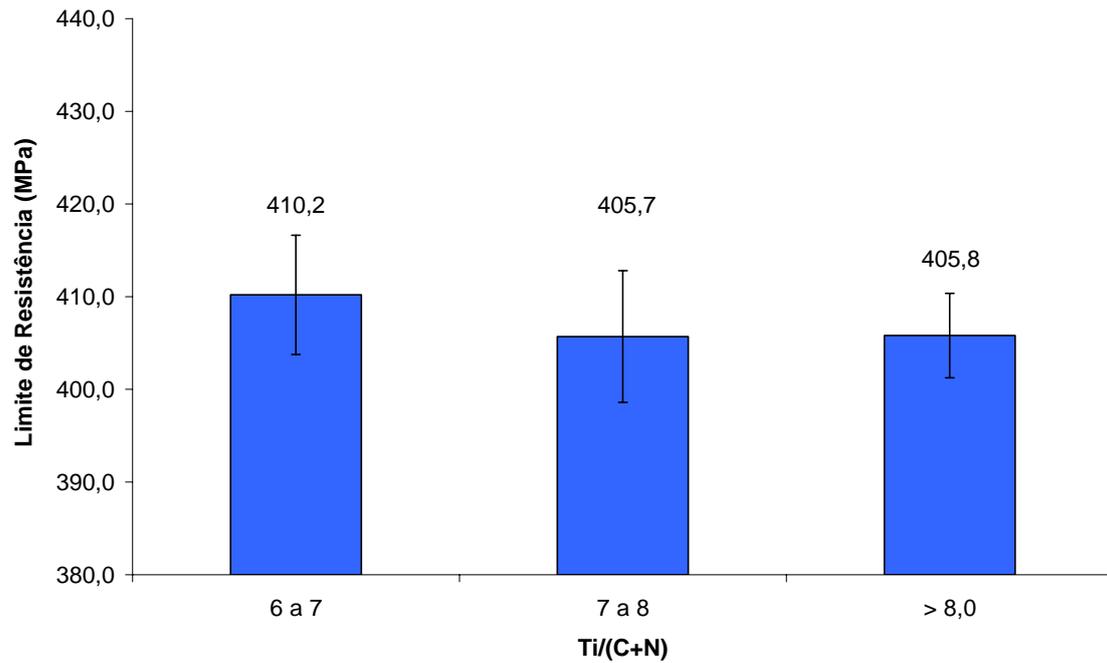


Figura 5.19 – Gráfico comparativo dos resultados laboratoriais do limite de resistência (MPa) do aço P409A.

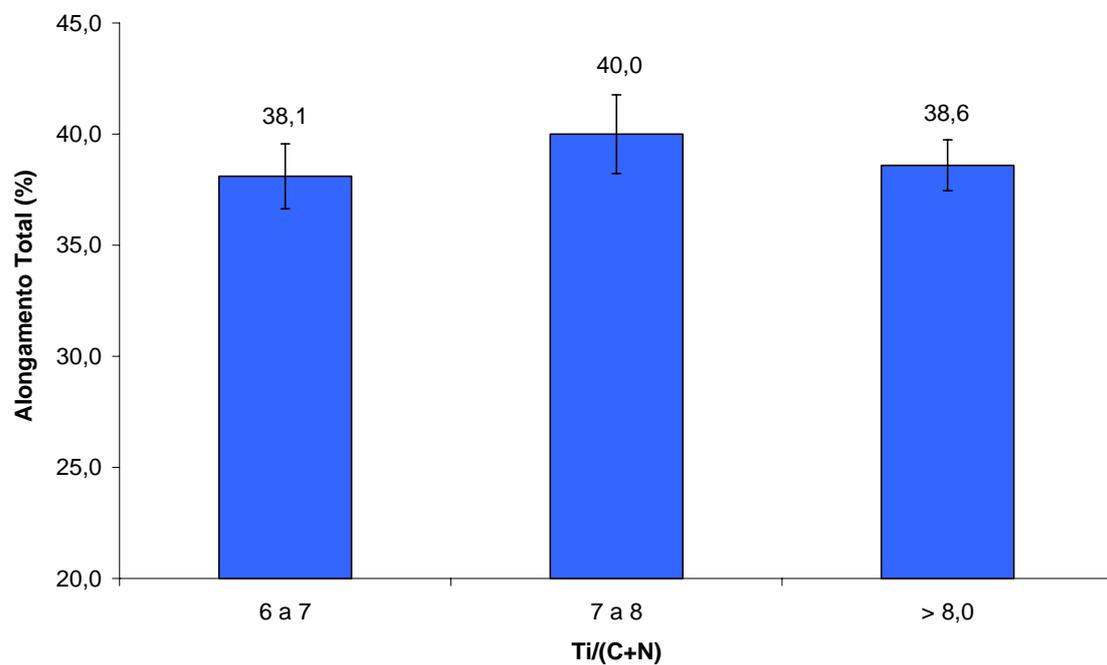


Figura 5.20 – Gráfico comparativo dos resultados laboratoriais do alongamento total (%) do aço P409A.

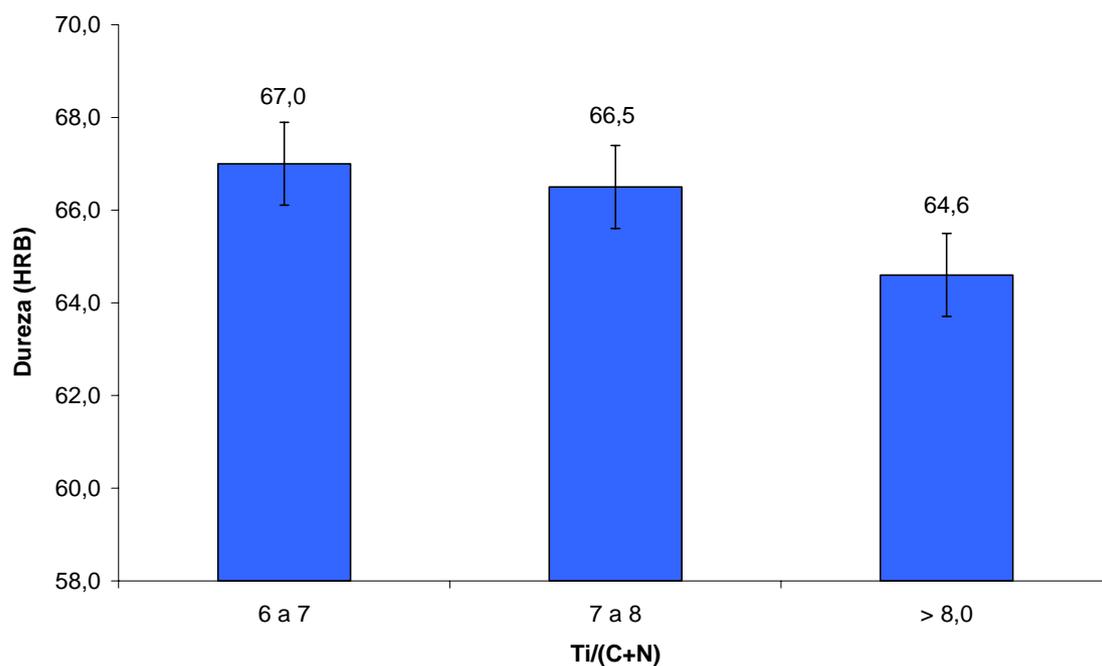


Figura 5.21 – Gráfico comparativo dos resultados laboratoriais da dureza (HrB) do aço P409A.

Pelas análises das figuras 5.18 a 5.21 constata-se que não há diferença significativa entre as propriedades mecânicas do aço P409A em relação às variações da relação de estabilização.

As figuras 5.22 e 5.23 apresentam as análises de micropureza das bobinas laminadas a frio números 901529H3000B [ $Ti/(C+N) = 7,0$  a  $8,0$ ] e 901528J2000B [ $Ti/(C+N) = 6,0$  a  $7,0$ ], respectivamente. Pelas análises das imagens, constata-se que não há diferença significativa entre as micropurezas dos materiais produzidos nas diferentes estabilizações, apresentando nível de inclusões da ordem de 1,5 a 2,0, conforme referência interna da AMIB para o aço P409A.

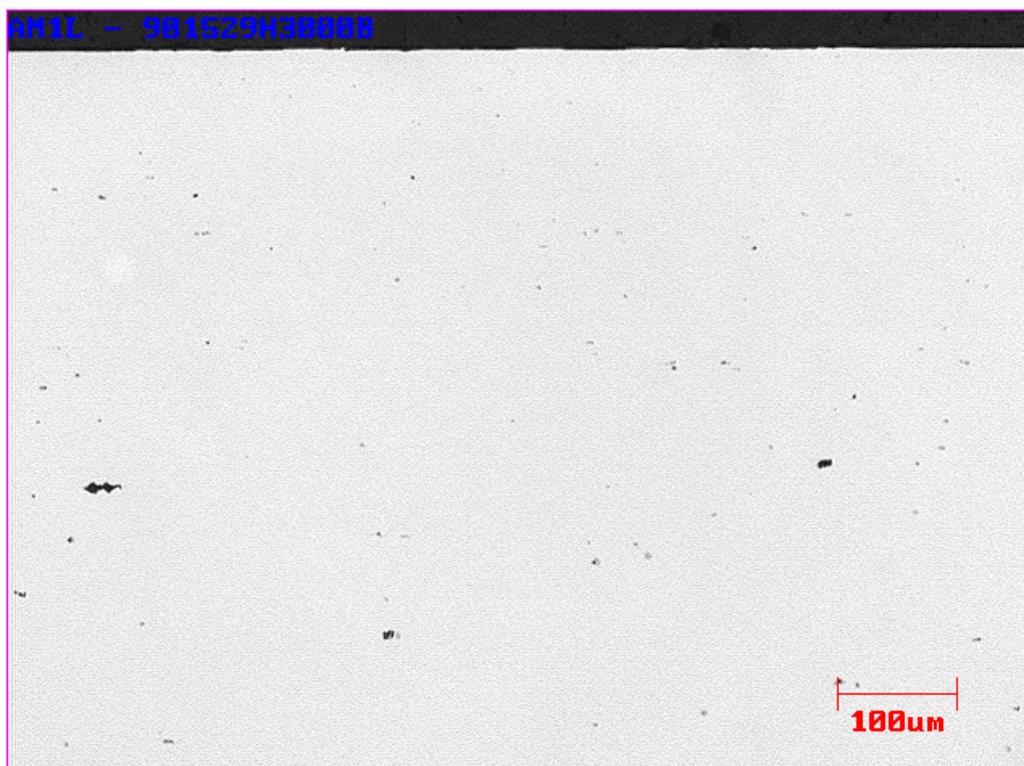


Figura 5.22 – Análise de micropureza da unidade metálica 901529H3000B [Ti/(C+N) entre 7,0 a 8,0].

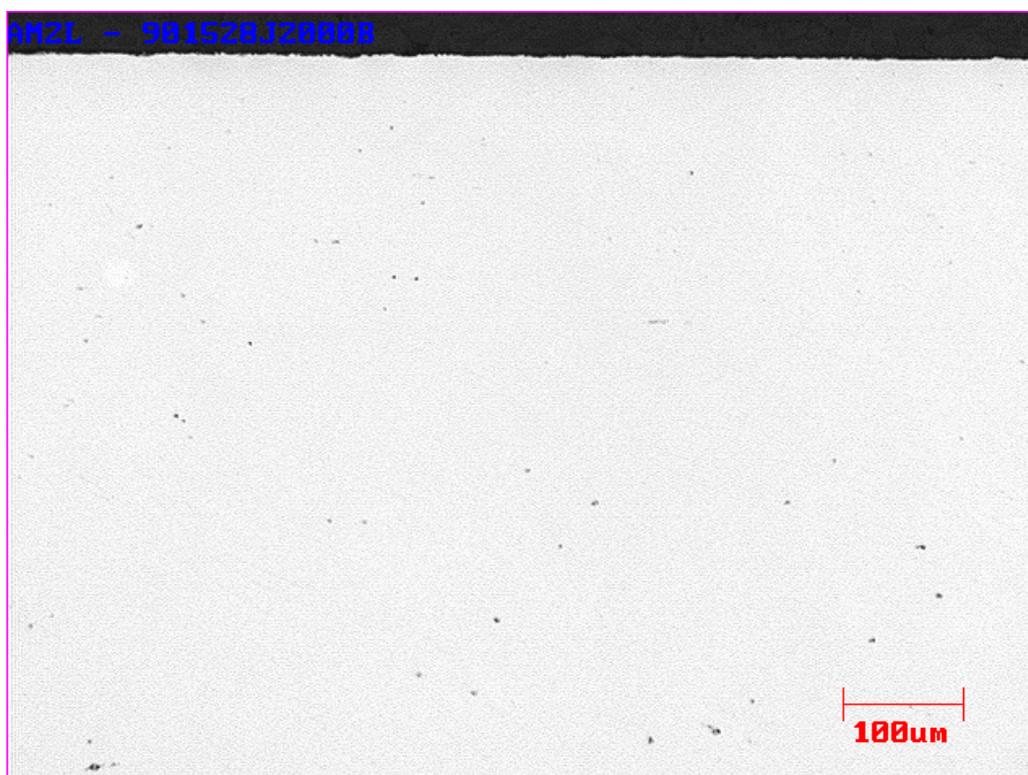


Figura 5.23 – Análise de micropureza da unidade metálica 901528J2000B [Ti/(C+N) entre 6,0 a 7,0].

A figura 5.24 mostra os resultados de anisotropia planar para valores de estabilização Ti/(C+N) entre 6,0 a 7,0; 7,0 a 8,0 e maiores do que 8,0. Constata-se que há uma redução no valor de anisotropia ( $\bar{r}$ ) com a redução no valor da estabilização. Esta redução não é preocupante uma vez que, conforme LABIAPARI (2003), com valores de  $\bar{r} > 1,0$ , o material apresenta uma boa estampabilidade. Esta pequena variação no  $\bar{r}$  é devido a uma maior deformação dos grãos no material com relação de estabilização menor do que 7,0, conforme se vê na figura 5.25.

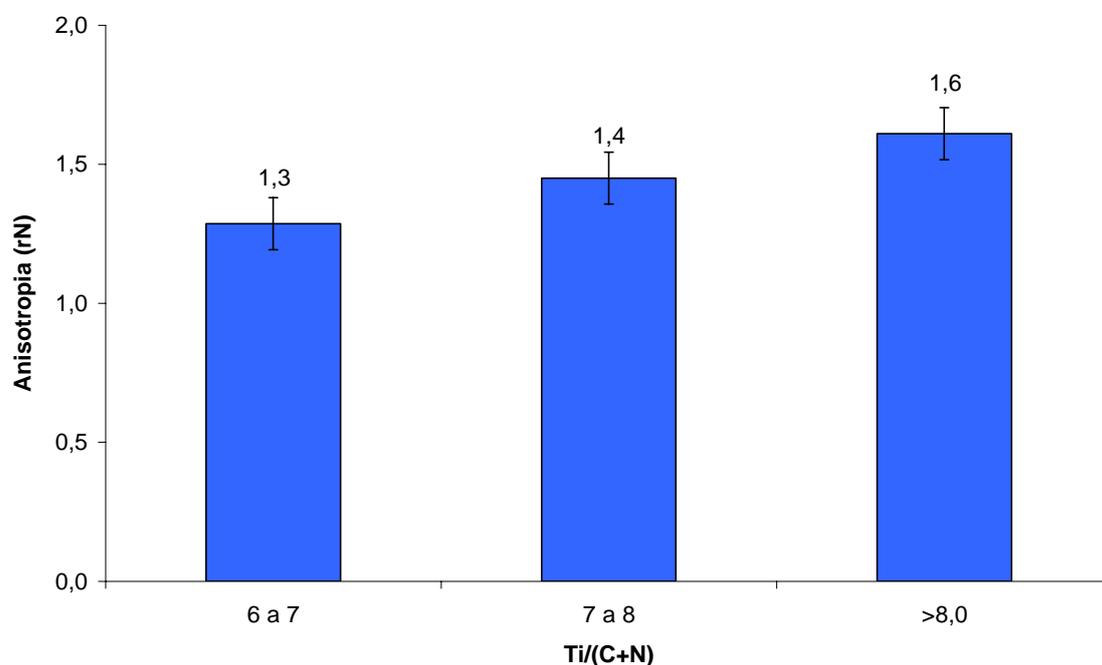


Figura 5.24 – Resultado de anisotropia planar para diferentes estabilizações do aço P409A.

O tamanho de grão médio das amostras analisadas com relação de estabilização menores do que 7,0 foram de 7,90 conforme anexo 10, sendo que a norma ASTM A240, exige o tamanho de grão para o aço P409A entre 5,0 a 9,0.

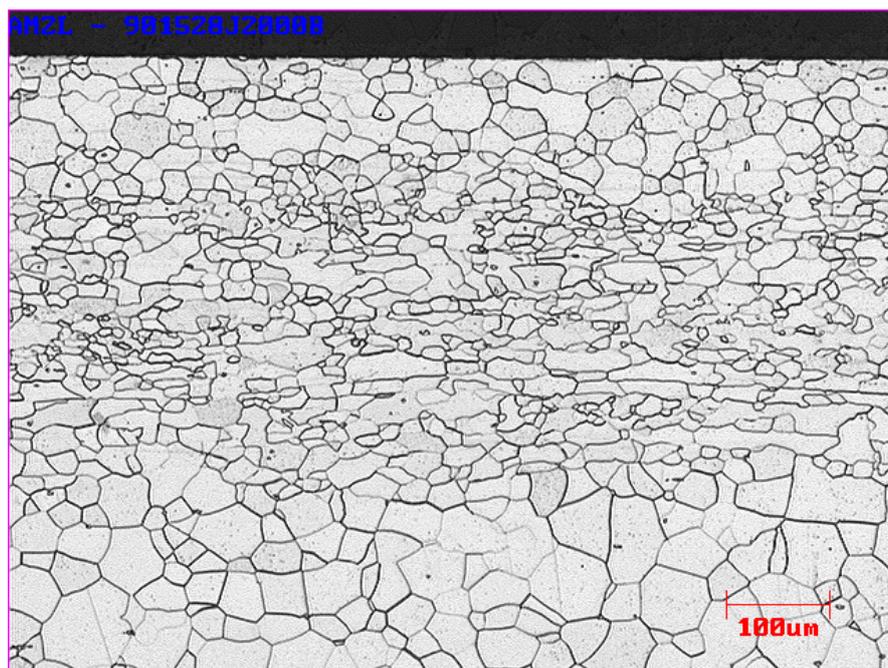


Figura 5.25 – Microestrutura do aço P409A para relação de estabilização menor do que 7,0.

A figura 5.26 mostra a microestrutura do aço P409A, para materiais com relação de estabilização maior do que 7,0, demonstrando uma boa recristalização e tamanho de grão médio igual a 7,02 conforme apêndice 10.

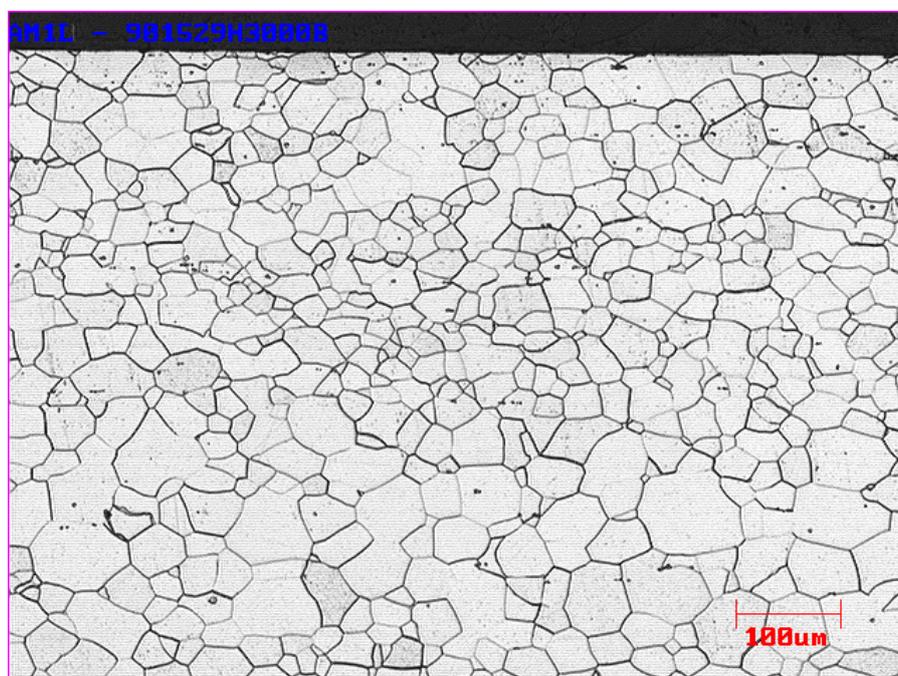


Figura 5.26 – Microestrutura do aço P409A para relação de estabilização maior do que 7,0.

A tabela V.3 apresenta os resultados médios e os respectivos desvios padrões 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 V.3 – Propriedades mecânicas média do aço P409A.

| Período             | Numero de amostras analisadas | LE 0,2 % (MPa) | LR (MPa)       | Al. 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 Abril 09 | 236                           | 247,80 ± 13,30 | 405,07 ± 9,73  | 39,14 ± 1,65  | 65,47 ± 1,83 |

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

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um estudo para reduzir o índice de obstrução das válvulas submersas durante o processo de lingotamento contínuo do aço P409A na ArcelorMittal Inox Brasil.

Foi constatada presença de óxidos de titânio ( $TiO_2$ ), de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e de magnésio (MgO) nas obstruções da válvula submersa e TiN no defeito esfoliação em BF.

Foi constatado que quanto maior o teor de Si e menor o teor de Ti final do aço, menor é a ocorrência de obstrução no lingotamento contínuo. Portanto, foi equacionada 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. O aumento do teor de Si final no aço e a alteração na granulometria da liga FeTi70 de 10 a 50 mm para 30 a 80 mm possibilitou um aumento no rendimento da mesma de 51% em 2006 para 58,7% 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 27,9% 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.

Não ocorreram alterações nas propriedades intrínsecas do aço (micropureza, limite de escoamento, limite de resistência, alongamento total e anisotropia) após as alterações na composição química, alteração no processo de adição e granulometria da liga FeTi70 no Forno Panela, visando garantir a relação Si/Ti maior do que 3,5.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Fazer testes experimentais na Aciaria visando aumentar o rendimento da liga FeTi70 no aço P409A através da raspagem de escória antes do processo de Forno Panela.

Produzir corridas do aço P409A através da rota Duplex (sem o processo de desgaseificação no VOD), visando aumentar a flexibilidade de produção do mesmo na aciaria da AMIB.

Correlacionar os índices de desvios por esfoliação e obstrução das válvulas submersas com a relação Si/Ti nos demais aços inoxidáveis ferríticos estabilizados ao titânio e nióbio.

Fazer uma análise estatística buscando determinar a variação das propriedades mecânicas antes e após as alterações de composição química do aço P409A.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. G., Apostila de Lingotamento Contínuo – Curso de Formação de Aciaristas na ArcelorMittal Inox Brasil, 80 f. Timóteo, 2008.

AMIB, Relatórios internos, ensaios de rotina e intranet. Relatórios e dados não divulgados, ARCELORMITTAL INOX BRASIL SA, Timóteo, 2008.

CARVALHO, J.L.R., et. alli, Dados Termodinâmicos para Metalurgistas, Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, 1977.

CARVALHO, M.A.N., Módulo Geral: Catálogo de Produtos Inox da Acesita, Seminário Inox 2000, Roças Novas-MG, 2000.

CASTRO, G.M., Estudo da Oxidação a Quente no Aço Inoxidável Ferrítico ABNT 430, 2005. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte.

CHOUDHARY, S.K. et alli., Thermodynamic Model for Deoxidation and Inclusion Precipitation in Liquid Steel, Tata Steel, p. 95-102, Jamshedur, Índia, 2002.

COSTA, A.M., Modelo Matemático na Zona de Mistura no Lingotamento Contínuo, 2003. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte.

CRAMB, A.W., et. alli, The Making, Shaping and Treating of Steel, AISE Steel Foundation, 11<sup>a</sup> ed., 2003, chapter 9.

FARIA, R.A., Efeito dos Elementos Ti e Nb no Comportamento em Fadiga de Aços Inoxidáveis Ferríticos Utilizados no Sistemas de Exaustão de Veículos Automotores, 2006. 268 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia, UFOP, Ouro Preto.

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.

HAHNE, C., Otimização do Processo de Desoxidação do Aço e Tratamento de Inclusões com Cálcio para Fundição no Lingotamento Contínuo, 1998. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte.

INFOMET (Informe Metalúrgico), [www.infomet.com.br/diagramas-fases-ver.php?e=mostrar&id\\_diagrama=246&btn\\_filtrar=ok](http://www.infomet.com.br/diagramas-fases-ver.php?e=mostrar&id_diagrama=246&btn_filtrar=ok) (Página da Internet, acessada em 12/2008).

ISSF (International Stainless Steel Forum), [www.worldstainless.org/Statistics/Crude/2007.html](http://www.worldstainless.org/Statistics/Crude/2007.html) (Página da Internet, acessada em 08/2008).

KARL, J. B., Press Formability of Stainless Steels, Stainless Steel 77, London, England, September, 1977.

LABIAPARI, W. da S., Influência de Diferentes Tipos de Acabamentos e Lubrificantes na Estampagem de Aços Inoxidáveis, 2003. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte.

LACOMBE, P.; BAROUX, B.; BERANGER, G., Stainless Steels, Les editions de Physique, 2000, p. 437-462.

MARCON, L., Estudo da Evolução das Inclusões do Aço SAE 8620 com o Tratamento de Inclusões com Cálcio em Escala Laboratorial, 2007. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre.

OGIBAYASHI, S., Mechanism and Countermeasure of Alumina Buildup on Submerged Nozzle in Continuous Casting, Taikabutsu Overseas, Futtsu, v.15, n.1, p. 3-13, 1995.

OLIVEIRA, L. J. S. de., Análise do Efeito do Uso de Inibidores de Turbulência e da Configuração da Válvula Submersa no Escoamento do Aço em Máquinas de Lingotamento Contínuo de Placas, 2003. 48 f. Trabalho Final de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte.

PEREIRA, R. O. da S., Modelamento Matemático do Escoamento Turbulento, da Transferência de Calor e da Solidificação no Distribuidor e na Máquina de Lingotamento Contínuo, 2004. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte.

RACKERS, K.G., THOMAS, B.G., Clogging in Continuous Casting Nozzles, 78<sup>th</sup> Steelmaking Conference Proceedings, v. 78, p. 723-734, 1995, Nashville, United States.

RIBEIRO, D. B., et. alli, Apostila de Refino Secundário dos Aços – Programa de Educação Continuada da ABM, Belo Horizonte, 2002.

SILVA, J.N., Análise da Conformação a Frio do Aço ABNT 430 Modificado por Nb, Al, Al-Nb e Al-Ti, UFMG, 1990, p31-35.

TURKDOGAN, E.T., Fundamentals of Steelmaking, 1<sup>th</sup> ed., Cambridge: The Institute of Materials, The University Press, 1996.

VIANA, C. S. de C., Seminário Inox – Módulo Estampagem, nº1, Roças Novas, 2000, p10-18.

XIAOBING, Z. et al., Deoxidation Modelling of Steelmaking Process, 2<sup>th</sup> International Conference on Process Development, p 6-9, 2004.

## **BIBLIOGRAFIA**

COELHO, E.N., Avaliação da Anisotropia em Chapas de Aços ABNT 430 e ABNT 430 Estabilizado ao Nióbio e Nióbio-Titânio, 2000. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte.

HOJO, M.; et.alli, Oxide Inclusion Control in Ladle and Tundish for Producing Clean Stainless Steel, ISIJ International, v.36, p. S128-S131, 1996.

JANKE, D.; et.alli, Improvement of Castability and Quality of Continuously Cast Steel, ISIJ International, v.40, n.1, p.31-39, 2000.

JUNG, S.M.; FRUEHAN, R.J., Thermodynamics of Titanium Oxide in Ladle Slags, ISIJ International, v.41, n.12, p. 1447-1453, 2001.

JUNQUEIRA, C.E., Análise das Variáveis de Processo de Aciaria na Formação e Eliminação de Macro-Inclusões nos Aços ao Boro, 1989. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte.

KAWASHITA, Y.; SUITO, H., Precipitation Behavior of Al-Ti-O-N Inclusions in Unidirectionally Solidified Fe-30mass%Ni Alloy, ISIJ International, v.35, n.12, p.1468-1476, 1995.

MAPELLI, C.; NOLLI, P., Formation Mechanism of Non-Metallic Inclusions in Different Stainless Steel Grades, ISIJ International, v.43, n.8, p. 1191-1199, 2003.

MARIN, H., Modelamento Matemático do Refino Secundário do Aço Inoxidável em Conversores AOD-L, 2006. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte.

PARK, J.H.; KIM, D.S., Effect of CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO Slags on the Formation of MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Inclusions in Ferritic Stainless Steel, Metallurgical and Materials Transactions B, v.36B, p.495-502, 2005.

SASAI, K.; MIZUKAMI, Y., Mechanism of Alumina Adhesion to Continuous Caster Nozzle with Reoxidation of Molten Steel, ISIJ, v.41, n.11, p.1331-1339, 2001.

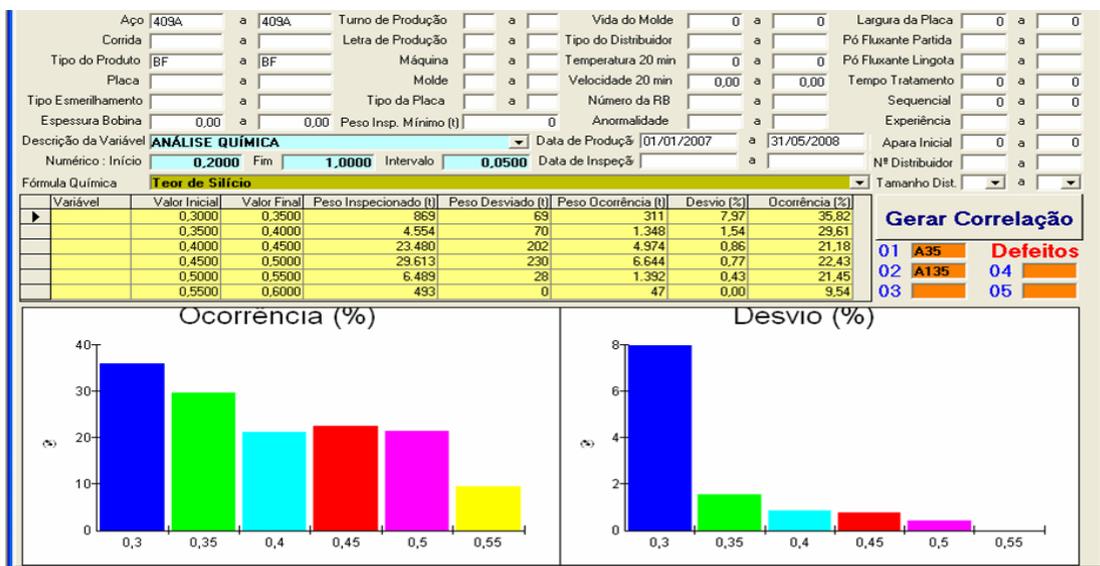
## APÊNDICE

### Apêndice 1:

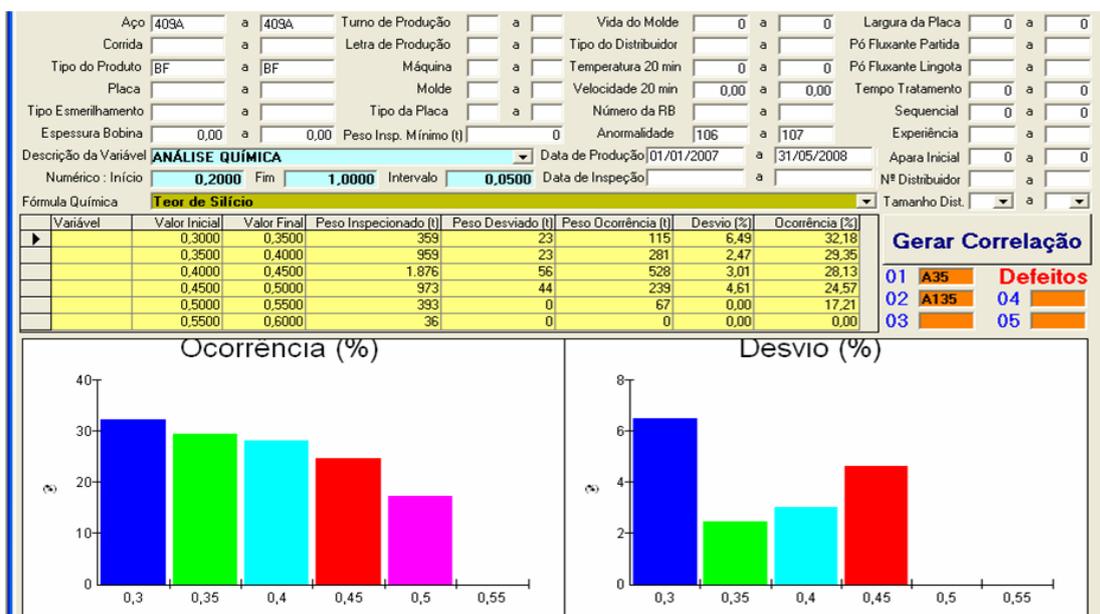
Correlações para cálculo da porcentagem de Si versus obstrução.

Análises Estatística através do Programa SAI (Sistema de Acompanhamento do Inox)

Correlação para levantamento do volume inspecionado.



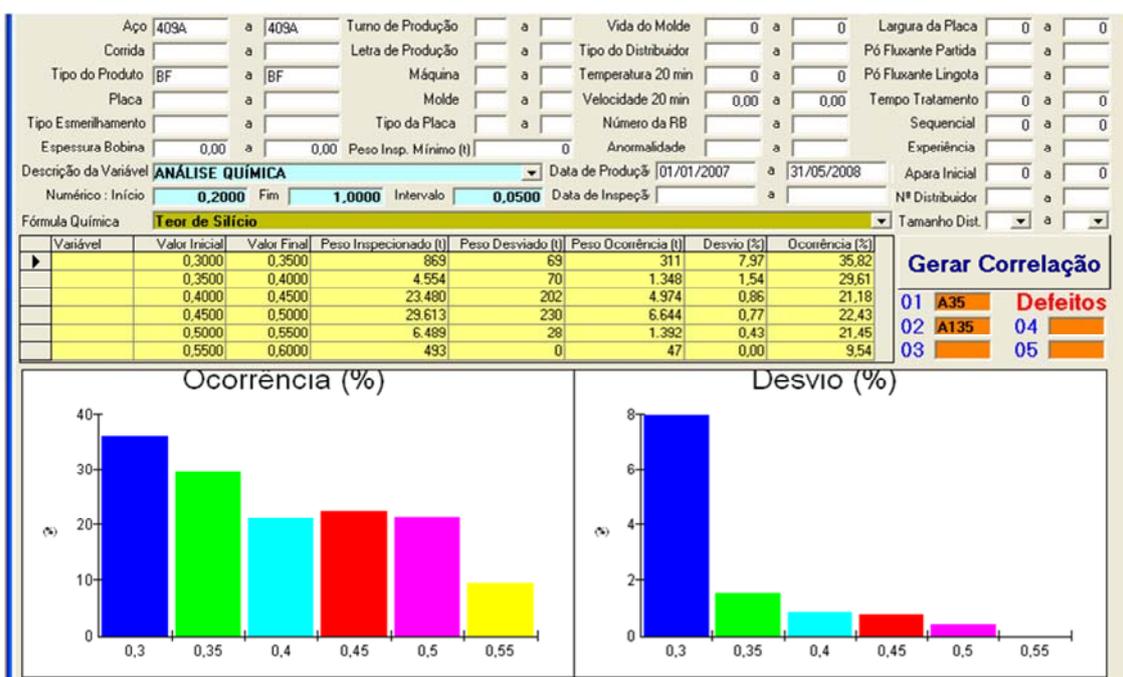
Correlação para levantamento do volume inspecionado que apresentou obstrução.



## Apêndice 2:

Correlações para cálculo da porcentagem de Si versus índice de desvios por esfoliação em bobinas laminadas a frio.

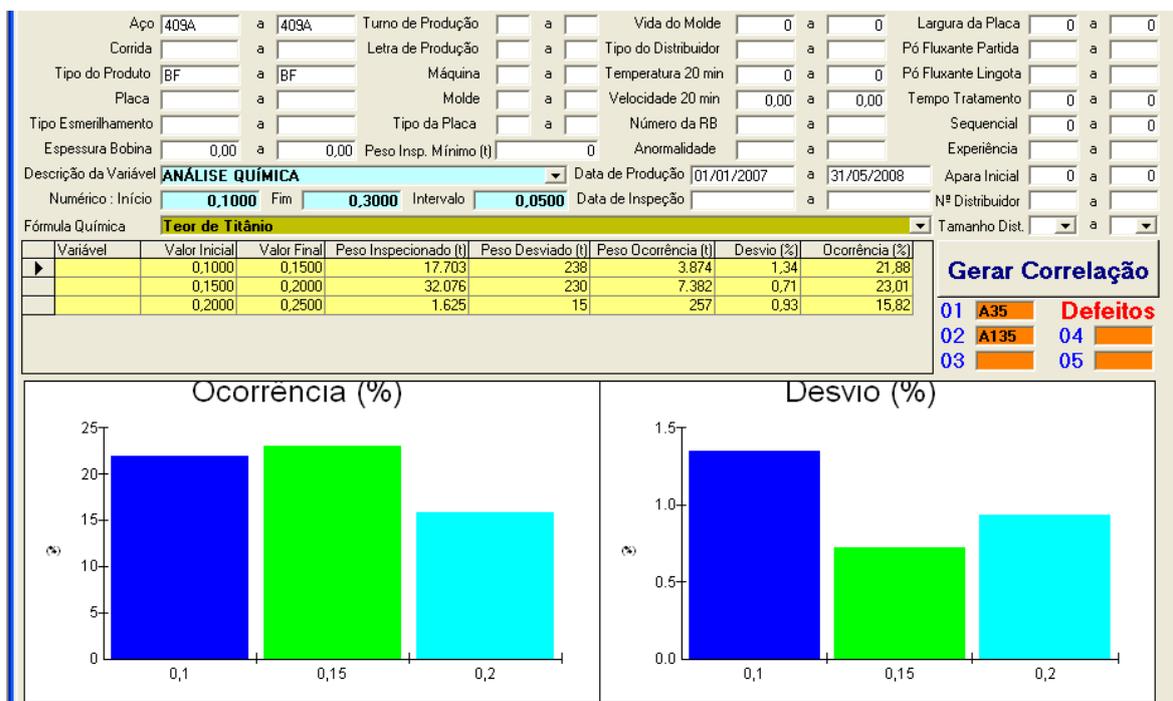
Análises Estatística através do Programa SAI (Sistema de Acompanhamento do Inox)



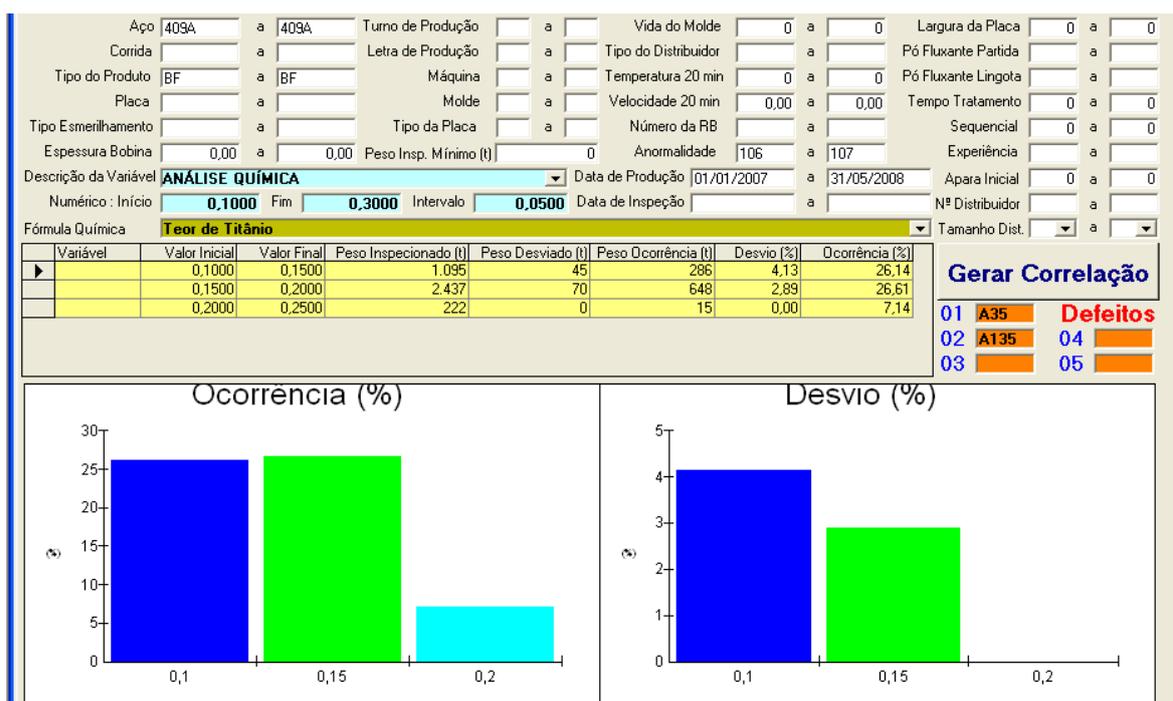
### Apêndice 3:

Correlações para cálculo da porcentagem de Ti versus obstrução.

Análises Estatística através do Programa SAI (Sistema de Acompanhamento do Inox)



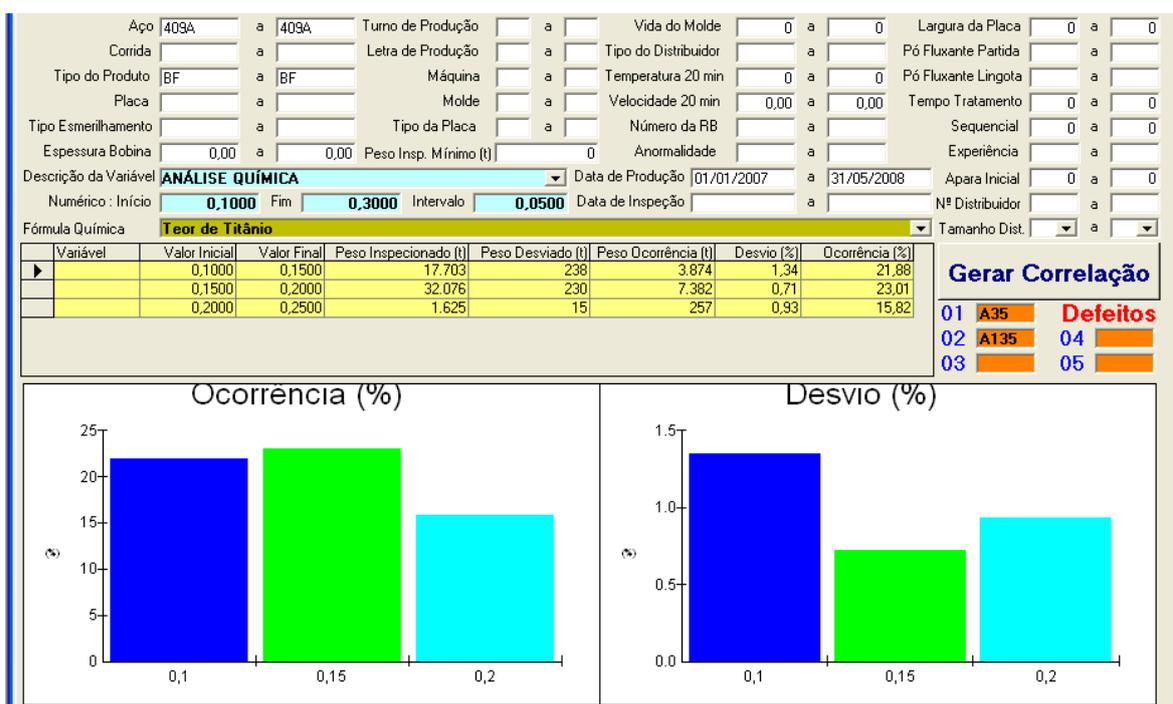
Correlação para levantamento do volume inspeccionado que apresentou obstrução.



## Apêndice 4:

Correlações para cálculo da porcentagem de Ti versus índice de desvios por esfoliação em bobinas laminadas a frio.

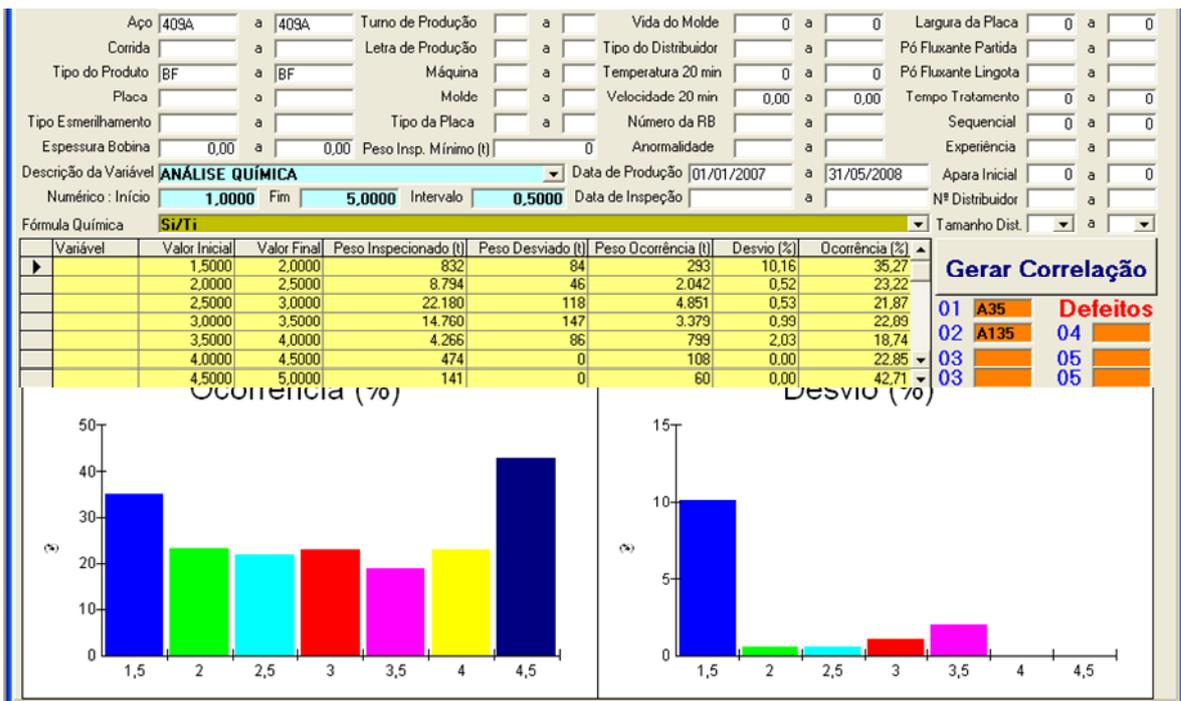
Análises Estatística através do Programa SAI (Sistema de Acompanhamento do Inox)



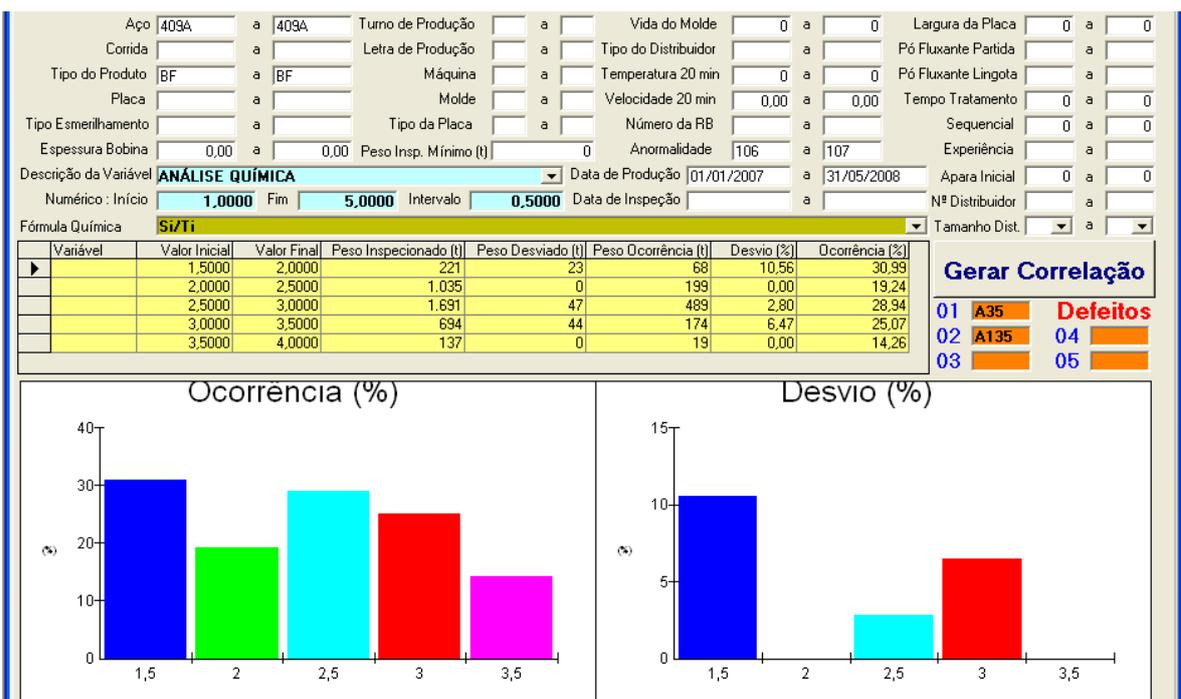
## Apêndice 5:

Correlações para cálculo da relação Si/Ti versus obstrução.

Análises Estatística através do Programa SAI (Sistema de Acompanhamento do Inox)



Correlação para levantamento do volume inspeccionado que apresentou obstrução.



## Apêndice 6:

### Evolução do Índice de Esmerilhamento de Placas

| Dados para o gráfico | Media |
|----------------------|-------|
| 2006                 | 43,1  |
| 2007                 | 39,1  |
| 2008                 | 31,9  |
| Até Abril 2009       | 27,6  |

Fonte: SIP (Sistema de Informação de Processo da ArcelorMittal Inox Brasil).

## Apêndice 7:

Correlações para cálculo do índice de desvio por obstrução em bobinas laminadas à frio por ano (2006 a maio de 2009).

Análises Estatística através do Programa SAI (Sistema de Acompanhamento do Inox)

Ano de 2006:

| Variável         | Valor Inicial | Valor Final | Peso Inspeccionado (t) | Peso Desviado (t) | Peso Ocorrência (t) | Desvio (%) | Ocorrência (%) |
|------------------|---------------|-------------|------------------------|-------------------|---------------------|------------|----------------|
| LARGURA DA PLACA | 1,0000        | 1,501,0000  | 43,423                 | 827               | 13,697              | 1,90       | 31,54          |

Ano de 2007:

| Variável         | Valor Inicial | Valor Final | Peso Inspeccionado (t) | Peso Desviado (t) | Peso Ocorrência (t) | Desvio (%) | Ocorrência (%) |
|------------------|---------------|-------------|------------------------|-------------------|---------------------|------------|----------------|
| LARGURA DA PLACA | 1,0000        | 1,501,0000  | 37,578                 | 405               | 9,155               | 1,07       | 24,36          |

Ano de 2008:

**Lingotamento Contínuo**

Descrição Correlação: **409A A35**

Aço 409A a 409A Turno de Produção  a  Vida do Molde 0 a 0 Largura da Placa 0 a 0  
 Corrida  a  Letra de Produção  a  Tipo do Distribuidor  a  Pó Fluxante Partida  a   
 Tipo do Produto BF a BF Máquina  a  Temperatura 20 min 0 a 0 Pó Fluxante Lingota  a   
 Placa  a  Molde  a  Velocidade 20 min 0,00 a 0,00 Tempo Tratamento 0 a 0  
 Tipo Esmerilhamento  a  Tipo da Placa  a  Número da RB  a  Sequencial  a   
 Espessura Bobina 0,00 a 0,00 Peso Insp. Mínimo (t) 0 Anormalidade  a  Experiência  a   
 Descrição da Variável: **LARGURA DA PLACA** Data de Produção 01/01/2008 a 31/12/2008 Apar. Inicial 0 a 0  
 Numérico: Início 1.000 Fim 1.501.000 Intervalo 1.500.000 Data de Inspeção  a  Nº Distribuidor  a   
 Tamanho Dist.  a

| Variável | Valor Inicial | Valor Final | Peso Inspeccionado (t) | Peso Desviado (t) | Peso Ocorrência (t) | Desvio (%) | Ocorrência (%) |
|----------|---------------|-------------|------------------------|-------------------|---------------------|------------|----------------|
| ▶        | 1.000         | 1.501.000   | 28.728                 | 170               | 5.801               | 0,59       | 20,19          |

**Gerar Correlação**

01 A135 Defeitos  
02 A35 04

Até 31/05/2009:

**Lingotamento Contínuo**

Descrição Correlação: **409A A35**

Aço 409A a 409A Turno de Produção  a  Vida do Molde 0 a 0 Largura da Placa 0 a 0  
 Corrida  a  Letra de Produção  a  Tipo do Distribuidor  a  Pó Fluxante Partida  a   
 Tipo do Produto BF a BF Máquina  a  Temperatura 20 min 0 a 0 Pó Fluxante Lingota  a   
 Placa  a  Molde  a  Velocidade 20 min 0,00 a 0,00 Tempo Tratamento 0 a 0  
 Tipo Esmerilhamento  a  Tipo da Placa  a  Número da RB  a  Sequencial  a   
 Espessura Bobina 0,00 a 0,00 Peso Insp. Mínimo (t) 0 Anormalidade  a  Experiência  a   
 Descrição da Variável: **LARGURA DA PLACA** Data de Produção 01/01/2009 a 31/05/2009 Apar. Inicial 0 a 0  
 Numérico: Início 1.000 Fim 1.501.000 Intervalo 1.500.000 Data de Inspeção  a  Nº Distribuidor  a   
 Tamanho Dist.  a

| Variável | Valor Inicial | Valor Final | Peso Inspeccionado (t) | Peso Desviado (t) | Peso Ocorrência (t) | Desvio (%) | Ocorrência (%) |
|----------|---------------|-------------|------------------------|-------------------|---------------------|------------|----------------|
| ▶        | 1.000         | 1.501.000   | 6.303                  | 31                | 1.404               | 0,49       | 22,28          |

**Gerar Correlação**

01 A135 Defeitos  
02 A35 04

## Apêndice 8:

Evolução do Rendimento da Liga FeTi70:

| Dados para o gráfico | Anual |
|----------------------|-------|
| 2003                 | 34,0  |
| 2004                 | 43,0  |
| 2005                 | 49,0  |
| 2006                 | 51,0  |
| 2007                 | 54,3  |
| 2008                 | 54,6  |
| 2009                 | 58,7  |

Fonte: SIP (Sistema de Informação de Processo da ArcelorMittal Inox Brasil).

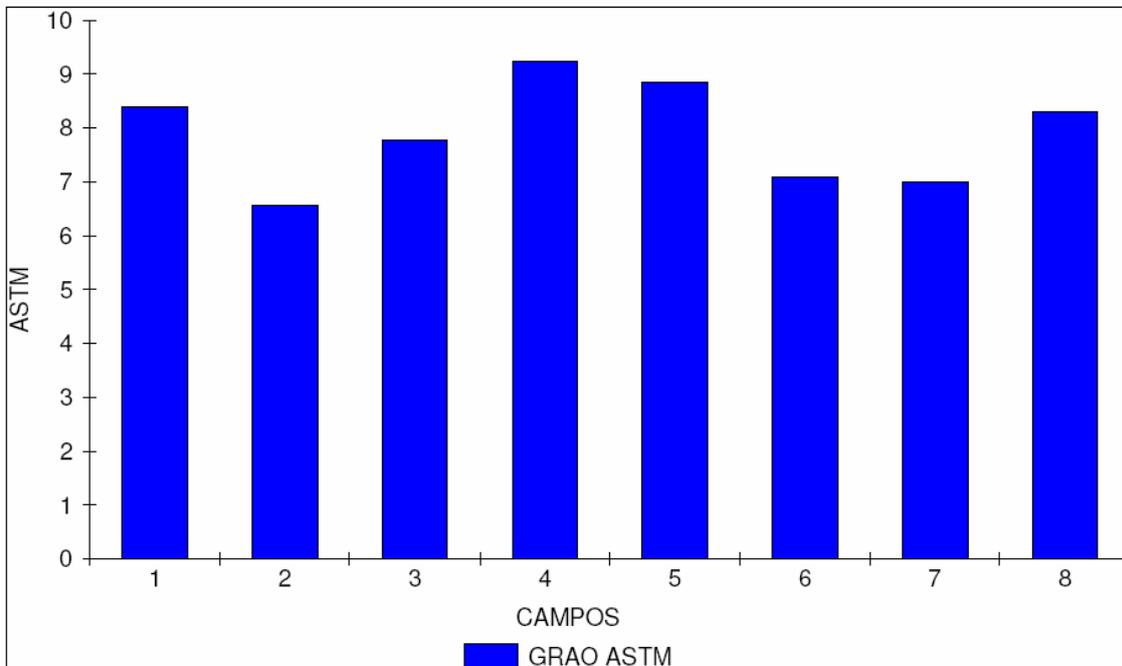
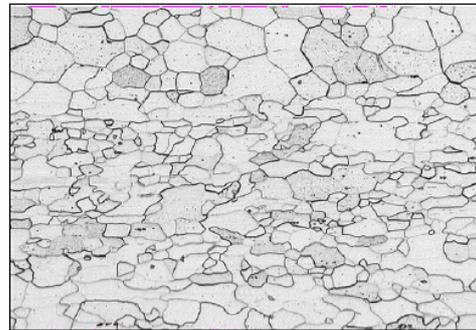
## Apêndice 9:

Tamanho de grão médio da unidade metálica 901528J2000B com relação de Estabilização Ti/(C+N) entre 6,0 a 7,0.

### CÁLCULO DO TAMANHO DE GRÃO MÉDIO MÉTODO ABRAMS ASTM E112 - 3 CÍRCULOS CONCENTRICOS

|                            |          |                 |
|----------------------------|----------|-----------------|
| IDENTIFICACAO              | AM2E     |                 |
| AUMENTO                    | 200X     |                 |
| DATA                       | 07/09/09 |                 |
| NUMERO DE CAMPOS           | 8        |                 |
| AREA DO CAMPO              | 0.13994  | mm <sup>2</sup> |
| AREA TOTAL ANALISADA       | 1.1195   | mm <sup>2</sup> |
| INTERVALO DE CONFIANCA 95% | 13.755   | %               |
| PRECISAO RELATIVA          | 27.107   | %               |

| Grao ASTM | G       | DiamEquiv |
|-----------|---------|-----------|
| Average   | 7.9064  | 24.351    |
| StdDev    | 0.95293 | 7.9710    |
| Minimum   | 6.5758  | 14.565    |
| Maximum   | 9.2526  | 36.832    |



**Apêndice 10:**

Tamanho de grão médio da unidade metálica 901529H3000B com relação de Estabilização  $Ti/(C+N) > 7,0$ .

**CÁLCULO DO TAMANHO DE GRÃO MÉDIO MÉTODO ABRAMS  
ASTM E112 - 3 CÍRCULOS CONCENTRICOS**

|                            |          |                 |
|----------------------------|----------|-----------------|
| IDENTIFICACAO              | AM1E     |                 |
| AUMENTO                    | 200X     |                 |
| DATA                       | 07/09/09 |                 |
| NUMERO DE CAMPOS           | 8        |                 |
| AREA DO CAMPO              | 0.13994  | mm <sup>2</sup> |
| AREA TOTAL ANALISADA       | 1.1195   | mm <sup>2</sup> |
| INTERVALO DE CONFIANCA 95% | 4.6278   | %               |
| PRECISAO RELATIVA          | 12.837   | %               |

| Grao ASTM | G       | DiamEquiv |
|-----------|---------|-----------|
| Average   | 7.0244  | 31.893    |
| StdDev    | 0.46231 | 5.2759    |
| Minimum   | 6.2975  | 26.928    |
| Maximum   | 7.4796  | 40.562    |

