

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
Departamento de Metalurgia

**Engenharia de Inclusões Aplicada a Produção do Aço SAE 8620
na Aciaria**

Wagner Viana Bielefeldt

Trabalho de Diplomação

Porto Alegre

2003

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
Departamento de Metalurgia

**Engenharia de Inclusões Aplicada a Produção do Aço SAE 8620
na Aciaria**

Wagner Viana Bielefeldt

Matrícula: 3000/98-6

Trabalho de Diplomação para obtenção de
diploma no curso de Engenharia
Metalúrgica

Orientadores: Prof. Antonio C. F. Vilela

Prof. Carlos A. M. Moraes

Porto Alegre

2003

AGRADECIMENTOS

“Aos meus orientadores pelas oportunidades e pela confiança em meu trabalho”;

Aos bolsistas de iniciação científica cujo trabalho foi fundamental: Ayumi, Marino, Susana e Márcio;

Ao pessoal da aciaria da Gerdau Aços Finos Piratini pela ajuda na realização deste trabalho;

Aos amigos e colegas do LASID pela amizade e cooperação;

A minha família, cujo exemplo muito me inspira;

A Deus, verdadeira fonte para a superação das dificuldades.”

RESUMO

Aços de alta qualidade são cada vez mais requisitados pelo mercado. Conhecer a fundo os fenômenos que regem o refino desses aços é fundamental se as empresas querem sobreviver em um mercado cada vez mais competitivo. Desta forma, o conceito de Engenharia de Inclusões engloba as técnicas mais recentes para a otimização da produção de aços especiais. Mostrar o estado da arte deste conceito, desenvolver uma metodologia de aplicação e utilizar a ferramenta de simulação termodinâmica computacional para a otimização da produção de aços especiais são os objetivos deste trabalho. O estado da arte nos mostra onde estamos e onde podemos chegar a nível de práticas de produção. Desenvolver uma metodologia de aplicação é fundamental para a coleta de dados de produção e o conhecimento do perfil micro-inclusionário da prática atual. Por sua vez, para se chegar ao perfil ideal de inclusões torna-se fundamental a utilização da ferramenta computacional, em vista de que a produção de aços especiais torna-se cada vez mais complexa. A ferramenta computacional utiliza por sua vez, modelos termodinâmicos que devem ser perfeitamente entendidos. Neste trabalho, são mostrados os resultados obtidos pelo levantamento de dados. Além disso, foi obtido o perfil atual de microinclusões ao longo de todo o processo. Na última etapa deste trabalho, os resultados de análises químicas do aço e escória da prática industrial são comparados com os obtidos via simulação. Considerações são feitas com respeito à questão do equilíbrio termodinâmico das reações que ocorrem durante o refino do aço SAE 8620 na etapa do forno-panela.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1. O QUE SÃO INCLUSÕES NÃO METÁLICAS?	3
3.2. ENGENHARIA DE INCLUSÕES	4
3.3. FORMAÇÃO E SUBSEQUENTE MODIFICAÇÃO DE INCLUSÕES	6
3.3.1 Aços acalmados ao Mn-Si ou “Mn-Si semi-killed steels”	7
3.3.2 Aços acalmados ao Al ou “Aluminium killed steels”	11
3.3.2.1 Tratamento com cálcio	12
3.3.2.2 Efeito do MgO nas inclusões do sistema Al ₂ O ₃ - CaO	13
3.4. MODELAMENTO TERMODINÂMICO	14
3.5. O SOFTWARE FACTSAGE	17
3.6 MODELAMENTO COMBINADO	18
4. MATERIAIS E MÉTODOS	19
4.1 PLANTA INDUSTRIAL	19
4.2 PRODUÇÃO DE AÇOS ESPECIAIS VIA ACIARIA ELÉTRICA	22
4.2.1. Forno Elétrico a Arco	23
4.2.2. Forno-Panela (FP)	23
4.2.3 Desgaseificação a vácuo.....	24
4.2.4. Lingotamento Contínuo (LC).....	25
4.2.4.1. Panela e Distribuidor	25
4.2.4.2. Molde.....	26
4.2.5. Lingotamento Convencional	26
4.3. MATERIAIS UTILIZADOS: AÇOS PARA CEMENTAÇÃO - SAE 8620	27
4.4 FLUXO DE PROCESSO DO AÇO SAE 8620 NA ACIARIA	28
4.4.1. Introdução.....	28
4.4.2. Amostragem e equipamentos utilizados para análise química	29
4.4.3. Descrição do Processo	30
4.5. LEVANTAMENTO ESTATÍSTICO DA PRODUÇÃO	31
4.6. EVOLUÇÃO DAS INCLUSÕES AO LONGO DO PROCESSO	32
4.6.1. Introdução.....	32
4.6.2. Amostragem	33

4.6.3	Preparação dos corpos de prova e análise das inclusões	33
4.7.	<i>SIMULAÇÃO DO EQUILÍBRIO AÇO/ESCÓRIA/INCLUSÕES</i>	36
4.7.1.	Bancos de dados	36
4.7.2.	Modelo de Minimização da Energia de Gibbs	37
4.7.3.	Modulos disponíveis no software	37
4.7.4.	Simulando o equilíbrio aço/escória/inclusões	39
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1	<i>LEVANTAMENTO ESTATÍSTICO DA PRODUÇÃO</i>	45
5.2	<i>DETERMINAÇÃO DA MASSA DE ESCÓRIA DURANTE O REFINO DO AÇO NO FORNO-PANELA</i>	48
5.2.1.	Determinação da massa de escória na panela pela sua densidade.....	48
5.2.2.	Determinação da massa de escória na panela via balanço de massa	49
5.2.3.	Estimativa da planta	52
5.3	<i>EVOLUÇÃO DAS INCLUSÕES AO LONGO DO PROCESSO</i>	52
5.3.1.	Evolução da composição química das inclusões	52
5.3.2.	Contagem de inclusões	56
5.4	<i>SIMULAÇÃO DO EQUILÍBRIO AÇO/ESCÓRIA</i>	58
6.	CONCLUSÕES	72
7.	CONTINUAÇÃO DO TRABALHO	74
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

1. INTRODUÇÃO

A demanda por aços especiais é crescente nas últimas décadas, assim como o conceito de qualidade para esses aços tem se tornado cada vez mais exigente. Além disso, é preciso garantir que esses aços tenham um desempenho superior frente às severas condições de serviço impostas. Deste modo, a fabricação desses aços tem se tornado cada vez mais complexa, exigindo das siderúrgicas um grande esforço na total compreensão dos fenômenos metalúrgicos envolvidos na manufatura de aços especiais.

Para atingir essa meta, as siderúrgicas têm firmado convênios com universidades e centros de pesquisa para realizar estudos sobre esses fenômenos.

A UFRGS e UNISINOS participam atualmente de um convênio (FNDCT / VERDE AMARELO nº 01.02.0269.00) em conjunto com a Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP e GERDAU S.A. cujo projeto intitula-se “Desenvolvimento de Novos Produtos e Otimização de Processos de Fabricação de Aços Especiais no Grupo Gerdau”.

A finalidade geral desse projeto é, por meio de projetos de pesquisa entre a Gerdau Aços Finos Piratini e as universidades, dar continuidade aos processos de desenvolvimento nas áreas de aciaria, laminação e acabamento mecânico buscando atender as crescentes demandas por produtos de maior conteúdo tecnológico.

O projeto possui um prazo de execução de 12 meses, iniciado em fevereiro de 2003, com possibilidade de extensão. O projeto está dividido em dez metas físicas, envolvendo diversos grupos de pesquisa das universidades já citadas.

Este trabalho de diplomação está inserido na Meta 1: Modelo Combinado Termodinâmico, Físico e Matemático para a Aciaria. Nessa meta, participam o Laboratório de Siderurgia, o Laboratório de Metalurgia Física (UFRGS) e o Núcleo de Caracterização de Materiais da UNISINOS.

O fluxograma que define a meta 1 está esquematizado na figura 1.1.

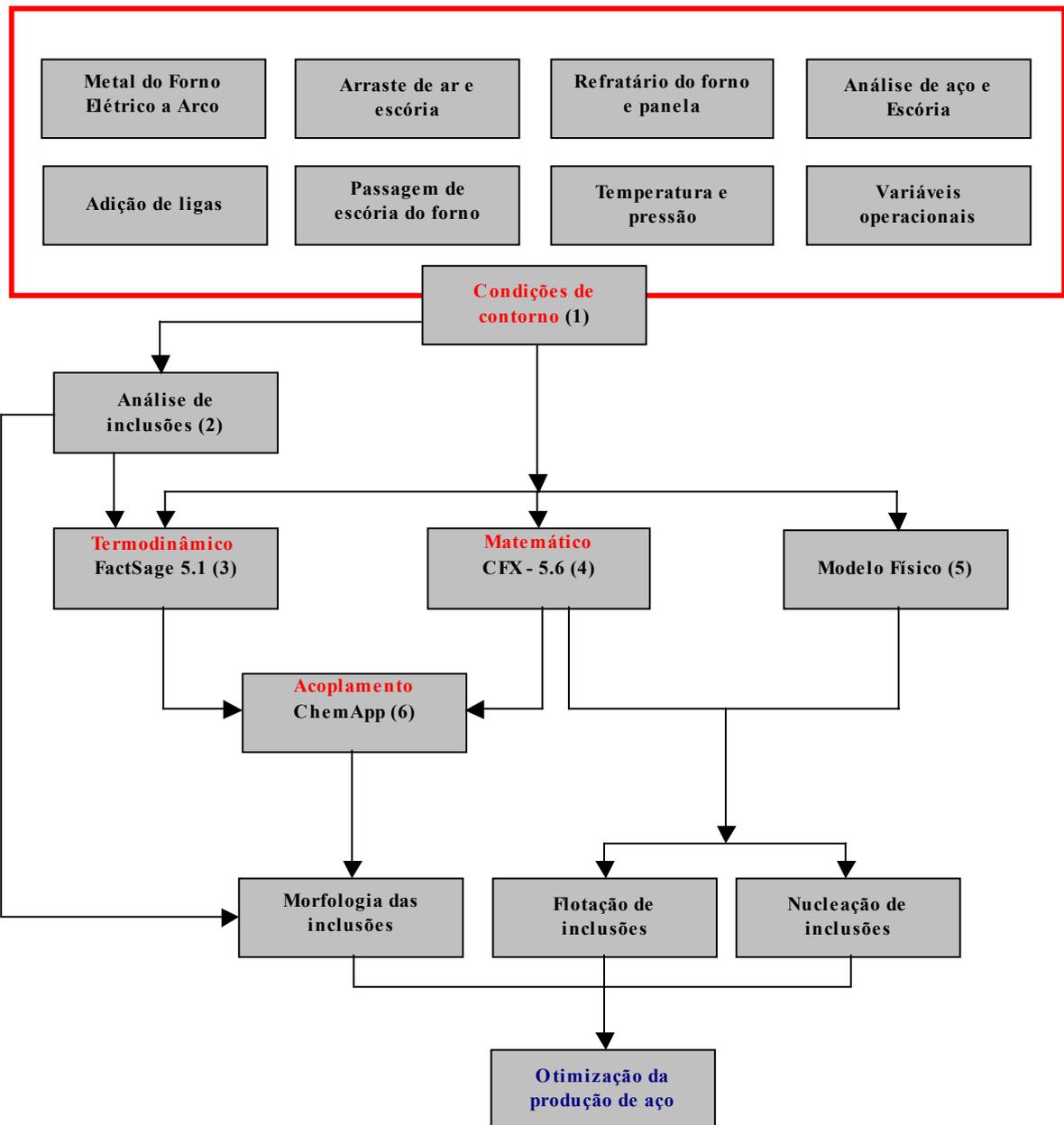


Figura 1.1 - Fluxograma da Meta 1- Modelo Combinado Termodinâmico, Físico e Matemático para a Aciaria.

Partindo das condições de contorno, que são os dados obtidos na planta industrial, o projeto está dividido em três áreas: modelo termodinâmico (1,2,3), matemático (1,4) e físico (1,5). Os modelos (1-6) combinados, devem produzir resultados para a otimização da produção de aços especiais.

Dentro deste contexto, o presente trabalho envolve o estudo das condições de contorno (obtenção de dados da planta) relacionadas a uma qualidade específica de aço, a análise de inclusões e utilização do modelo termodinâmico como ferramentas para melhoria da qualidade dos aços especiais produzidos na Gerdau Aços Finos Piratini. Em discussão

conjunta com engenheiros da planta e membros de equipe executora da meta mencionada, foi escolhido o aço SAE 8620 para este estudo.

Importante destacar que este trabalho será a base para um estudo mais aprofundado à nível de mestrado do autor deste trabalho de diplomação.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivos:

Apresentar o conceito de “Engenharia de Inclusões” bem como mostrar o estado da arte deste conceito.

Desenvolver uma metodologia de aplicação da engenharia de inclusões na produção de aços especiais.

Utilizar a ferramenta de simulação termodinâmica (software FactSage) para a otimização da produção de aços especiais, no que diz respeito às interações metal líquido-escória-inclusões durante o refino secundário no forno-panela para a qualidade de aço SAE 8620.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. O QUE SÃO INCLUSÕES NÃO METÁLICAS?

Leal (2000) descreve em seu trabalho que as inclusões não-metálicas são partículas de segunda fase não metálica dispersas na matriz metálica, com relação à sua natureza, tamanho e distribuição.

Leal (2000) define em seu trabalho os dois tipos de inclusões comumente encontrados em aços. Essa classificação é baseada no tamanho médio das inclusões:

a) Inclusões de pequeno tamanho (micro-inclusões) – são geralmente de origem endógena. Essas inclusões são formadas nas reações de refino (inclusões primárias) ou resfriamento do aço por precipitação (inclusões secundárias), por meio de reações relacionadas à adição de elementos que possuem alta afinidade pelo oxigênio, enxofre e nitrogênio.

b) Inclusões de grande tamanho (macro-inclusões) – possuem um diâmetro médio maior ou igual a 50 μm . São geralmente de origem exógena (arraste de escória, por exemplo), apesar de também poderem ser de origem endógena (aglomeração de micro-inclusões, por exemplo).

Com relação às micro-inclusões, Finardi (1984) afirma que devido à alta afinidade de alguns elementos pelo oxigênio (destacando-se alumínio e cálcio), elas não podem ser totalmente eliminadas. Assim, procura-se diminuir a sua quantidade por meio de refino até níveis aceitáveis, modificando, ao mesmo tempo, a morfologia das inclusões remanescentes para tipos que causem o mínimo efeito prejudicial e/ou alterem as propriedades metal-mecânicas do aço, principalmente ductilidade e resistência ao impacto.

No decorrer deste trabalho, serão abordadas a formação de diversos tipos de inclusões - em especial aquelas formadas por óxidos e sulfetos - e as modificações de processo comumente realizadas para tornar essas inclusões menos prejudiciais à obtenção do produto final e à sua aplicação final.

3.2. ENGENHARIA DE INCLUSÕES

Silva (2002) relata que, nas últimas três décadas, três importantes ocorrências caracterizaram a questão da limpeza (ou limpidez) interna dos aços:

a) o conceito que determinadas inclusões são resultado inevitável do processo de elaboração, proposto há várias décadas, foi assimilado, resultando na chamada “engenharia de inclusões”, isto é, no controle de processos de modo a obter inclusões adequadas à aplicação prevista para o aço;

b) o nível aceitável de inclusões foi reduzido drasticamente, especialmente em produtos planos e;

c) a conjugação destas duas ocorrências e das ações daí decorrentes impôs a obsolescência das metodologias clássicas de medição de limpeza interna e fomentou o desenvolvimento de grande número de novas técnicas para a medição desta característica.

O conceito de engenharia de inclusões é abrangente. Envolve várias técnicas, desde a caracterização do tipo de inclusões que ocorrem em determinado ponto do processo de produção do aço até o uso de termodinâmica computacional para predizer o tipo de inclusões mais adequado para determinada qualidade de aço.

Embora seja muito comum na literatura o uso do termo “clean steel” para designar aços de elevada limpeza interna, deve-se ter uma exata compreensão deste termo.

Cramb (1997) descreve em seu trabalho que o termo “clean steel” em uma visão abrangente, descreve aços que possuem baixos níveis de elementos como: enxofre, fósforo, nitrogênio, oxigênio e hidrogênio; níveis controlados de elementos residuais como: cobre, chumbo, zinco, níquel, cromo, bismuto, estanho, antimônio e magnésio, e; uma baixa

freqüência de defeitos no produto final que possam ser atribuídos à formação de óxidos durante a fabricação do aço.

Cramb (1997) relata ainda que, devido à natureza abrangente do termo “clean steel”, pode-se fazer uma divisão em:

- Aços de alta pureza ou “high purity steels”: aços com baixos níveis de soluto, por exemplo, carbono < 30 ppm em chapas para a indústria automotiva;
- Aços de baixo residuais ou “low residual steels”: aços com baixos níveis de impurezas originadas da sucata, por exemplo, cobre e estanho;
- Aços limpos ou “clean steel”: baixa freqüência de defeitos no produto final que possam ser atribuídos à formação de óxidos durante a fabricação do aço.

Atribuindo também o conceito de aços limpos à pouca quantidade de inclusões, Hollapa et al. (1995) definem em seu trabalho os conceitos de controle de inclusões e limpeza inclusionária como: “o controle de inclusões em aços está intimamente ligado ao conceito de aços limpos, chamados comumente de “clean steel” ou ainda “ultra-clean steel””.

Hollapa et al. (1995) afirmam ainda que a tecnologia de fabricação do aço teve um grande avanço durante os últimos 25 anos, no qual resultou em notável redução das impurezas no aço.

Além disso, a idéia de aço limpo muitas vezes inclui requisitos especiais para as inclusões com respeito a sua composição, morfologia, tipo, tamanho e distribuição no aço líquido, na solidificação dos lingotes ou placas e no produto final.

Na produção de aços limpos, especificações de teor e tamanho de inclusões em aços comerciais variam com o produto, por exemplo, de <5 μ m de diâmetro em aços ultra limpos para <100 μ m de diâmetro para a fabricação de chapas. Uma meta comum, todavia, é minimizar a quantidade e tamanho das inclusões e controlar sua distribuição no produto final, de acordo com Beskow et al. (2002).

Beskow et al. (2002) relatam ainda que numerosas investigações têm sido realizadas há algumas décadas para atingir essa meta. As investigações podem ser classificadas em três grupos: estudos laboratoriais, investigações industriais e modelos matemáticos. Em vista do impacto do processo de desoxidação na presença e natureza das inclusões no produto final, muitas dessas investigações têm naturalmente foco nesta operação.

Estudos laboratoriais têm examinado os inúmeros comportamentos das inclusões (utilizando fornos de escala de laboratório), em particular, seus mecanismos de formação e separação. Investigações industriais têm principal interesse na obtenção de suas composições, quantidades e distribuição de tamanhos, através de análises estatísticas e caracterização

morfológica. Em ambas investigações, laboratorial e industrial, muito esforço tem sido empregado no estudo de colisão e aglomeração de inclusões.

Colisões e aglomerações de inclusões também têm sido estudadas via modelamento matemático. Todavia, o desenvolvimento de processos e suas otimizações com respeito à engenharia de inclusões necessitam um entendimento profundo do comportamento das inclusões durante todo o curso do processo. De fato, os resultados dos estudos laboratoriais não podem ser incorporados a menos que os mecanismos de formação, crescimento e separação de inclusões no processo de fabricação do aço estejam bem entendidos. Além disso, muitos modelos devem também aproximar a operação desses mecanismos sob condições industriais reais.

Embora a demanda por aços limpos aumente cada vez mais, grande ênfase tem sido dada não apenas à limpeza total, mas sim à existência de inclusões menos deletérias à utilização do aço. Em vista disso, um controle apurado deve ser realizado em todo o processo de produção do aço. No item 3.3 será relatado que o surgimento de determinados tipos de inclusões dependem: do tipo de desoxidante(s) empregado(s) e, nas etapas subseqüentes à desoxidação, da composição da escória e adição de determinados elementos no aço.

3.3. FORMAÇÃO E SUBSEQUENTE MODIFICAÇÃO DE INCLUSÕES

A produção de aços limpos, com ou sem modificação de inclusões, está intimamente ligada ao controle do oxigênio dissolvido no aço líquido, desde o primeiro estágio de fusão até o lingotamento, e com a correta prática de desoxidação.

Choudhary et al. (2002) descrevem em seu trabalho o processo de desoxidação, que pode ser simples ou complexo. A desoxidação simples ocorre quando é usado somente um desoxidante (geralmente alumínio) e o produto de desoxidação (inclusões de Al_2O_3) formado é, geralmente, um óxido puro. Na desoxidação complexa, mais de um desoxidante é empregado (geralmente Mn e Si). Nesse caso, o produto de desoxidação é uma solução de óxidos (escória) em que a atividade de cada componente é menor do que 1. Conseqüentemente, o oxigênio pode ser removido em grande quantidade com uma pequena quantidade de desoxidante quando comparado com a desoxidação simples. Além disso, os produtos de desoxidação (óxidos complexos de MnO e SiO_2) são líquidos, de fácil coalescência e relativa rapidez de flotação. A desoxidação complexa é ferramenta vital para modificar a forma e composição das inclusões.

3.3.1 Aços acalmados ao Mn-Si ou “Mn-Si semi-killed steels”

Muitos aços comerciais são desoxidados com manganês e silício (chamados de “semi-killed steels”) com o objetivo de minimizar a presença de inclusões de alumina, pois esse tipo de inclusão é extremamente prejudicial ao produto final. Manganês e silício são adicionados através da utilização de ferro-ligas, principalmente FeSi e FeSiMn. As ferro-ligas, principalmente o FeSi, contêm uma certa quantidade de alumínio como impureza. Desta forma, os produtos de desoxidação gerados são compostos formados no sistema MnO-Al₂O₃-SiO₂.

Choudhary et al. (2002) afirmam que o tipo de inclusão preferido no sistema MnO-Al₂O₃-SiO₂ é a espessartita. Inclusões de espessartita têm baixa dureza e são deformáveis, têm baixa temperatura liquidus, baixa viscosidade, baixa molhabilidade e excelentes características de flotação. No entanto, no diagrama ternário MnO-Al₂O₃-SiO₂, a espessartita existe somente em uma estreita faixa de composição. A prática de desoxidação pode ser controlada para produzir inclusões de espessartita (3MnO-Al₂O₃-3SiO₂ contendo 43% MnO, 20,6% Al₂O₃ e 36,4% SiO₂) em aços desoxidados com Mn-Si-Al.

A tabela 3.1 e a figura 3.1 mostram, respectivamente, algumas informações relevantes sobre a espessartita e os compostos formados no sistema MnO-Al₂O₃-SiO₂, de acordo com o trabalho de Kiesling et al. (1978).

Tabela 3.1 - Dados relevantes sobre a espessartita, Kiesling et al. (1978).

Ponto de fusão	Densidade	Microdureza
1195°C	4,18g/cm ³	1000-1100 kp/mm ²

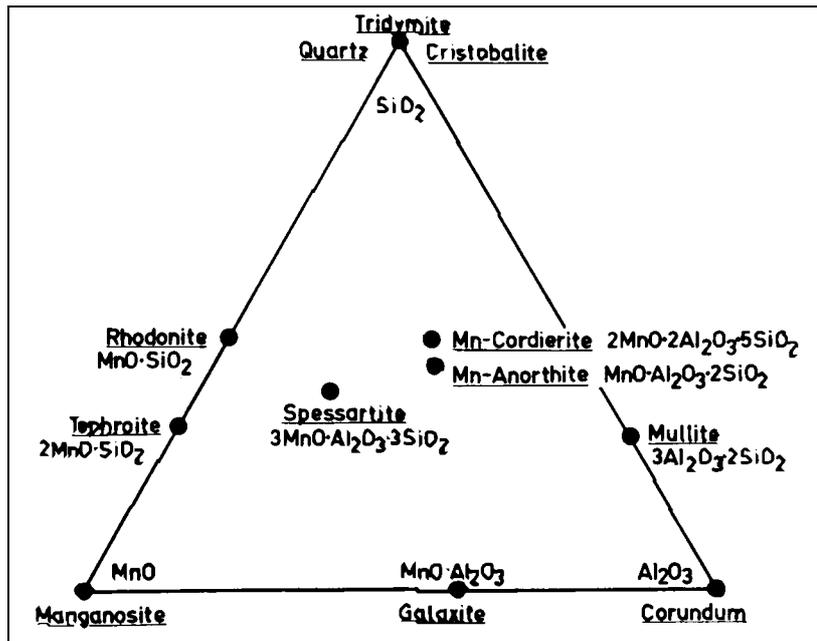


Figura 3.1 - Compostos formados no sistema MnO-Al₂O₃-SiO₂, Kiesling et al. (1978).

A figura 3.2 mostra o diagrama característico do sistema MnO-Al₂O₃-SiO₂ onde pode-se observar a região da espessartita. As linhas tracejadas são as isotermas que indicam o ponto de fusão do composto, Slag Atlas (1995).

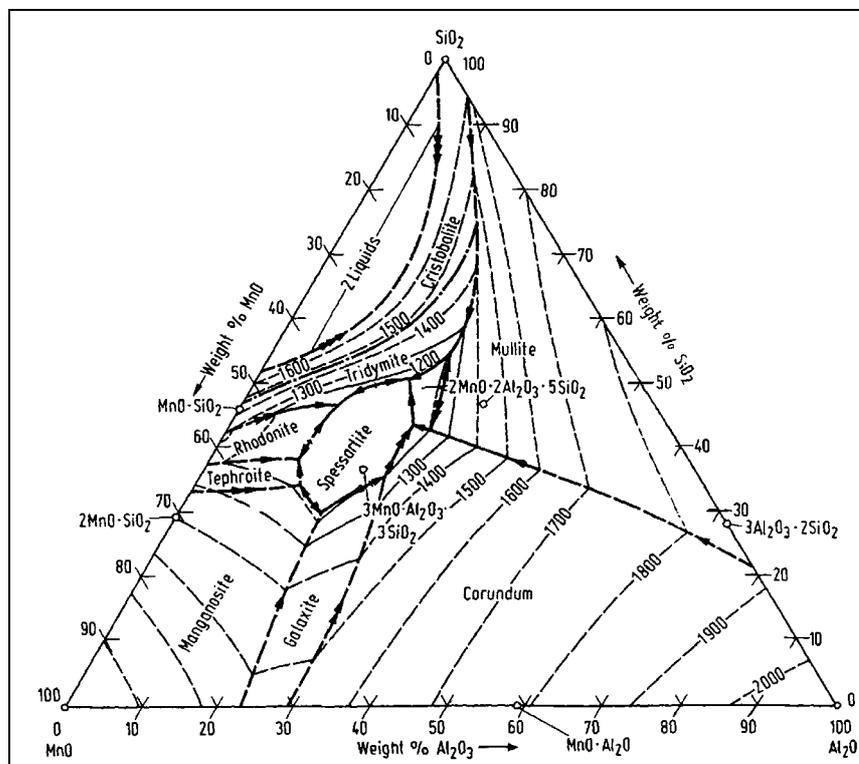


Figura 3.2 - Diagrama característico do sistema MnO-Al₂O₃-SiO₂, Slag Atlas (1995).

Após a adição de silício e manganês como desoxidantes, é comum na produção de aços para cordoalhas de pneus (chamados de “tire cords steels”) a retirada da escória formada e a adição de wollastonita ($\text{CaO} - \text{SiO}_2$, contendo cerca de 47,5% CaO , 51% de SiO_2 e pequenos traços de outros elementos minerais) para a formação de nova escória. O objetivo é modificar as inclusões remanescentes de espessartita para inclusões entre a região da pseudo-wollastonita e a anortita, como relatado no trabalho de Faulring (1999). A região entre a pseudo-wollastonita e a anortita é a de menor ponto de fusão, e está em destaque no diagrama ternário $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ da figura 3.3.

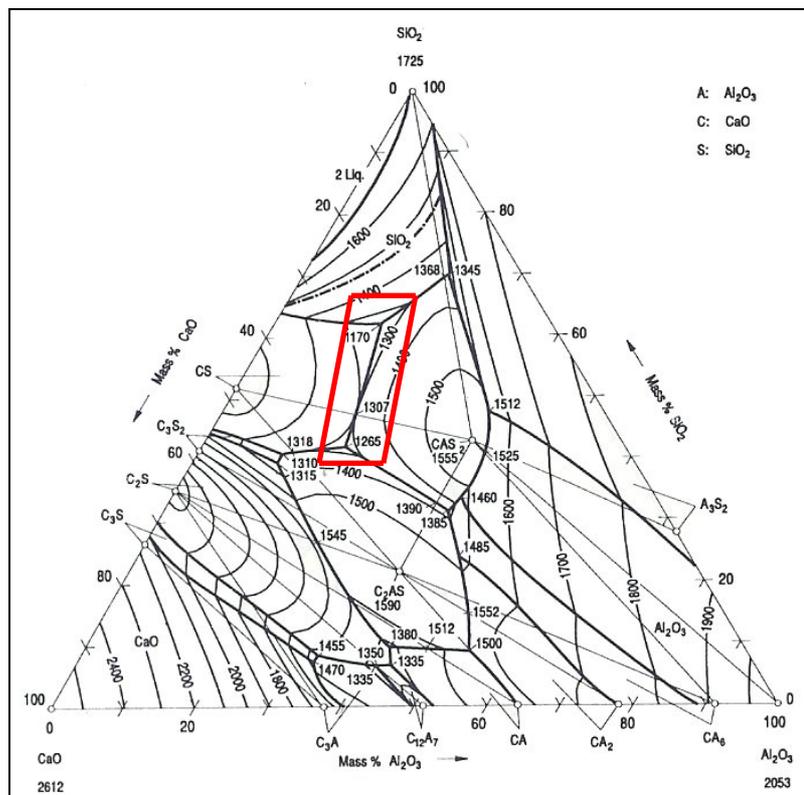


Figura 3.3 - Diagrama ternário do sistema $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ de destaque para a região entre a pseudo-wollastonita e a anortita, Slag Atlas (1995).

A incorporação de magnésio, proveniente principalmente do desgaste do refratário da panela modifica a disposição das fases no diagrama do sistema $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, como observado nos diagramas pseudo-ternários das figuras 3.4, 3.5 e 3.6.

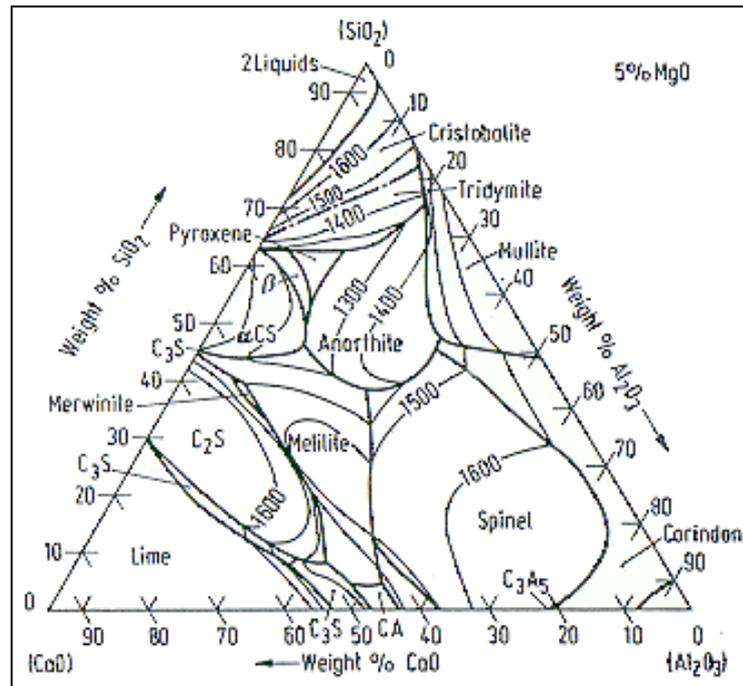


Figura 3.4 - Diagrama pseudo-ternário do sistema $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ com 5% de MgO, Slag Atlas (1995).

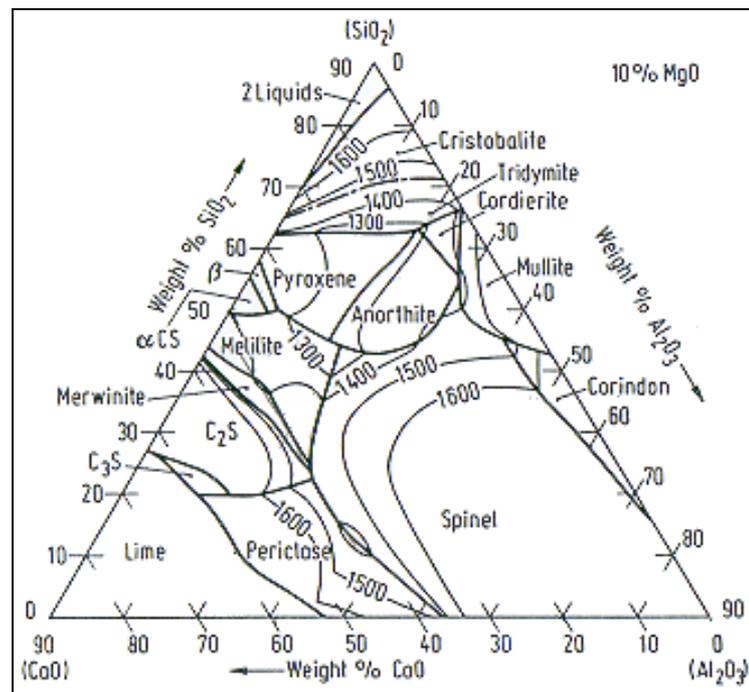


Figura 3.5 - Diagrama pseudo-ternário do sistema $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ com 10% de MgO, Slag Atlas (1995).

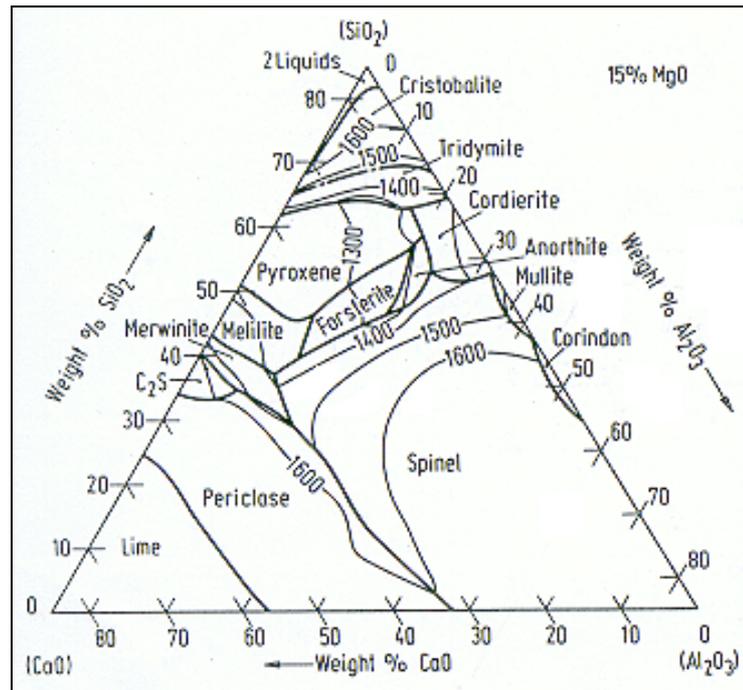


Figura 3.6 - Diagrama pseudo-ternário do sistema $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ com 15% de MgO , Slag Atlas (1995).

3.3.2 Aços acalmados ao Al ou “Aluminium killed steels”

A grande maioria dos aços comerciais é desoxidada por alumínio. A vantagem do emprego de um forte desoxidante, capaz de auxiliar no controle de grão austenítico e na remoção de nitrogênio de solução, a custos razoáveis, tornou a desoxidação por alumínio uma opção quase universal. Entretanto, o aço completamente desoxidado por alumínio tende a ter uma população de inclusões de alto ponto de fusão e baixa plasticidade, de acordo com Silva (2002).

Assim, em determinados casos, como na produção de fios de pequenos diâmetros para cordoalhas de pneus ou em aplicações como molas de válvulas para motores de combustão interna, inclusões de alta dureza podem causar ruptura do arame ou redução drástica na resistência à fadiga.

Desta forma, o tratamento das inclusões de alumina através da adição de cálcio tornou-se ferramenta fundamental na produção de aços acalmados ao alumínio, como será descrito a seguir.

3.3.2.1 Tratamento com cálcio

O potencial do tratamento com cálcio é conhecido desde a metade do século 20, quando a termodinâmica do cálcio tornou-se bem conhecida e as ligas de cálcio passaram a ser comercialmente produzidas. Na década de 60, ligas como CaSi e CaSiMn já eram usadas para melhorar as características das inclusões e limpeza do aço. No entanto, os resultados eram discrepantes, por problemas na técnica de adição de cálcio e controle deficiente da composição química do aço durante e após o tratamento com cálcio, de acordo com Holappa et al. (2002).

Holappa et al. (2002) relatam em seu trabalho que na década de 60, quando o lingotamento contínuo tornou-se largamente utilizado, problemas de entupimento nas válvulas foram encontrados. A análise do material encontrado nas válvulas mostrou que era principalmente formado por clusters de alumina.

Atualmente, segundo Cicutti et al. (1996), o tratamento com cálcio é comumente usado para controlar a forma e composição das inclusões de óxidos e sulfetos em aços acalmados ao alumínio. A adição de cálcio reage com as inclusões de alumina, gerando cálcio-aluminatos de baixo ponto de fusão. Parte do cálcio reage com o enxofre dissolvido resultando na formação de sulfetos de cálcio ou sulfetos de Ca-Mn.

Conhecer qual é o tipo de cálcio-aluminato que se forma em determinadas condições passa a ser uma informação útil, de acordo com Madias (1998). Os cálcio-aluminatos se comportam de maneira muito diferente tanto durante o lingotamento do aço como na deformação a quente. Isso se deve às suas diferentes propriedades, como se observa na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Propriedades dos cálcio-aluminatos, CaO e sulfetos, Cicutti et al (1996).

Inclusão	Densidade g/cm ³	Temp. Fusão (°C)	Dureza Vickers HV	Expansão Térmica (1x10 ⁻⁶ /°C)
Al ₂ O ₃	3,96	2050	3750	8
CA ₆	3,38	1850	2200	9
CA ₂	2,91	1750	1100	-
C ₃ A	3,04	1535	-	10
CA	2,98	1605	930	7
C ₁₂ A ₇	2,83	1455	-	8
CaO	3,34	2570	400	-
CaS	2,50	2450	-	15
MnS	3,99	1610	170	18

Nota: C = CaO e A = Al₂O₃.

As diferentes propriedades descritas na tabela 3.2 fazem com que a lingotabilidade seja muito diferente quando se tem CA_6 em equilíbrio com o aço, do que quando se tem $C_{12}A_7$. De todos os cálcio-aluminatos, o $C_{12}A_7$ está totalmente líquido na temperatura de trabalho do aço e não ocasiona problemas de lingotabilidade, o que pode ser observado no diagrama binário $Al_2O_3 - CaO$ da figura 3.7. No diagrama de fases está indicada, também, a chamada janela de lingotabilidade, que indica a região que abrange a temperatura de trabalho do aço.

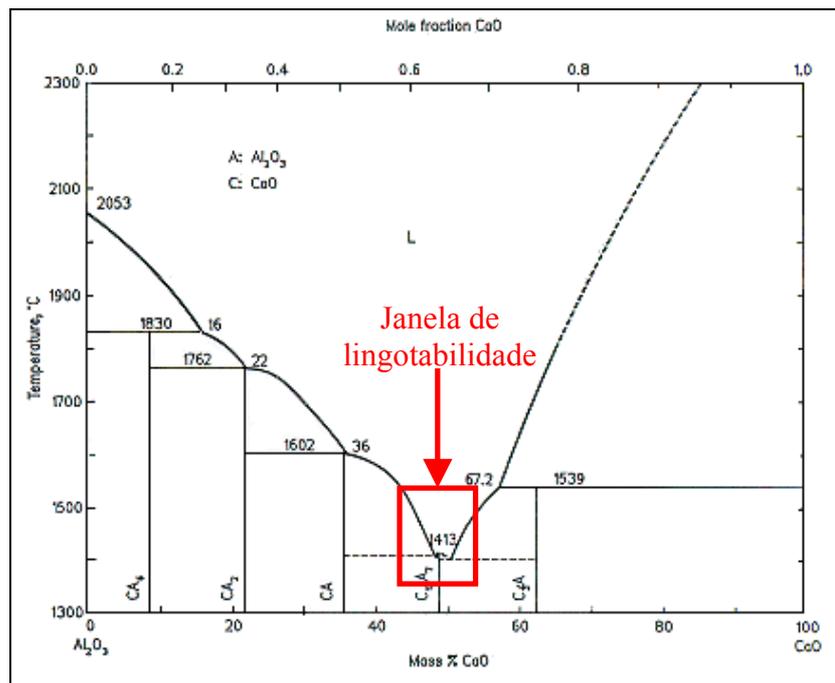


Figura 3.7 - Diagrama binário $Al_2O_3 - CaO$, Slag Atlas (1995).

É importante salientar que o nível de enxofre dissolvido no aço deve ser controlado, pois pode levar a formação de CaS , sulfeto caracterizado por ser indeformável e causar problemas de entupimento de válvulas e macro-inclusões.

3.3.2.2 Efeito do MgO nas inclusões do sistema $Al_2O_3 - CaO$

A presença de magnésio é observada tanto em micro-inclusões como em macro-inclusões apresentando-se geralmente formando espinélio. O efeito do espinélio de MgO de diminuir a lingotabilidade se explica em função do seu alto ponto de fusão. Se o teor de MgO nas inclusões é perto de 10%, mesmo que se tenham aluminatos de cálcio líquidos, há risco de formação de inclusões sólidas, de acordo com Madias (1998).

Pode-se avaliar a influência do MgO analisando-se o diagrama ternário do sistema CaO - Al₂O₃ - MgO da figura 3.8.

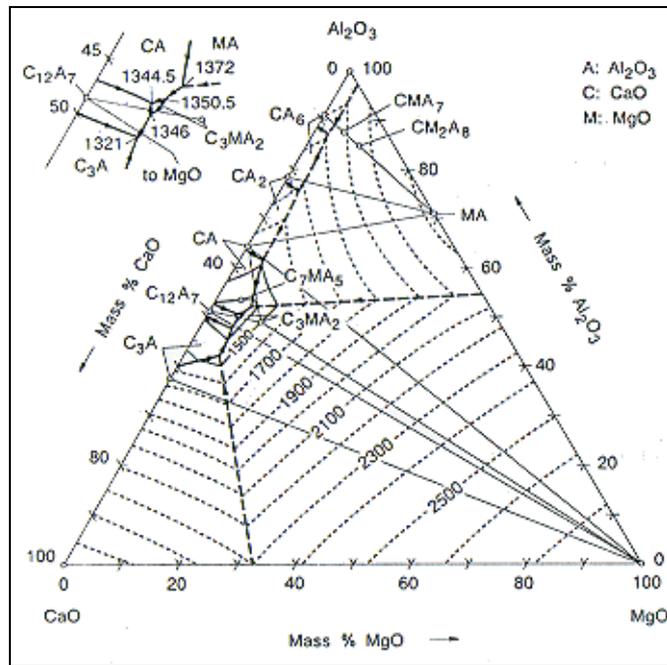


Figura 3.8 - Diagrama ternário do sistema CaO - Al₂O₃ - MgO, Slag Atlas (1995).

A presença de MgO nas inclusões pode ser explicada de três formas:

- Adição de MgO para tornar a escória mais fluida (até cerca de 12%);
- Desgaste dos refratários contendo MgO na sua composição (principalmente na linha de escória);
- Formação de Mg metálico pela reação do oxigênio dissolvido no banho com o refratário.

Os conceitos apresentados até aqui mostram como é importante para o aciarista conhecer as reações químicas envolvidas na formação e modificação de inclusões.

3.4. MODELAMENTO TERMODINÂMICO

A necessidade crescente de se produzir aços cada vez mais limpos tem levado pesquisadores e indústrias a utilizar uma série de ferramentas para atingir estes objetivos.

Moraes et. al. (2002) afirmam em seu trabalho que além das ferramentas mais conhecidas como, por exemplo, a microscopia ótica - utilizada no controle do tipo, forma e tamanho de inclusões - outras ferramentas utilizadas são:

- Modelos computacionais de controle de processo e balanço de massa já empregados “on-line” pelas indústrias;
- Modelos matemáticos de predição de formação de estruturas na solidificação, de escoamento no distribuidor e molde do lingotamento contínuo - formulados e estudados de forma “off-line” (universidades, institutos de pesquisa das empresas ou não);
- Modelos físicos em água (modelos “frios”) para validação dos modelos matemáticos.

Cada vez mais a termodinâmica é utilizada como técnica para a otimização da produção, não somente do aço, mas de inúmeros materiais. Na fabricação do aço é dada grande ênfase a três grandes áreas: desoxidação, dessulfuração e modificação de inclusões.

Carrenõ-Galindo et al. (2000) desenvolveram um trabalho onde modelos termodinâmicos foram empregados para analisar a operação de vazamento e posterior desoxidação do aço sobre diferentes seqüências de adição de desoxidantes. De acordo com este trabalho, conforme a seqüência de adições dos desoxidantes, diferentes níveis de oxigênio no aço serão obtidos e, conseqüentemente, diferentes tipos de inclusões serão formados.

Lachmund et al. (2001) realizaram uma investigação sobre os aspectos termodinâmicos e cinéticos das reações de dessulfuração na metalurgia secundária. Para investigar a remoção de enxofre foram realizadas corridas com panelas de 185 toneladas onde foram variados parâmetros como: vazão de gás de agitação, pressão externa ao banho (operações sob vácuo) e composição do aço. Os resultados mostraram que é possível reduzir a quantidade de enxofre em 90% com um tratamento de vácuo de 10 minutos sob condições adequadas.

Hollapa et al. (2002) realizaram um estudo sobre a formação e transformação de inclusões sólidas e líquidas durante o tratamento de modificação de inclusões com cálcio. Os cálculos foram realizados a diferentes temperaturas e variando a quantidade de cálcio, alumínio, enxofre e oxigênio total. Um software de modelo de solidificação também foi utilizado acoplado com os cálculos de equilíbrio termodinâmico.

Segundo Moraes et al. (2002), modelos termodinâmicos computacionais bastante amplos têm sido empregados para avaliar os fenômenos que ocorrem, por exemplo, na interface metal líquido/escória, escória/inclusão e metal líquido/inclusão durante o refino do aço. No processo de produção do aço estão envolvidos um grande número de reações químicas, especialmente em relação às interações metal/escória e metal/inclusões. Calcular o equilíbrio químico destas reações é tarefa complexa, por isto programas computacionais que resolvam tais cálculos são poderosas ferramentas. O modelamento do processo por meio de

cálculos termodinâmicos torna possível tanto otimizar processos já conhecidos como simular novos processos e desenvolvimento de novas ligas.

Modelos termodinâmicos simples podem ser utilizados através de dados da literatura. Para elementos dissolvidos no aço líquido é muito utilizada a compilação realizada por G. K. Sigworth e J. F. Elliott, publicada na revista Metal Science vol. 8 (1974). Muito utilizado também é o Steelmaking Data Sourcebook, cuja primeira edição foi publicada em 1968 (em japonês) e revisada em 1984 (em inglês), pelo 19º comitê de fabricação do aço da Sociedade Japonesa para a Promoção da Ciência.

Com relação à escória, os modelos termodinâmicos tornam-se extremamente complexos. Oertel et al. (1999) relatam em seu trabalho que, embora as propriedades das soluções metálicas são, em geral, definidas pelo solvente e afetadas pelo soluto e o comportamento químico do solvente e do soluto freqüentemente é descrito por modelos simples e acessíveis para cálculos automáticos, esse não é o caso das escórias. A descrição sistemática do comportamento químico e físico das escórias é um tópico ainda em desenvolvimento. Atualmente, existem vários modelos que são usados para descrever as propriedades termodinâmicas dos sistemas de escórias relevantes na fabricação do aço e decidir qual modelo será utilizado não é uma tarefa fácil.

Qualquer programa termodinâmico computacional deve estar provido de um banco de dados completo e consistente, que tenha o máximo de informações sobre o sistema em estudo. Segundo o Slag Atlas (1995), os principais bancos de dados metalúrgicos acessíveis são: CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization), Austrália; F.A.C.T, Canadá; HSC, Finlândia (não é um sistema plenamente integrado, mas é muito usado em cálculos metalúrgicos); MANLABS, EUA; MTDATA, UK.; THERDAS, Alemanha; THERMO-CALC, Suécia.

Cabe destacar ainda que universidades e institutos de pesquisa formam consórcios de bancos de dados termoquímicos integrados, ou ITD's (Integrated Thermochemical Databases). O consórcio mais conhecido é o do SGTE (Scientific Group Thermochemical Europe), que é formado pelos seguintes centros:

- **Canadá**
 - ThermFact
- **França**
 - Institute National Polytechnique (LTPCM), Grenoble
 - Association THERMODATA, Grenoble
 - IRSID, Maizières-lès-Metz

- Université Paris-Sud, Châtenay-Malabry
- **Alemanha**
 - Rheinisch Westfälische Technische Hochschule, Aachen
 - Max Planck Institut für Metallforschung, PML, Stuttgart
 - GTT-Technologies, Herzogenrath
- **Suécia**
 - Royal Institute of Technology, Stockholm
 - TCSAB
- **Reino Unido**
 - National Physical Laboratory, Teddington
 - AEA Technology, Harwell
- **Estados Unidos**
 - The Spencer Group

O objetivo principal da formação desses consórcios é a unificação dos dados termodinâmicos existentes e dos estudos experimentais para a obtenção de dados ainda não disponíveis.

Frente ao exposto, programas computacionais que fazem a união entre os bancos de dados e os modelos termodinâmicos tornam-se fundamentais. O Laboratório de Siderurgia utiliza desde 2001 um dos softwares termodinâmicos computacionais mais conhecidos em sua área – FactSage. No próximo item será detalhado o surgimento e constante aperfeiçoamento deste software.

3.5. O SOFTWARE FACTSAGE

Segundo Bale et al. (2002), o atual software FactSage é a fusão de dois bem conhecidos pacotes de softwares no campo da termoquímica computacional: FACT-Win (originalmente F*A*C*T*) e ChemSage (originalmente SOLGASMIX).

F*A*C*T* - Facility for the Analysis of Chemical Thermodynamics – Iniciado em 1976 como um projeto de pesquisa entre duas universidades canadenses, McGill University (W. T. Thompson) e a École Polytechnique de Montreal (C. W. Bale e A. D. Pelton). O programa inicial foi escrito em FORTRAN em cartões perfurados e realizava cálculos termodinâmicos envolvendo substâncias puras e gases ideais. Em 1979, o programa já podia ser acessado via Datapac e Telenet (linha discada) e já era utilizado como ferramenta de

ensino. Na década de 90, o software passou a ser utilizado em PC's via sistema operacional DOS. Em 1996, módulos de demonstração passaram a ser oferecidos via web. A versão para Windows foi liberada em 1999 e oferecia bancos de dados termoquímicos plenamente integrados. O campo de atuação deste software tem se expandido do campo da química metalúrgica para outros campos da termodinâmica química. Ele tem sido utilizado por pirometalurgistas, químicos inorgânicos, engenheiros químicos e de corrosão, eletroquímicos, etc. Desde 1979 ele tem incorporado o minimizador de Energia de Gibbs, SOLGASMIX.

O software SOLGASMIX foi desenvolvido por G. Eriksson (GTT-Technologies, Alemanha). Em sua primeira versão já era possível realizar cálculos de equilíbrio em sistemas multicomponentes de fases de soluções não-ideais. A cooperação com K. Hack (GTT-Technologies, Alemanha) produziu o programa interativo SOLGASALLOY (1984) com o modelo de Energia de Gibbs integrado. A combinação com o banco de dados do SGTE (em cooperação com o grupo MTDS do NPL, Teddington, Reino Unido) levou ao desenvolvimento do ChemSage (1990). O desenvolvimento contínuo permitiu o acréscimo de um pós-processador gráfico e um módulo para calcular diagramas de fase (1999).

Em abril de 2001, F*A*C*T e ChemSage foram fundidos em um pacote único, o FactSage 5.0 (seguido pelos updates FactSage 5.1 em 2002 e FactSage 5.2 em junho de 2003).

3.6 MODELAMENTO COMBINADO

Como parte de um contínuo controle e melhoramento na qualidade do aço, recentemente alguns grupos de pesquisadores vêm combinando programas termodinâmicos com programas que modelam o escoamento do aço líquido.

O Laboratório de Siderurgia desenvolve atualmente um projeto que tem como objetivo prever as condições ideais de operação nas diversas situações encontradas na prática.

Em um primeiro estágio, os dados coletados na planta siderúrgica - como sucata carregada, adições (quantidade e composição), oxigênio injetado, temperatura de aço e escória - são inseridos no programa FactSage. A comparação dos resultados obtidos na planta com os do programa permite avaliar se a predição é bem sucedida.

Em um segundo estágio, será realizado o acoplamento dos modelos matemático de escoamento do aço líquido na panela e do modelo termodinâmico das reações metal/escória/inclusões. Estudos como arraste de escória, dessulfuração, desoxidação e

previsão da composição química de inclusões que não puderem ser eliminadas, podem ser modelados via software termodinâmico FactSage acoplado ao modelo matemático de escoamento.

Para a realização do acoplamento entre os softwares termodinâmico e fluido-dinâmico é necessário o uso de um software que seja a interface entre eles. Para isso, será utilizado o software ChemApp, que consiste em uma biblioteca de sub-rotinas em linguagem Fortran. Essas sub-rotinas possuem a função de integrar os dados de cada célula do CFX-5, onde são calculadas a temperatura, a pressão, a concentração e a velocidade do escoamento, com o software FactSage, que calcula o equilíbrio local das fases presentes em cada célula, baseado na rotina de minimização de Energia Livre de Gibbs.

A validação do modelo matemático será realizada por meio de um modelo físico de uma panela siderúrgica agitada com gás. O objetivo é realizar estudos sobre a otimização da agitação do aço na panela, de forma a obter-se o menor tempo de mistura (homogeneização) das ligas adicionadas e, das reações de refino metal-escória (reação de dessulfuração, por exemplo), por meio do aumento da constante de velocidade de transferência de massa (k) do sistema, para uma maior eficiência dos processos de mistura e transferência de massa.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 PLANTA INDUSTRIAL

A Gerdau Aços Finos Piratini, siderúrgica da Gerdau S.A., produz aços especiais longos destinados principalmente à indústria automotiva.

Sua planta industrial está localizada no município de Charqueadas, no Rio Grande do Sul, distante 55 quilômetros da capital Porto Alegre.

Os aços produzidos na Gerdau Aços Finos Piratini passam por atualizados processos de elaboração através dos mais modernos equipamentos de metalurgia secundária, utilizando os processos de lingotamento convencional e lingotamento contínuo de última geração totalmente automatizado. Seus produtos finais atendem às mais modernas especificações do mercado automotivo. Seu laminador de barras e fio-máquina possui blocos acabadores com capacidade de atingir tolerâncias dimensionais de 1/3 da norma EN1013, com controles de temperatura que proporcionam um processo de deformação termomecânica de laminação.

A empresa possui as certificações ISO9002 e QS9000. Em 2002, ganhou o Prêmio Nacional da Qualidade na categoria de empresa de grande porte com fins lucrativos. Seus

produtos são acompanhados em todas as etapas do processo, e sua inspeção final é feita em equipamentos de ensaios não-destrutivos.

A equipe de desenvolvimento de produtos e processos trabalha conjuntamente com universidades através de convênios; além dos contratos internacionais de desenvolvimento tecnológico com empresas “benchmark” de mercado; e sempre utilizando os mais atualizados equipamentos em seus laboratórios.

A figura 4.1 mostra o fluxo de produção da empresa, com destaque para a aciaria.

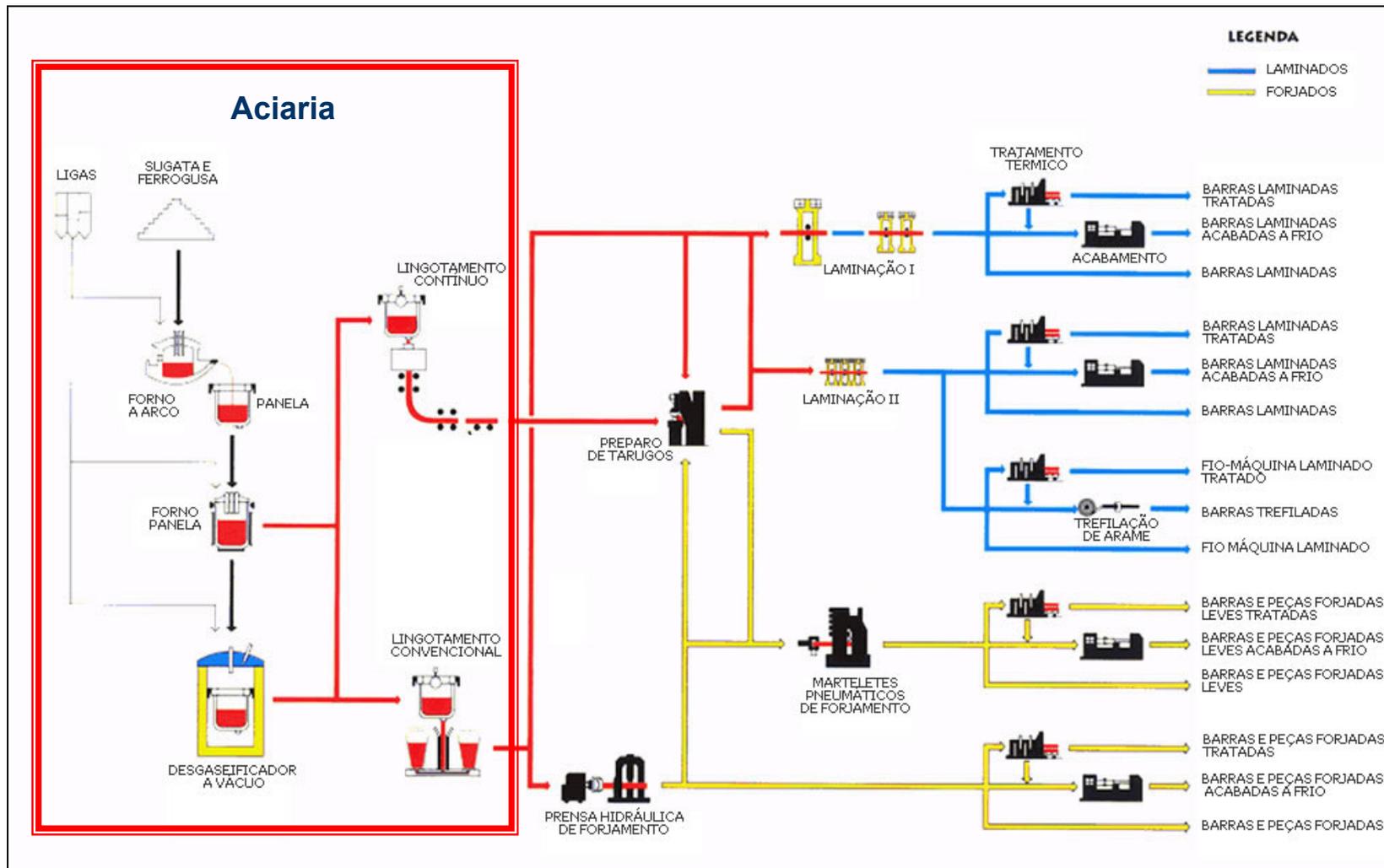


Figura 4.1- Fluxo de produção da Gerdau Aços finos Piratini.

4.2 PRODUÇÃO DE AÇOS ESPECIAIS VIA ACIARIA ELÉTRICA

A fabricação de aços especiais em aciarias elétricas é composta geralmente por:

- Forno Elétrico a Arco (FEA);
- Forno-Panela (FP);
- Sistema de degaseificação a vácuo (VD/VOD);
- Lingotamento contínuo e/ou convencional.

A figura 4.2 mostra um fluxograma básico das etapas envolvidas na fabricação de aço no caso da Gerdau Aços Finos Piratini, onde foi desenvolvido este trabalho.

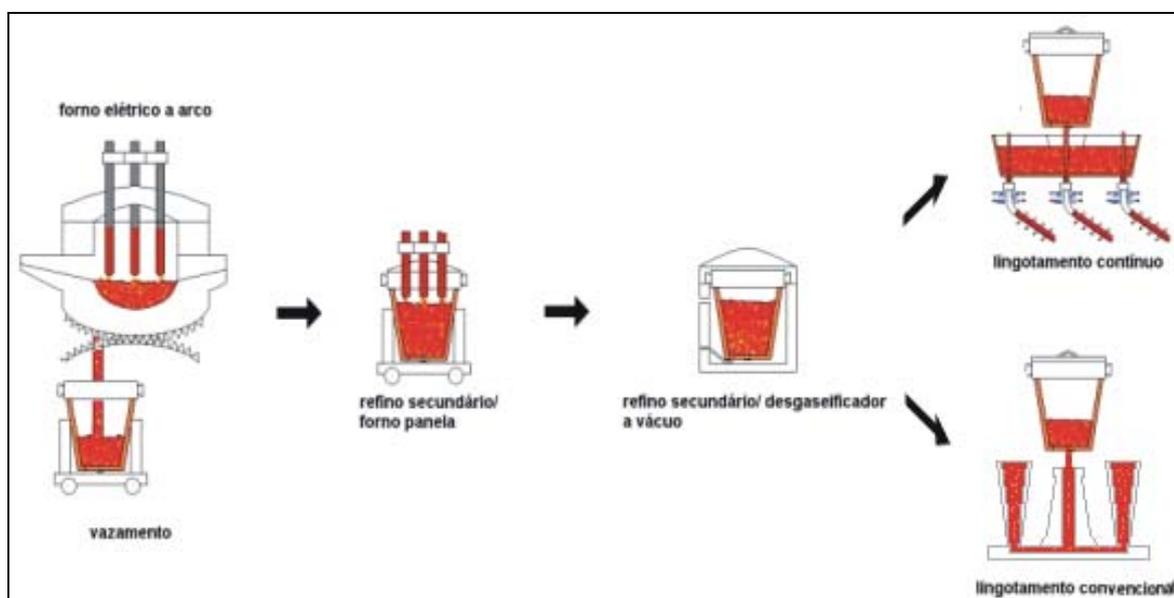


Figura 4.2 - Esquema do processo de fabricação de aço em aciaria elétrica

Conforme pode ser visto na figura 4.2, trabalha-se com um FEA, FP, Sistema de degaseificação VD/VOD, Lingotamento Contínuo de três veios de tarugos de seção quadrada e Lingotamento Convencional (lingoteiras). Atualmente, 95% da produção de aço da Gerdau Aços Finos Piratini passa pelo Lingotamento Contínuo. A aciaria da Gerdau Aços Finos Piratini possui capacidade de produção de 300.000 t/ano.

4.2.1. Forno Elétrico a Arco

Neste equipamento é realizada a fusão da carga, composta em sua maioria de sucata e outros componentes em diversas proporções, tais como: ferro-gusa, ferro fundido, escorificantes e, dependendo da qualidade de aço, é também realizado adição de ligas. A fusão da carga é realizada através da formação de um arco elétrico entre eletrodos de grafite, o qual libera calor. Para auxiliar a fusão da carga, o forno elétrico a arco (FEA) da Gerdau Aços Finos Piratini conta com um sistema de injeção de oxigênio, carbono e gás natural. No FEA, devido ao ambiente oxidante, é realizada a remoção de fósforo do aço. O FEA da Gerdau Aços Finos Piratini é do fabricante Birlec, reformado pela Demag e possui capacidade de 70 toneladas. Na figura 4.3 pode-se observar as etapas de preparação da carga, carregamento, fusão e vazamento do aço.

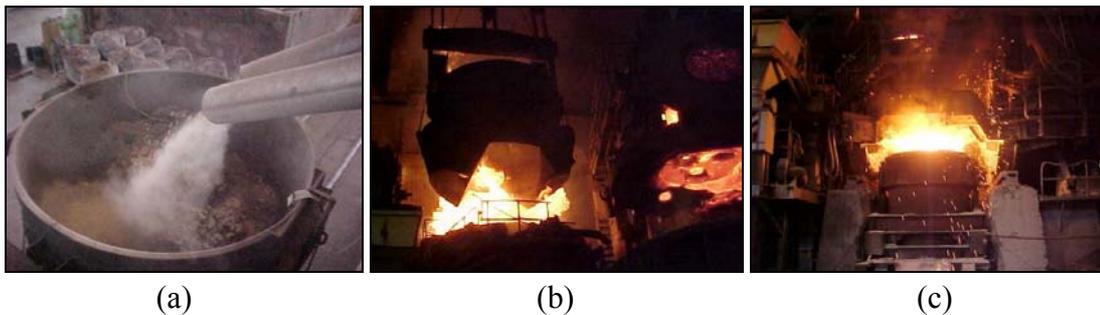


Figura 4.3 - (a) Preparação da carga do forno, (b) carregamento, (c) fusão e vazamento.

4.2.2. Forno-Panela (FP)

No forno-panela são realizadas as operações de adição de ligas (que irão definir a composição química final do aço), correção da escória, desoxidação, dessulfuração, remoção de inclusões e controle da temperatura do aço líquido. Desde a chegada da panela ao forno-panela até a sua saída para o lingotamento contínuo é realizada a agitação do banho com gases inertes. Na Gerdau Aços Finos Piratini é utilizado gás argônio em vazão constante. Sua função é favorecer a flotação de inclusões e homogeneizar a temperatura do banho. A injeção de gás (rinsagem) é feita utilizando-se um plug poroso no fundo da panela. O FP da Gerdau Aços Finos Piratini foi produzido pela ASEA/SKF e as panelas possuem capacidade de 65 toneladas. O forno-panela pode ser observado na figura 4.4 e a adição de ligas na figura 4.5.



Figura 4.4 - Forno-panela da Gerdau Aços Finos Piratini.



Figura 4.5 - Adição de ligas no FP da Gerdau Aços Finos Piratini.

4.2.3 Desgaseificação a vácuo

Tem a função de retirar gases do aço líquido, principalmente nitrogênio e hidrogênio em aços de construção mecânica. No caso da Gerdau Aços Finos Piratini, é empregado um sistema de desgaseificação do fabricante Demag-Messo, do tipo VD/VOD, VD - desgaseificação a vácuo, VOD - descarburacão via injeção de oxigênio sob vácuo. Na figura 4.6, pode-se observar uma panela dentro do vaso de vácuo.



Figura 4.6 - VD/VOD da Gerdau Aços Finos Piratini.

4.2.4. Lingotamento Contínuo (LC)

O LC, também chamado de Metalurgia Terciária, é composto de panela, distribuidor e molde. Nesta etapa, existem diversas fontes de contaminação do aço, principalmente aquelas relacionadas a reoxidação, arraste de escória, clogging e interação metal-refratário, que afetam diretamente na quantidade de inclusões no aço.

4.2.4.1. *Panela e Distribuidor*

O Distribuidor é responsável por receber o aço líquido da panela e distribuí-lo para os veios da máquina de LC. No caso da Gerdau Aços Finos Piratini, a panela conta com abertura por válvula gaveta (VG), sendo a transferência para o distribuidor feito com válvula (ou tubo) longa (VL), que protege o aço do contato com o ar, reduzindo a reoxidação. Especial atenção é dada à conexão VG-VL, onde é realizado uma “selagem” com gás argônio, a fim de se evitar ao máximo a reoxidação do aço pelo ar.

O distribuidor da empresa conta com uma barreira, que serve para modificar as linhas de fluxo do aço líquido, facilitando a flotação de inclusões. É utilizado um fluxante sintético sobre o aço, a fim de formar uma escória que evite perdas excessivas de energia térmica do sistema, a reoxidação do banho e tenha capacidade de reter inclusões. O controle da vazão de aço para o molde se dá por meio de válvula tampão.

A figura 4.7 mostra a vista superior do distribuidor da Gerdau Aços Finos Piratini.



Figura 4.7 - Distribuidor da Gerdau Aços Finos Piratini.

4.2.4.2. Molde

É onde ocorre o início da solidificação do aço. Cuidados com relação ao surgimento de inclusões são tomados principalmente no sentido de se evitar o contato aço-ar, desgaste excessivo de refratários e arraste de escória do molde.

No caso da Gerdau Aços Finos Piratini, é utilizado um molde quadrado de cobre nas seções de 150 mm e 240 mm. A transferência de aço do distribuidor para o molde se dá por meio de válvula submersa, o que evita a reoxidação e ajuda na centralização do jato. No molde utilizam-se diferentes fluxantes sintéticos, dependendo da qualidade de aço produzida, com injeção automática. A empresa ainda conta com agitadores eletromagnéticos no molde e no resfriamento secundário, a fim de evitar a segregação dos elementos de liga (principalmente em aços de alta liga). Finalmente, a solidificação final do aço se dá por meio de jatos de água, no chamado resfriamento secundário.

4.2.5. Lingotamento Convencional

Na Gerdau Aços Finos Piratini quando se deseja produzir lingotes de tamanhos especiais, principalmente para a forjaria, utiliza-se o lingotamento convencional. A capacidade de cada lingoteira varia de 1320 kg a 7350 kg. A produção de lingotes é cerca de 15000 t/ano.



Figura 4.8 - Lingotamento Convencional da Gerdau Aços Finos Piratini.

4.3. MATERIAIS UTILIZADOS: AÇOS PARA CEMENTAÇÃO - SAE 8620

Os aços para cementação, segundo Chiaverini (1988), são classificados em três tipos:

- Aços-carbono;
- Aços-liga de baixo teor de liga;
- Aços-liga de teor mais elevado.

Neste trabalho foi escolhido para estudo o aço SAE 8620, classificado como aço-liga de baixo teor de liga.

A composição química típica é mostrada na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Composição química típica do aço SAE 8620 em %, Chiaverini (1988).

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Min.	0,18	0,20	0,70	-	-	0,40	0,40	0,15
Max.	0,23	0,35	0,90	0,035	0,040	0,60	0,70	0,25

O enriquecimento superficial de carbono nos aços proporcionado pela cementação visa produzir uma superfície de alta dureza e resistência ao desgaste, suportada por um núcleo tenaz. Para que o aço produzido atenda esses requisitos, diversos fatores devem ser levados em consideração durante a etapa de fabricação na aciaria:

- Controle dos elementos residuais pela seleção da sucata;
- Controle da passagem de escória durante o vazamento;
- Controle do nível de oxidação do aço no forno-panela;
- Ajuste da melhor composição de escória no forno-panela para assegurar que o teor de enxofre esteja na faixa de 0,020 a 0,040%;
- Adição de fio de enxofre (tubos de aço contendo enxofre em seu interior) para atingir os teores desejados;

- Ajuste do teor de manganês para evitar a formação de sulfetos de cálcio;
- Opção pela adição de alumínio em conjunto com nitrogênio, formando AlN, para o ancoramento dos grãos na etapa de laminação;
- Adição de cálcio para modificar as inclusões provenientes da reação entre o oxigênio dissolvido no aço e o alumínio residual após a reação com o nitrogênio.

Face ao exposto, a fabricação deste aço mostra-se tarefa complexa, justificando um estudo detalhado do processo atual de produção, objetivando a otimização do processo para a obtenção de inclusões de tamanho, forma e quantidade controladas.

Segundo Chiaverini (1988), as aplicações típicas desses aços correspondem a uma série de componentes da indústria automobilística, incluindo engrenagens de transmissão, coroas, pinhões, engrenagens de diferenciais, parafusos, eixos de comando de válvulas, pinos de pistão, etc. Peças desses mesmos tipos são empregadas no estado cementado em tratores, caminhões, aviões, máquinas operatrizes, etc.

4.4 FLUXO DE PROCESSO DO AÇO SAE 8620 NA ACIARIA

4.4.1. Introdução

Após a definição da qualidade de aço para estudo, partiu-se para o acompanhamento da produção do aço SAE 8620 na planta industrial.

Foram acompanhados dois seqüenciais de produção do SAE 8620: o primeiro de quatro corridas (18/03/03), e o segundo de cinco corridas (31/03/03). Em cada seqüencial foi escolhida uma corrida para a realização de amostragens e medições além das comumente realizadas pelo padrão de operação da planta. No primeiro seqüencial foi escolhida a corrida chamada “A” e no segundo a corrida chamada “B”.

Nestes acompanhamentos, diversas informações foram coletadas, tais como:

- Quantidade de sucata, gusa e demais ligas adicionadas no FEA;
- Ligas utilizadas no processo, bem como sua quantidade, momento de adição e análise química;
- Medições de temperatura;
- Análise química do aço e escória dos pontos amostrados;
- Medição de oxigênio ativo (o qual será descrito no item 4.4.2.);

- Tempos característicos de processo;
- Outras variáveis de interesse.

4.4.2. Amostragem e equipamentos utilizados para análise química

Na Gerdau Aços Finos Piratini, as provas de aço são chamadas de P's e as provas de escória de E's. O número após cada letra representa a seqüência de amostragem e o local onde foi realizada a amostragem. Por exemplo, a amostra P1 é retirada no FEA, antes da prova P5, que é a primeira amostra retirada no forno-panela. Os números, no entanto, não indicam que a P5 é a quinta amostra retirada, pois as amostras intermediárias (P2, P3 e P4) não foram coletadas. O tipo de amostrador e a amostragem das provas de aço serão descritos em detalhes no item 4.6.2 deste trabalho. As amostras de escória (E's) são retiradas no mesmo momento que as amostras de aço.

As amostras de aço utilizadas para análise química foram posteriormente utilizadas para análise de inclusões. A análise de inclusões será descrita no item 4.6.3.

As análises químicas foram realizadas no laboratório químico da Gerdau Aços Finos Piratini:

- As análises de aço foram realizadas em um espectrômetro de emissão ótica ARL modelo 3560.
- As análises de escória foram realizadas em um espectrômetro de fluorescência de raios-x Philips PW-2600.
- As análises de enxofre, nitrogênio e oxigênio total foram realizadas no determinador de C e S modelo CS 444 LS.

Outras análises são realizadas dentro da aciaria:

- Os medidores de temperatura utilizados são do fabricante Heraeus Electro-Nite, como mostrado na figura 4.9.



Figura 4.9 - Medidores de temperatura utilizados.

Fonte: <http://www.electro-nite.be/Products/IronAndSteel.html>

– Os medidores de oxigênio ativo utilizados são do fabricante Heraeus Electro-Nite, marca CELOX, como mostrado na figura 4.10.



Figura 4.10 - Medidores de oxigênio ativo utilizados.

Fonte: <http://www.electro-nite.be/Products/IronAndSteel.html>

4.4.3. Descrição do Processo

O processo que será descrito em detalhes é o da corrida “B”, pelo fato de que o acompanhamento da corrida “A” teve como função principal à familiarização com o processo de produção do aço SAE 8620.

Iniciando-se pelo carregamento do forno, a carga do FEA consiste de sucata, gusa, cal calcítica e cal dolomítica. As etapas de carregamento, fusão e vazamento levam em conjunto cerca de 1 hora. São adicionados por uma calha durante o vazamento FeSi e FeSiMn como desoxidantes e cal e alumina como escorificantes.

Pouco antes do vazamento, ainda no forno elétrico, foram medidas a temperatura e o oxigênio ativo utilizando amostrador do tipo CELOX. Além dessas medidas foi realizada a retirada de provas de aço e escória, chamadas de P1 e E1.

A panela é transportada via ponte rolante para a estação do forno-panela. Essa operação leva de cinco a dez minutos, dependendo da disponibilidade da ponte rolante.

Foram retiradas provas de aço e de escória (P5 e E5) na chegada da panela ao forno-panela, imediatamente antes da adição dos redutores de escória (geralmente FeSi e CaC_2). Também foram realizadas medidas de temperatura e oxigênio ativo logo após as provas P5 e E5. Cerca de seis minutos depois, foram retiradas as provas de aço e escória P6 e E6. Os resultados das provas P6 e E6 definem a quantidade de ligas que serão adicionadas: no aço, com a função de ajuste de composição química e na escória para o ajuste do índice de basicidade desejado. Na prova P6 e até o final da corrida não foi possível a análise de oxigênio ativo, pois não haviam mais lanças disponíveis para este tipo de análise. Em vista disso, foi realizada posteriormente a análise de oxigênio total das amostras de aço.

Após a homogeneização das ligas por agitação com argônio e a correção da temperatura, foi realizada nova amostragem de aço e escória, chamada de P7 e E7. Também

foi realizada a medição da altura de escória após a prova P7/E7. A altura de escória é um parâmetro utilizado para o cálculo da massa de escória na panela. Esses cálculos serão descritos no item 5.2 do trabalho. Com o resultado das provas P7 e E7 é realizada a segunda adição de ligas no FP.

Após a homogeneização final das ligas, a panela é transportada até a estação de vácuo para a retirada de hidrogênio do aço.

Após o vácuo ocorre a retirada das provas de aço e escória chamadas, respectivamente, P11 e E11. No intervalo que se estende do fim do período de vácuo até o transporte da panela para o lingotamento contínuo ocorrem às adições, em seqüência, dos fios de alumínio e de cálcio-silício (CaSi). Neste acompanhamento, foi solicitado ao operador a retirada de uma prova de aço e escória imediatamente antes da injeção do fio de CaSi, as quais foram nomeadas, respectivamente, de P12 e E12.

Após a adição do fio de CaSi a escória é recoberta com casca de arroz calcinada para isolamento térmico. Em seguida, de acordo com o resultado da prova P11/E11, são adicionadas as últimas ligas, tipicamente níquel eletrolítico e fio de enxofre. Neste acompanhamento, foi retirada uma amostra de aço e escória pouco antes da injeção do fio de S, chamada de P13 e E13.

Após o transporte da panela até a torre do LC, enchimento do distribuidor e início do lingotamento, no distribuidor é retirada uma amostra de aço, chamada de PF. Esta amostra é guardada pelo setor de garantia de qualidade da empresa por até cinco anos e representa a composição química final do aço. Em vista disso, foi retirada uma amostra extra de aço para análise posterior de inclusões. Como na torre do LC os operadores não possuem amostradores para a retirada de escória, não foi realizada amostragem de escória no distribuidor. Também não foi realizada a análise de oxigênio ativo, pois na torre do LC não existe lança para acoplamento do amostrador do tipo CELOX.

Tanto a corrida “A” quanto à corrida “B” foram lingotadas em seção quadrada de 150 mm.

4.5. LEVANTAMENTO ESTATÍSTICO DA PRODUÇÃO

Depois de realizado o acompanhamento de corridas do aço SAE 8620, foi realizada a comparação entre os valores obtidos nas provas das corridas amostradas para este trabalho com a média geral de um ano de produção de SAE 8620 (30/03/02 a 18/03/03). Foi realizada

uma seleção dos elementos de maior importância no aço e escória e realizou-se uma análise comparativa.

Os objetivos deste levantamento foram:

Determinar o padrão de operação para a produção deste aço, com relação às análises químicas de aço e escória;

Determinar qual era a variação dos teores dos elementos ao longo do processo, e não somente na composição final do aço;

Verificar se as corridas amostradas neste trabalho estão dentro da variação de valores encontrada no levantamento de 1 ano de produção, ou seja, se estão dentro do padrão de operação;

Pela análise dos desvios-padrão, verificar se poderiam ser utilizados como dados de entrada para a simulação, a média dos teores dos elementos no aço e escória.

As médias foram calculadas para uma amostragem de 180 corridas de SAE 8620. Para alguns elementos foram construídos histogramas para uma análise mais detalhada.

Os resultados foram apresentados no relatório do Projeto Verde-Amarelo - Meta 1 de junho de 2003. As principais conclusões deste levantamento serão apresentadas no item 5.1 deste trabalho.

4.6. EVOLUÇÃO DAS INCLUSÕES AO LONGO DO PROCESSO

4.6.1. Introdução

Neste trabalho já foi relatada a influência significativa da presença de inclusões deletérias no produto final, bem como os problemas operacionais que esse tipo de inclusões podem causar ainda na produção do aço na aciaria.

Para entender como ocorre a formação e modificação das inclusões durante o processamento do aço - particularmente as micro-inclusões - é necessária a obtenção do chamado “perfil das micro-inclusões”. Esse perfil pode ser caracterizado como a evolução da composição química, tamanho médio e área ocupada pelas inclusões nas várias etapas de processamento do aço.

A análise das microinclusões também fornece dados sobre o efeito de cada adição de liga sobre a composição química e distribuição das inclusões.

4.6.2. Amostragem

Utilizou-se para a retirada de amostras de aço desde o forno elétrico até o distribuidor na corrida “B”, um amostrador apropriado (tipo “lollipop”) Heraeus Electro-Nite. A figura 4.11 mostra uma das amostras logo após a sua retirada, e a figura 4.12 mostra o momento da amostragem no forno-panela.



Figura 4.11 - Amostra de aço.



Figura 4.12 - Amostragem no forno-panela.

Foram retiradas amostras de aço e escória em diversas etapas do processo da corrida “B”, listadas abaixo:

- Antes do vazamento (P1);
- Na chegada da panela ao forno-panela (P5);
- Análise química que antecede a primeira adição de ligas no forno panela (P6);
- Análise química que antecede a segunda adição de ligas (P7);
- Após a etapa de degaseificação do aço (P11);
- Antes do fio de CaSi (P12);
- Antes do fio de S (P13);
- Amostra do aço final no distribuidor (PF).

4.6.3 Preparação dos corpos de prova e análise das inclusões

Seguindo o procedimento de Velásquez et al. (2002), os corpos de prova foram preparados por método metalográfico tradicional: corte, lixamento em lixas de granas 100, 220, 320, 400, 600 e 1000 e posteriormente polidos com pasta de diamante de 4 μ m e 1 μ m. Os corpos de prova não passaram por ataque químico. A figura 4.13 mostra o desenho

esquemático do corte e do local analisado em amostras do tipo “lollipop”. A figura 4.14 mostra, da esquerda para a direita: o corpo de prova original, após o corte e após o polimento.

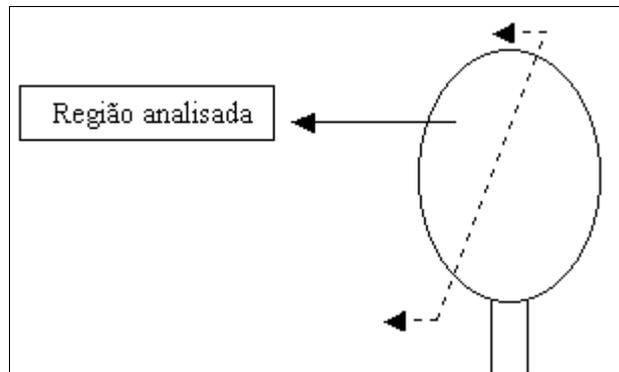


Figura 4.13 - Desenho esquemático do local analisado em amostras do tipo “lollipop”.



Figura 4.14 - Preparação dos corpos de prova para análise.

Ainda seguindo o trabalho de Velásquez et al. (2002), os corpos de prova preparados foram analisados no microscópio óptico marca para contagem das inclusões, em um aumento de 500x. Na contagem é analisado um campo total de 50 mm². Este campo é dividido por linhas para facilitar a operação de contagem. As inclusões foram classificadas por tamanho: 4-10 µm, 10-20 µm, 20-50 µm e >50 µm. Também foram separadas por tom: pretas como óxidos e cinzas como sulfetos.

Após a contagem das inclusões os corpos de prova foram analisados em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) Philips CDU-LEAP-DETECTOR (figura 4.15), no qual através da utilização da microsonda EDS acoplada modelo EDAX - Modelo XL-20 realizou-se a análise química elementar das inclusões.



Figura 4.15 - Microscópio Eletrônico de Varredura com Microsonda EDS acoplada.

A figura 4.16 (a) mostra o aspecto de uma inclusão analisada via MEV, a figura 4.16 (b) mostra o espectro de análise química desta inclusão e a figura 4.17 mostra o resultado da análise química via EDS, de acordo com Bielefeldt et al. (2002).

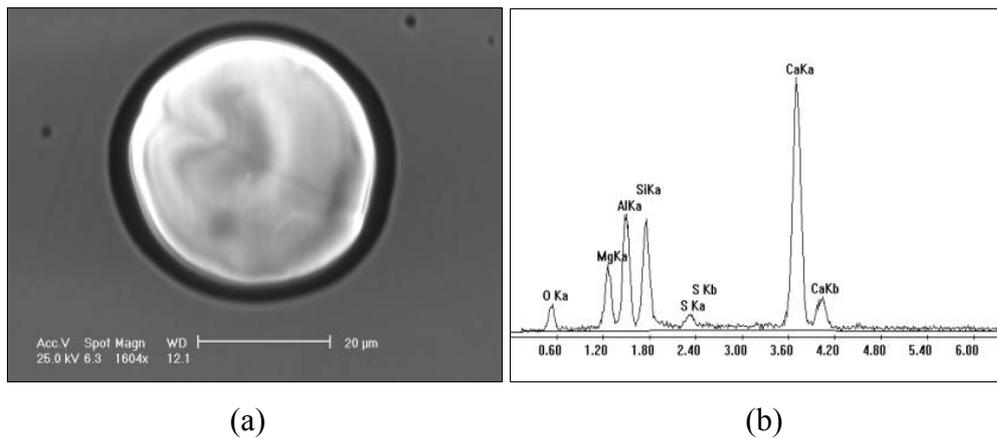


Figura 4.16 - Análise de inclusões via MEV/EDS.

Elem	Wt %	At %
O K	28.44	43.35
MgK	9.15	9.17
AlK	16.55	14.95
SiK	16.50	14.32
S K	2.26	1.72
CaK	27.11	16.49

Figura 4.17 - Resultado de análise química elementar via Microsonda EDS.

Os elementos detectados na análise química elementar foram convertidos para os óxidos mais estáveis (exceção feita para o S).

Geralmente, segundo Ribeiro (2002), os compostos (como as escórias e as inclusões não metálicas) são formados por diversos óxidos. Devido a isto, algumas de suas propriedades e características (como a viscosidade, tipo de composto formado e temperatura de fusão) são de difícil determinação. Quando se faz a análise dos três principais óxidos (>80%) existentes no composto, os diagramas de fase são chamados de ternários. As linhas isotermas indicam o ponto de fusão dos compostos nos diagramas ternários.

De posse destes resultados, foi realizada a seleção do diagrama ternário mais apropriado segundo a composição dos óxidos e feita mais uma conversão, esta para permitir a plotagem das inclusões no ternário selecionado.

A preparação das amostras e análise de inclusões via microscópio ótico e eletrônico de varredura foram realizadas pelo grupo de engenharia de inclusões do Laboratório de Siderurgia (LASID), utilizando os equipamentos do Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS.

Os resultados foram apresentados no relatório do Projeto Verde-Amarelo - Meta 1 de junho de 2003. As principais conclusões serão apresentadas no item 5.3 deste trabalho.

4.7. SIMULAÇÃO DO EQUILÍBRIO AÇO/ESCÓRIA/INCLUSÕES

4.7.1. Bancos de dados

No FactSage são disponibilizados dois tipos de bancos de dados termoquímicos:

Bancos de dados de substâncias puras:

- Incluem dados para ΔH (formação), S, $C_p(T)$, coeficientes magnéticos, volumes molares, expansividades (T) e compressibilidades (P,T).

Bancos de dados de soluções reais:

- Para ligas, soluções aquosas, cerâmicas, sais, mates, escórias, etc.

- Os dados são armazenados como função de G para as fases constituintes e parâmetros de mistura G^E entre as fases constituintes. O FactSage mantém 14 diferentes modelos de soluções.

4.7.2. Modelo de Minimização da Energia de Gibbs

Oertel (1997) relata que diferentes algoritmos para o cálculo das condições de equilíbrio são empregados por diferentes programas. De forma geral, a estratégia mais comum é a minimização da energia livre do sistema, a partir do modelo desta função para cada fase e da fixação de um número suficiente de variáveis termodinâmicas para que o problema tenha solução única.

O modelo de minimização de energia de Gibbs segue a equação:

$$G = \sum_{\substack{\text{gás} \\ \text{ideal}}} n_i (g_i^o + RT \ln P_i) + \sum_{\substack{\text{fases} \\ \text{puras} \\ \text{condensadas}}} n_i g_i^o + \\ + \sum_{\substack{\text{solução} \\ 1}} n_i (g_i^o + RT \ln X_i + RT \ln \gamma_i) + \\ + \sum_{\substack{\text{solução} \\ 2}} n_i (g_i^o + RT \ln X_i + RT \ln \gamma_i) + \dots$$

onde:

n_i - moles

P_i - pressão parcial do gás

X_i - fração molar

γ_i - coeficiente de atividade

g_i^o - energia de Gibbs molar padrão

O módulo do software FactSage chamado Equilib determina a combinação de n_i , P_i e X_i que minimiza a energia de Gibbs (G) total do sistema.

4.7.3. Módulos disponíveis no software

O software é dividido em grupos de módulos, como se pode observar na figura 4.18.



Figura 4.18 - Tela de apresentação do software FactSage.

a) Módulos de informações

•**Slide Show**

–lista de apresentações do power point contendo explicações e exemplos de aplicações dos módulos.

•**General**

–para acessar a ajuda ou entrar em contato com os desenvolvedores do software.

b) Módulos de visualização e manipulação de bancos de dados

•**View Data**

–lista as substâncias puras e exibe seus dados.

–lista as fases de cada tipo de solução.

•**Compound** – é possível entrar com substâncias puras em um banco de dados construído pelo usuário.

•**Solution** – é possível entrar com propriedades de misturas não ideais em um banco de dados construído pelo usuário.

c) Módulos de cálculos.

Esses módulos acessam os bancos de dados, permitindo realizar uma variedade de cálculos termoquímicos e produzir vários tipos de tabelas e figuras.

- **Reaction** – é possível calcular as propriedades termodinâmicas das espécies ou das reações químicas.
- **Predom** – para calcular e plotar diagramas de predominância usando o banco de dados de substâncias puras.
- **EpH** – para calcular e plotar diagramas de Eph (Pourbaix) usando o banco de dados de substâncias puras.
- **Equilib** – este módulo utiliza o modelo de minimização da energia de Gibbs para simular equilíbrios heterogêneos complexos usando o banco de dados de substâncias puras e de soluções.
- **Phase Diagram** – para calcular e plotar diagramas de fase usando o banco de dados de substâncias puras e de soluções.
- **Optimize** – para otimização do banco de dados termodinâmico e de diagramas de fase.

d) Módulos de manipulação dos resultados.

Esses módulos acessam os resultados produzidos pelos módulos de cálculo e permitem construir tabelas e gráficos ou ainda criar misturas ou soluções para serem reutilizadas nos módulos de cálculo.

4.7.4. Simulando o equilíbrio aço/escória/inclusões

Na etapa de simulação, alguns passos básicos são seguidos. Com base no levantamento de dados da corrida é realizada uma relação dos dados de entrada do software. No caso deste trabalho, é a relação da quantidade de aço e escória que se deseja simular, podendo ter ou não adição de ligas. A determinação da massa de escória é feita de maneira indireta, como será mostrado no item 5.2 deste trabalho. Então, deve-se inicialmente especificar os elementos no aço e escória e sua quantidade, como mostra a figura 4.19.

Aço	kg	Wt, %	Escória	kg	Wt, %
Fe	63057,4	98,50	MgO	69,8	6,74
Al	7,1	0,011	FeO	13,2	1,27
C	44,2	0,069	MnO	37,0	3,57
Ca	0,6	0,001	SiO2	220,7	21,31
Cr	105,6	0,165	CaO	518,3	50,05
Cu	100,5	0,157	Al2O3	170,0	16,42
Mn	327,0	0,511	S	6,5	0,63
Mo	70,4	0,110		1035,5	100,00
N	8,6	0,013			
Nb	0,0	0,000			
Ni	135,7	0,212			
O	15,2	0,024			
P	6,4	0,010			
S	16,0	0,025			
Si	118,9	0,186			
Sn	6,4	0,010			
Mg	0,0	0,000			
	64020,0	100,00			

Figura 4.19 - Dados de entrada para a simulação.

O segundo passo é a inserção dos dados de entrada no software, dentro do módulo de cálculo Equilib.

As figuras 4.20 e 4.21 mostram os passos para a realização de uma nova simulação.

Os passos para a realização de uma nova simulação são:

- 1°. Abrir um novo arquivo;
 - 2°. Definir os reagentes. Pode-se especificar as condições iniciais de temperatura e pressão para cada reagente em “initial conditions” (condições iniciais);
- Depois de definidos os reagentes, clica-se em next para ir para a próxima janela.
- 3°. Definir os prováveis compostos que serão formados e as soluções que serão consideradas;
 - 4°. Definir as condições finais de temperatura e pressão;
 - 5°. Calcular o equilíbrio.

Reactants Janela de reagentes

Adicionar um novo reagente

Tabela de reagentes

Equilib possui 4 janelas:

Janela **Reactants**

Janela **List**

Janela **Results**

Janela de **Menu**

F Reactants - Equilib

File Edit Tools Data Search Help

T(K) P(atm) Energy(J) Mass(mol) Vol(l)

1 - 4

Abrir

1^a passo: Clicar para criar um novo arquivo

Mass(mol)	Species	Phase	T(K)	P(total)**	Stream#	Data
1	Mg	solid	1000.00	1.0	1	FACT
+ 3	Cu2O	solid	1000.00	1.0	1	FACT
+ 2	Fe3C	solid-1 solid-a	1000.00	1.0	1	FACT
+ 1	Ar	gas	1000.00	1.0	1	FACT

2^a passo: Definir os reagentes

Lista de bancos de dados de compostos e soluções

initial conditions Para seleccionar como condições iniciais

initial conditions

Next >>

Pressionar «Next» para ir até a janela de **Menu**

FactSage™

FactSage 5.0 Compound: FACT Solution: FACT

Figura 4.20 - Inserção dos dados de entrada no software FactSage.

Janela Menu

Sumário da janela Reactants.

3º passo:
 Selecção dos produtos compostos, ex.: fase gás ideal e fase sólido puro.
 Selecção das soluções, ex.: fase ferro líquido e fase escória.

4º passo:
 Condições finais: ex.: 25°C, 1 atm.

5º Pressionar para calcular o equilíbrio.

FactSage 5.0

Figura 4.21 - Definição das condições de simulação.

A figura 4.22 mostra o resultado de uma simulação de dessulfuração com CaSi.

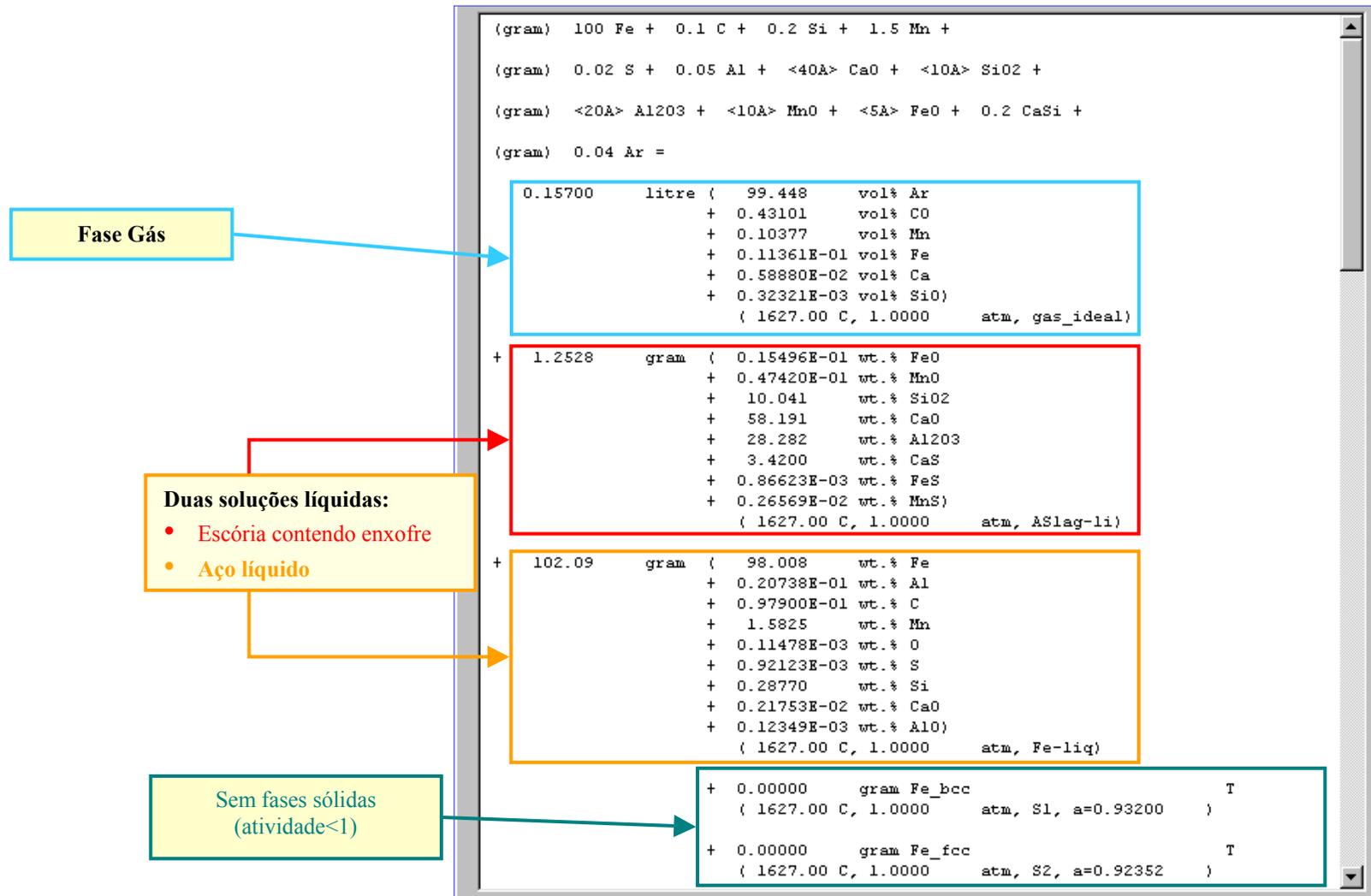


Figura 4.22 - Apresentação dos resultados do software FactSage.

Nos resultados, o software também apresenta os valores das grandezas termodinâmicas, como Energia Livre e Entalpia.

Nas janelas “List” e “Results” é possível verificar a distribuição de um elemento nas diversas fases formadas, verificar a quantidade dos elementos em gramas, mol e % em peso e plotar diversos tipos de gráficos.

Com os resultados obtidos pela simulação, é possível interpretar os fenômenos que acontecem durante o refino do aço do ponto de vista termodinâmico. É possível exportar os resultados para o Microsoft Excel, e assim construir gráficos e tabelas comparativas de resultados.

Como a versão do FactSage 5.1 é em ambiente Windows, sua manipulação é muito simples. A principal meta é entender como ocorrem os fenômenos termodinâmicos e interpretar de maneira correta os resultados obtidos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 LEVANTAMENTO ESTATÍSTICO DA PRODUÇÃO

Depois de feito o levantamento de dados para as corridas “A” e “B”, realizou-se a comparação entre os valores obtidos nas provas de cada corrida com a média geral de 1 ano de produção de SAE 8620. Foi realizada uma seleção dos elementos de maior importância no aço e escória e realizou-se uma análise comparativa. Os resultados completos podem ser analisados no relatório do Projeto Verde-Amarelo - Meta 1 de junho de 2003. Neste trabalho serão relatadas as principais conclusões deste levantamento.

Com relação aos elementos Si, C, Cr, Mn, Ni e Mo no aço e os elementos CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO e S na escória, encontrou-se um baixo desvio padrão em relação à média total. Os teores desses elementos medidos nas duas corridas estão dentro do desvio padrão da média de 1 ano de produção de SAE 8620.

A figura 5.1 mostra a comparação entre a média e os valores medidos nas corridas “A” e “B” para os teores de silício e carbono para as provas P6, P7, P11 e PF (análises padrão na planta). A tabela 5.1 mostra os desvios padrão para as provas P6, P7, P11 e PF para Si e C.

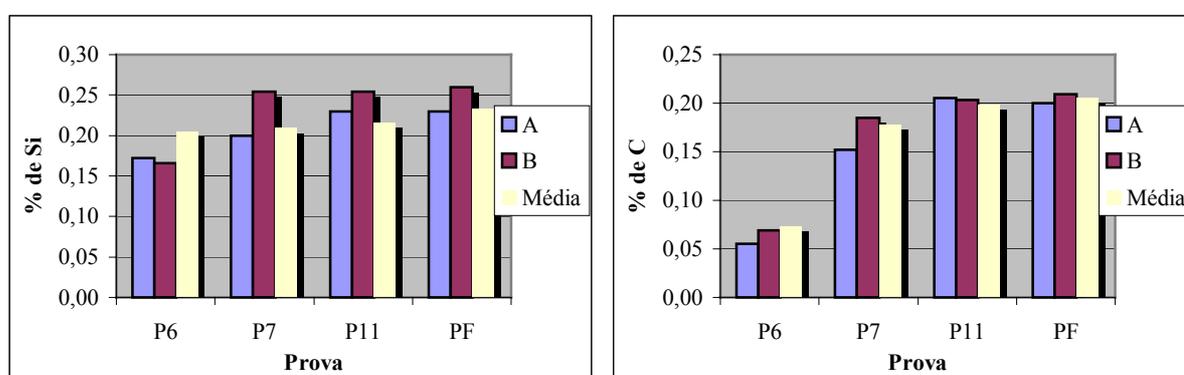


Figura 5.1 - Comparativo entre as corridas “A”, “B” e média para Si e C.

Tabela 5.1 - Desvio padrão das médias de silício e carbono por prova em %.

	P6	P7	P11	PF
Si	0,040	0,031	0,031	0,022
C	0,018	0,022	0,010	0,008

No entanto, o mesmo não ocorreu com os elementos alumínio, cálcio e enxofre no aço e FeO e MnO na escória, elementos críticos com relação a formação de inclusões. O desvio

padrão para esses elementos é alto, provavelmente devido à variação no nível de oxidação (teor de oxigênio) do aço (corridas mais ou menos oxidadas).

O levantamento de dados mostra um alto desvio padrão na análise de FeO e MnO, principalmente na prova E6, associado provavelmente a variação da quantidade de escória que passa do forno elétrico para a panela.

No gráfico da figura 5.2, é possível fazer uma análise para os teores de enxofre no aço ao longo das provas.

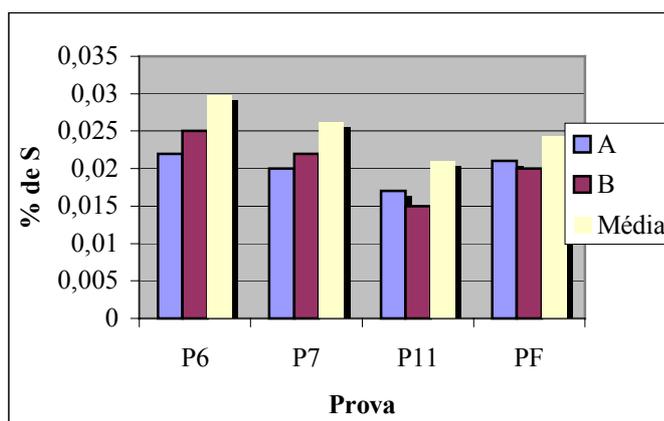


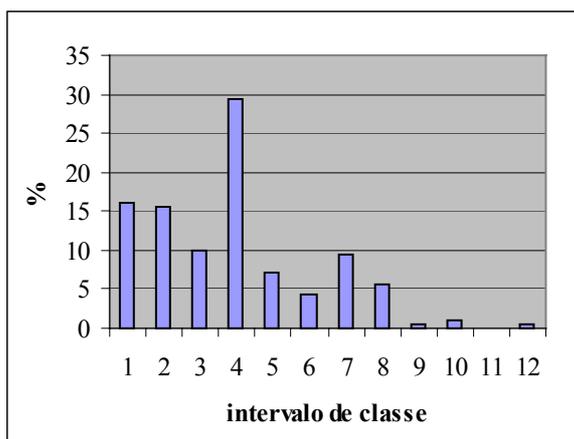
Figura 5.2 - Comparativo entre as corridas “A”, “B” e média para o enxofre.

Embora o desvio padrão seja elevado, as corridas analisadas apresentam a mesma tendência que a média. Pode-se observar que o teor de enxofre cai até a P11, subindo na PF (pela adição de enxofre). Os desvios padrão das provas podem ser analisados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Comparativo entre as corridas “A”, “B”, média e desvio padrão para o enxofre em %.

	P6	P7	P11	PF
A	0,022	0,02	0,017	0,021
B	0,025	0,022	0,015	0,02
Média	0,030	0,026	0,021	0,024
Dpadrão	0,007	0,007	0,018	0,003
Valor Máx.	0,053	0,047	0,231	0,035

Uma análise mais detalhada foi realizada pela construção de histogramas, com o objetivo de analisar qual era a frequência de valores para os teores dos elementos durante o ano de produção. O histograma da prova PF para a análise de enxofre pode ser visto na figura 5.3.



PF				Número de
	Intervalo			ocorrências
1	0,02000	-	0,02125	29
2	0,02125	-	0,02250	28
3	0,02250	-	0,02375	18
4	0,02375	-	0,02500	53
5	0,02500	-	0,02625	13
6	0,02626	-	0,02751	8
7	0,02751	-	0,02876	17
8	0,02876	-	0,03001	10
9	0,03001	-	0,03126	1
10	0,03126	-	0,03251	2
11	0,03251	-	0,03376	0
12	0,03376	-	0,03501	1
				180

Figura 5.3 - Histograma para a análise de enxofre da prova PF.

Embora a dispersão de valores esteja dentro da faixa de composição química do aço, ela é crítica quando analisado pela ótica da formação de inclusões. Desta forma, usar como dados de entrada para a simulação a média dos elementos seria válido somente para os elementos ditos “majoritários”, como carbono, manganês, cromo, etc. Para os elementos críticos com relação à formação de inclusões como: alumínio, cálcio e enxofre; o melhor é trabalhar com os dados de uma corrida específica e retirar amostras para a análise do perfil das inclusões.

Com base nos dados apurados concluiu-se que as corridas “A” e “B” estão dentro do padrão de operação de produção do aço SAE 8620. Desta maneira, foram utilizados como dados de entrada para a simulação os dados da corrida “B”, mais completos em termos de dados operacionais e de análise química.

5.2 DETERMINAÇÃO DA MASSA DE ESCÓRIA DURANTE O REFINO DO AÇO NO FORNO-PANELA

Passo importante para o modelamento é a determinação da massa de escória durante a operação de refino no forno-panela, em especial a quantidade de escória que passa do FEA para a panela durante o vazamento. Foram utilizados três métodos para determinar a massa de escória.

5.2.1. Determinação da massa de escória na panela pela sua densidade

O primeiro passo neste método é determinar a densidade da escória. Para obter esse valor, é necessário conhecer a composição da escória em estudo. Neste caso, a escória em estudo é a da prova E7. Em seguida, deve-se procurar na literatura o valor de densidade de acordo com a composição da escória em estudo. A tabela 5.3 compara a composição da escória da prova E7 com a composição de escória mais semelhante, e que possui dados de densidade, obtida no Slag Atlas (1995).

Tabela 5.3 - Comparação entre os valores obtidos na E7 e os valores obtidos no Slag Atlas (1995).

Elemento	Composição na E7 (%)	Slag Atlas p. 341 Fig. 8.111 (%)
Al ₂ O ₃	19,73	20
CaO	47,71	55
MgO	8,42	10
SiO ₂	22,58	15

Em seguida, foi realizado o cálculo da massa de escória utilizando:

- o valor de densidade encontrado - neste caso foi de 2,72g/cm³;
- a altura de escória medida na planta = 9 cm;
- a área da panela.

A figura 5.4 mostra a planilha construída no excel para o cálculo da massa de escória na panela.

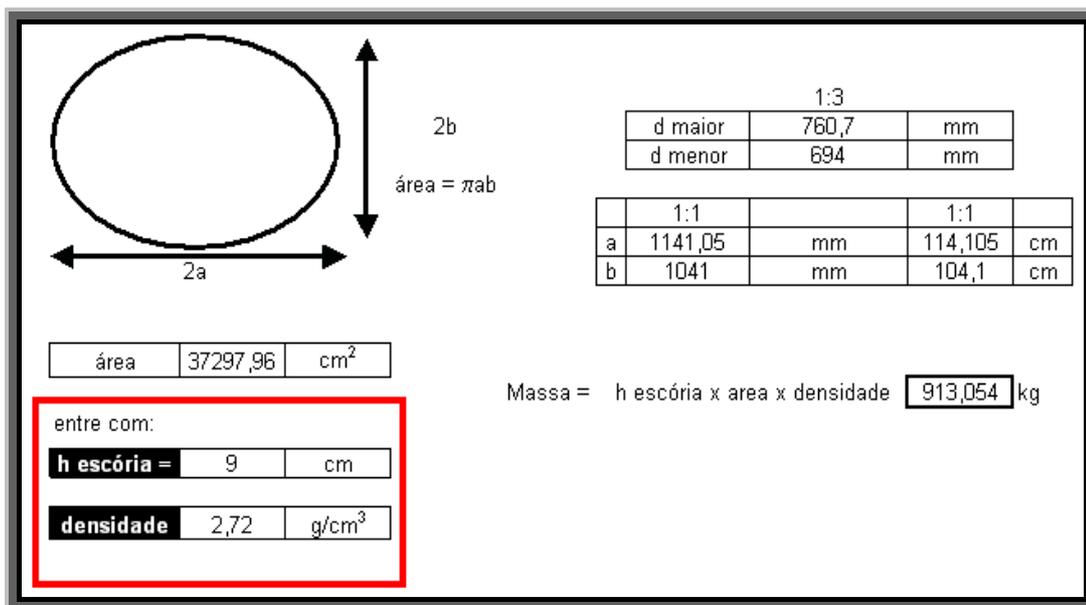


Figura 5.4 - Planilha para cálculo da massa de escória da panela.

O valor obtido foi de 913,05 kg.

5.2.2. Determinação da massa de escória na panela via balanço de massa

Neste método foi realizado o balanço de massa utilizando: a massa de adições no vazamento, a % de silício e manganês no aço antes e depois do vazamento, a massa de escorificantes adicionada e a massa de escória que passa do forno elétrico para a panela. Em primeiro lugar foi calculada a quantidade de escória que passa do forno elétrico para a panela durante o vazamento. A planilha de cálculo é mostrada na figura 5.5.

Quantidade de escória que passou do forno para a panela - método de reversão do fósforo

WM-L	massa de metal na panela	64000	kg	
[%P]-L	% de P no aço da panela	0,01	%	
WM-F	massa de metal no forno	73000	kg	
[%P]-F	% de P no aço do forno	0,008	%	
WS-L	massa de escória na panela	1000	kg	
(%P)-L	% de P na escória da panela	0,022	%	
(%P)-F	% de P na escória do forno	0,300	%	

$\frac{WM-L \times [%P]-L - WM-F \times [%P]-F + WS-L \times (%P)-L}{(%P)-F - (%P)-L}$				279,9 kg
--	--	--	--	----------

fração do P no P ₂ O ₅	0,436429	
% de P ₂ O ₅ na E1	0,687	%
% de P ₂ O ₅ na E5	0,05	%
%P na E1	0,2998	%
%P na E5	0,0218	%

Valores calculados de forma automática

Figura 5.5 - Planilha de cálculo da quantidade de escória que passa do forno para a panela.

A figura 5.6 mostra a planilha de cálculo do balanço de massa e determinação da massa de escória.

Com relação à planilha da figura 5.6 vale ressaltar que para o cálculo foi considerada a dissolução completa das ligas e que todo óxido formado incorporou-se à escória.

O método de reversão de fósforo permite calcular a quantidade de escória que passa durante o vazamento. A escória do forno possui teores elevados de FeO e MnO. Esses óxidos tendem a ser reduzidos no forno-panela, liberando oxigênio para o banho. Esse oxigênio vai formar novas inclusões, por isso o controle da passagem de escória torna-se importante. Esse método foi obtido no trabalho de Subramanian et al. (2002).

5.2.3. Estimativa da planta

O terceiro método é a estimativa da planta, que calcula a massa de escória em 120 kg por centímetro de altura de escória. Para este caso: $120 \text{ kg/cm} \times 9 \text{ cm} = 1080 \text{ kg}$.

Os três métodos mostram que a massa de escória durante o refino no forno-panela é de cerca de 1000 kg. Esse valor será o utilizado na etapa de simulação.

5.3 EVOLUÇÃO DAS INCLUSÕES AO LONGO DO PROCESSO

Os resultados foram divididos em evolução da composição química das inclusões (item 5.3.1.) e contagem das inclusões (item 5.3.2.).

5.3.1. Evolução da composição química das inclusões

Após a escolha do diagrama ternário mais adequado - que representasse a composição global das inclusões em cada prova - foi calculada a média dos principais óxidos. Na figura 5.7 pode-se analisar a evolução da composição química das inclusões nas diversas provas coletadas durante o processo de fabricação do SAE 8620.

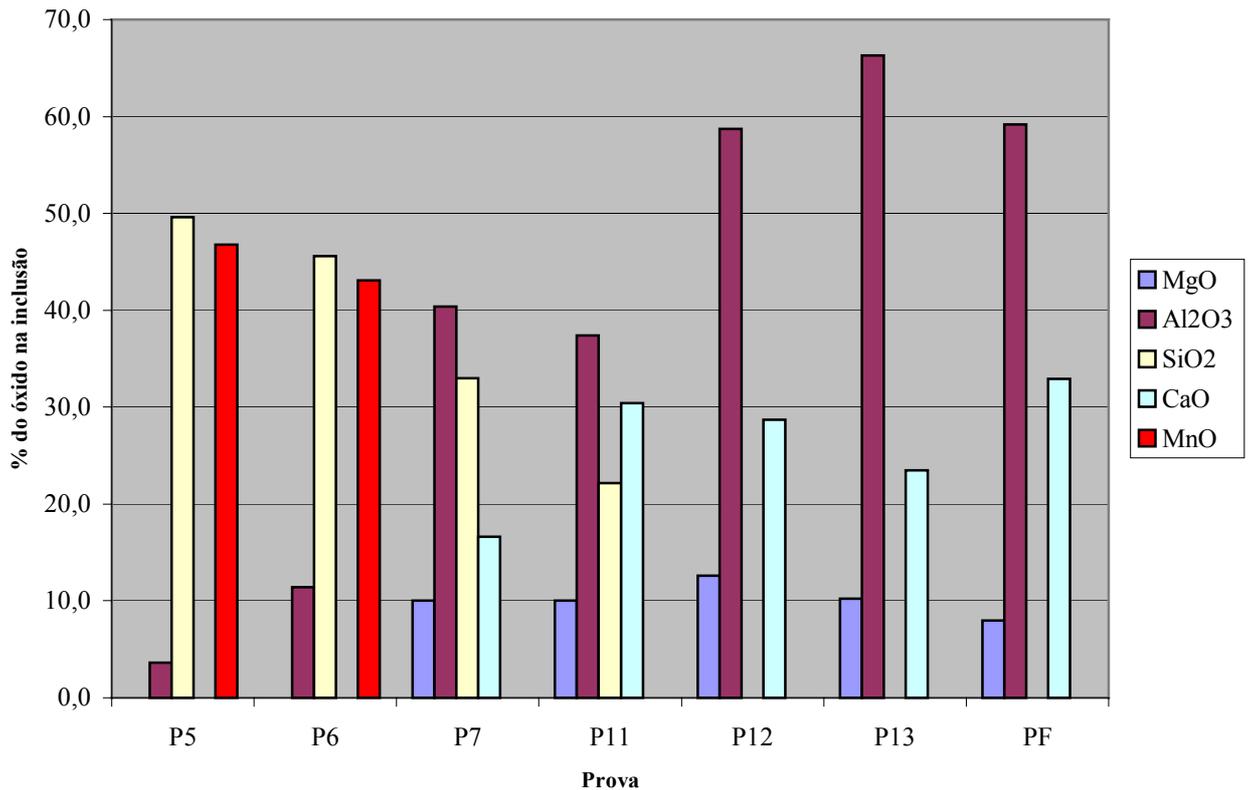


Figura 5.7 - Evolução da composição química das inclusões – média.

O gráfico da figura 5.7 permite observar que a composição química das inclusões passa por três estágios:

- 1- Nas provas P5 e P6, as inclusões caracterizam-se por serem originadas da etapa anterior de desoxidação.
- 2- Nas provas P7 e P11, o equilíbrio aço/escória influi significativamente na composição das inclusões.
- 3- Nas provas P12, P13 e PF a composição das inclusões depende fortemente do nível de oxidação do banho e das adições de ligas (Ca, S, Al) efetuadas.

As inclusões evoluem do sistema MnO - SiO₂ - Al₂O₃ nas provas P5 e P6 até inclusões do tipo CaO - Al₂O₃ - MgO nas provas P12, P13 e PF. Na tabela 5.4 é possível realizar uma análise quantitativa, onde foram calculados a média e o desvio padrão para cada prova.

Tabela 5.4 - Médias e desvios padrão após seleção dos diagramas ternários.

Média (%)					
PROVA	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MnO
P5	-	3,6	49,6	-	46,8
P6	-	11,4	45,6	-	43,1
P7	10,0	40,4	33,0	16,6	-
P11	10,0	37,4	22,2	30,4	-
P12	12,6	58,7	-	28,7	-
P13	10,2	66,3	-	23,5	-
PF	8,0	59,2	-	32,9	-

Desvio Padrão (%)					
PROVA	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MnO
P5	-	1,3	3,0	-	2,1
P6	-	4,3	3,1	-	3,3
P7	-	20,7	23,8	14,6	-
P11	-	20,7	11,0	15,1	-
P12	7,1	10,5	-	16,1	-
P13	7,6	17,8	-	15,3	-
PF	6,6	3,6	-	10,1	-

Na tabela 5.5 pode-se analisar a composição das inclusões ideais para cada prova.

Tabela 5.5 - Composição das inclusões ideais para cada prova.

composição das inclusões ideais (%)						
PROVA	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MnO	
P5	-	21	36	-	43	3MnO-Al ₂ O ₃ -3SiO ₂
P6	-	21	36	-	43	3MnO-Al ₂ O ₃ -3SiO ₂
P7	-	37	43	20	-	CaO - Al ₂ O ₃ - 2SiO ₂ CAS ₂
P11	-	37	43	20	-	CaO - Al ₂ O ₃ - 2SiO ₂ CAS ₂
P12	-	52	-	48	-	12CaO - 7Al ₂ O ₃ C ₁₂ A ₇
P13	-	52	-	48	-	12CaO - 7Al ₂ O ₃ C ₁₂ A ₇
PF	-	52	-	48	-	12CaO - 7Al ₂ O ₃ C ₁₂ A ₇

Fonte: Kiesling, R. et al; Non Metallic Inclusions in Steels Parts I-IV. The Institute of Materials, 1978.

Pela comparação das tabelas 5.4 e 5.5 conclui-se que as inclusões encontradas nas provas coletadas estão afastadas dos tipos ideais de inclusões. Esses tipos ideais de inclusões possuem propriedades físicas (ponto de fusão, viscosidade, deformabilidade) que favorecem sua retirada durante o processo na aciaria e minimizam os efeitos prejudiciais nas propriedades mecânicas do produto final.

O alto valor do desvio padrão para algumas provas pode ser compreendido quando se analisa a posição de cada inclusão no diagrama ternário. Para a prova P13, por exemplo, existem inclusões de 100% Al₂O₃ até inclusões próximas ao C₁₂A₇ (12CaO - 7Al₂O₃ com 48%

5.3.2. Contagem de inclusões

A contagem dos óxidos e sulfetos foi realizada seguindo o método descrito no item 4.6.3 do trabalho. Na figura 5.9 pode-se observar a distribuição das inclusões de acordo com as faixas de tamanho especificadas para a prova PF.

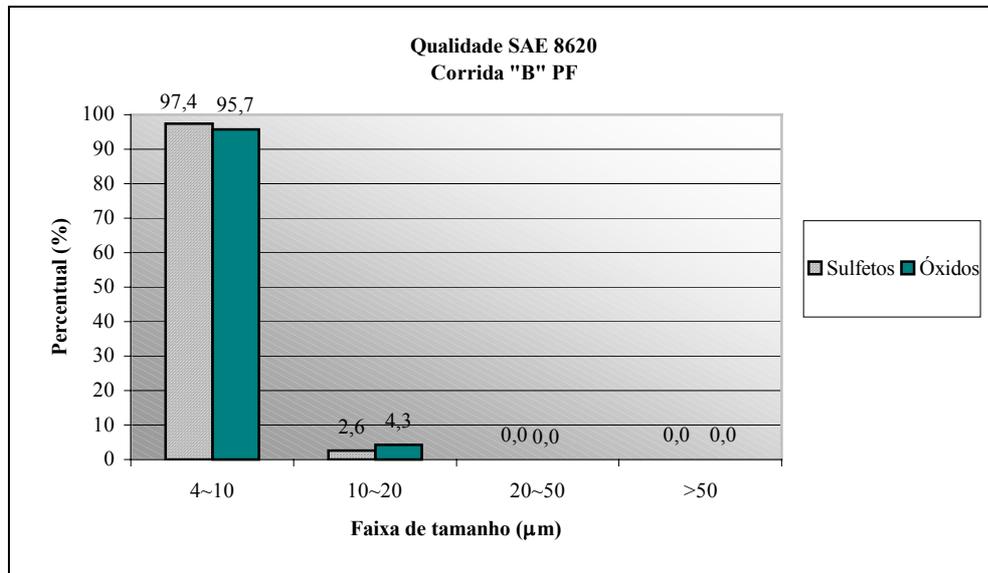


Figura 5.9 - Distribuição de tamanho de óxidos e sulfetos para a prova PF.

As demais provas seguiram o mesmo padrão, com o tamanho variando entre 04 e 10 µm. Isso mostra que, ou não ocorre a formação de macroinclusões, ou essa formação é reduzida, portanto não deverá ocasionar problemas operacionais durante o processo.

Na figura 5.10 é mostrada a área ocupada pelas inclusões ao longo das provas.

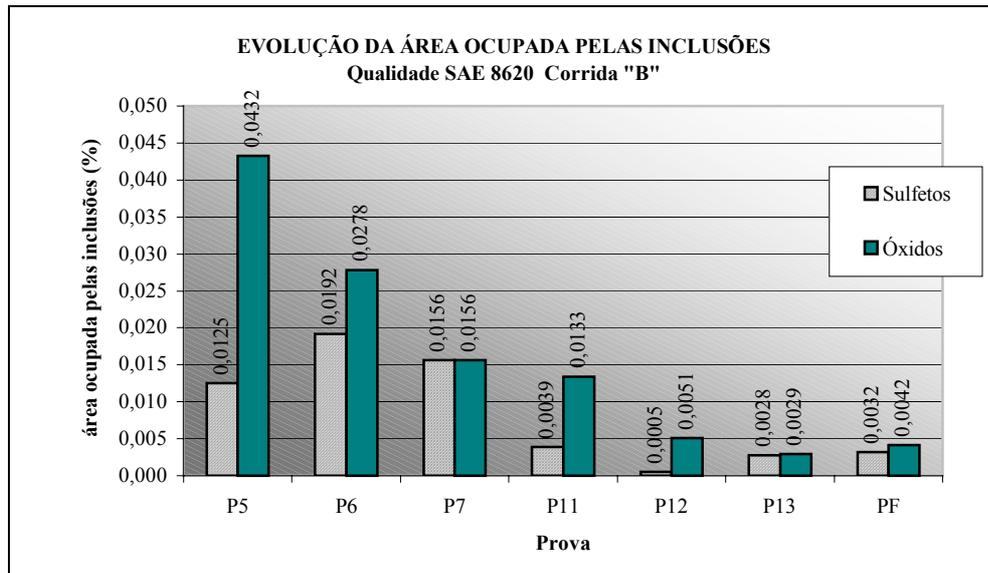


Figura 5.10 - Área ocupada pelas inclusões ao longo das provas em %.

Embora não exista uma faixa considerada ideal, o consenso existe quando se afirma que ela deve ser a menor possível. Neste gráfico, é possível observar que a área ocupada pelas inclusões de óxido diminui ao longo do processo, o que é desejado. Após o vácuo (P11) até o final do processo, observa-se que a área ocupada pelas inclusões de sulfeto aumenta. Isso se deve às adições de alumínio e cálcio, que tem alta afinidade pelo oxigênio. Com relação aos sulfetos, pode-se observar que a área ocupada nas provas P5 até P7 varia pouco. Esse fato é explicado, pois a escória utilizada neste aço não produz uma dessulfuração significativa. A ação do vácuo entre a P7 e a P11 faz com que o aço e a escória tenham uma forte interação, o que torna a dessulfuração mais efetiva, e a área ocupada pelos sulfetos torna-se menor. A área ocupada volta a aumentar até a PF, pela adição de fio de S, para adequar a faixa deste elemento no aço.

5.4 SIMULAÇÃO DO EQUILÍBRIO AÇO/ESCÓRIA

Para a realização deste estudo, inicialmente foi realizada a validação do software. A validação consiste em simular a produção atual do aço SAE 8620, comparando os resultados das análises químicas da planta com os resultados obtidos via simulação. Foram simuladas as etapas P6, P7 e P11 de adição de ligas e correção de escória no chamado refino secundário, no forno-panela, da corrida “B”. Como dados de entrada iniciais, foram utilizadas as análises químicas das provas P5 e E5, que compreendem a chegada da panela ao forno-panela, após a etapa de vazamento e desoxidação.

Em cada etapa subsequente, foram simuladas as adições de ligas de acordo com as realizadas na corrida “B” e comparados os valores medidos na planta com os valores obtidos via simulação.

Também foram utilizados como dados de entrada as medidas de temperatura e oxigênio total. A medida de oxigênio total representa a soma da quantidade de oxigênio formando óxidos no banho (inclusões) e o oxigênio livre (ativo) no banho.

Para a simplificação do modelo, aço e escória são consideradas fases quimicamente e termicamente homogêneas. Outras considerações são feitas ao longo deste item.

Foram realizadas três simulações, esquematizadas a seguir:

SIMULAÇÃO 1

Dados de entrada: Análise P5 e E5 da planta e ligas na etapa.

Para cálculo da quantidade dos elementos no aço e escória foram consideradas:

Massa de aço: 64 t Massa de escória: 1 t (item 5.2 do trabalho)

Adição de ligas após P5/E5:

Adições após prova P5		
20	kg	FeSi
20	kg	CaC ₂
40	kg	CaO

Foram utilizadas também as medições de:

Oxigênio total: 237 ppm.

Temperatura do aço: 1560 °C.

Temperatura da escória: 1560 °C.

SIMULAÇÃO 2

Dados de entrada: Resultado da simulação 1 e ligas da etapa.

Massa de aço e escória: resultado da simulação 1

Adição de ligas após P6/E6:

Adições após prova P6		
212	kg	FeCr AC
57	kg	FeMn AC
53	kg	FeMo BC
62	kg	FeSi
59	kg	grafite
150	kg	Ni eletrolítico

Foram utilizadas também as medições de:

Oxigênio total: resultado da simulação 1.

Temperatura do aço: 1580 °C.

Temperatura da escória: 1580 °C.

SIMULAÇÃO 3

Dados de entrada: resultado da simulação 2 e ligas da etapa.

Massa de aço e escória: resultado da simulação 2.

Adição de ligas após P7/E7:

Adições após prova P7		
86	kg	FeCr AC
52	kg	FeCr BC
63	kg	Mn eletrolítico
26	kg	Ni eletrolítico

Foram utilizadas também as medições de:

Oxigênio total: resultado da simulação 2.

Temperatura do aço: 1654 °C.

Temperatura da escória: 1654 °C.

Objetivando a comparação dos resultados foram construídos gráficos relacionando o valor medido na planta com o valor obtido via simulação, em cada prova, para cada elemento no aço e escória.

Foram analisados os seguintes elementos no aço e na escória:

- Carbono, Molibdênio, Cromo e Níquel;
- Si e SiO₂;
- Mn e MnO;
- FeO;
- Magnésio no aço, MgO e MgS na escória;
- Enxofre no aço líquido e na escória;
- Cálcio no aço líquido, CaO e CaS na escória;
- Alumínio total no aço e Al₂O₃ na escória;
- Oxigênio ativo medido x simulado.

As figuras 5.11 a 5.14 mostram a comparação dos valores medidos na planta x valores obtidos via simulação para os elementos carbono, molibdênio, cromo e níquel.

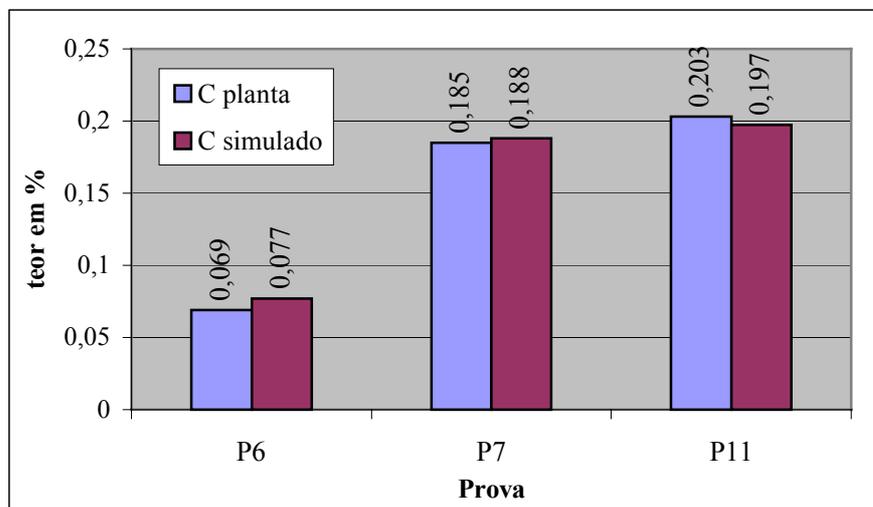


Figura 5.11 - Comparação entre a medição na planta e simulação para o carbono em %.

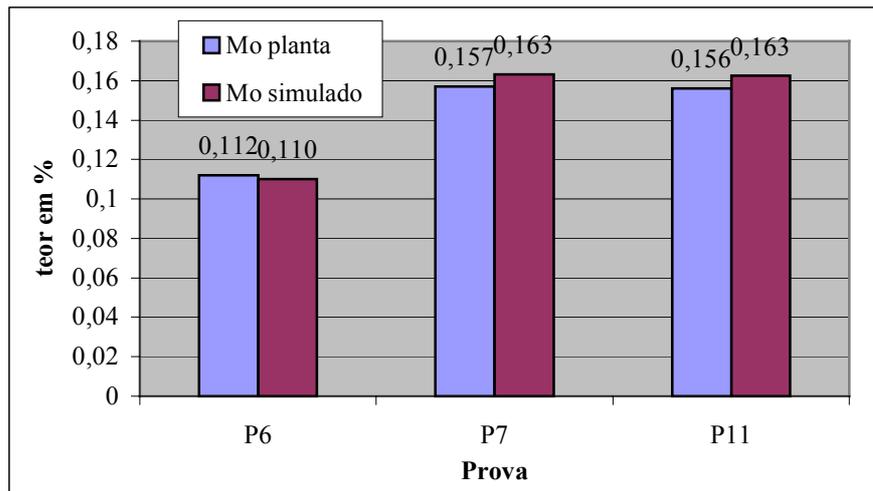


Figura 5.12 - Comparação entre a medição na planta e simulação para o Mo no aço em %.

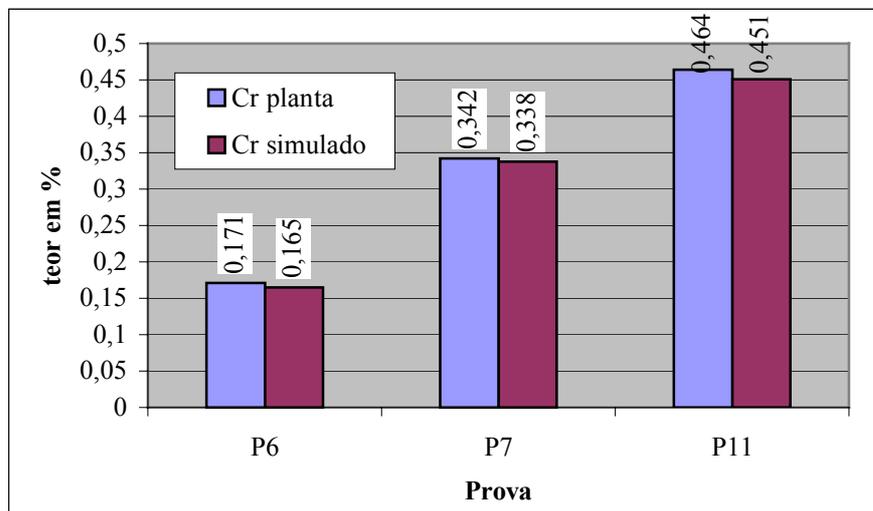


Figura 5.13 - Comparação entre a medição na planta e simulação para o cromo no aço em %.

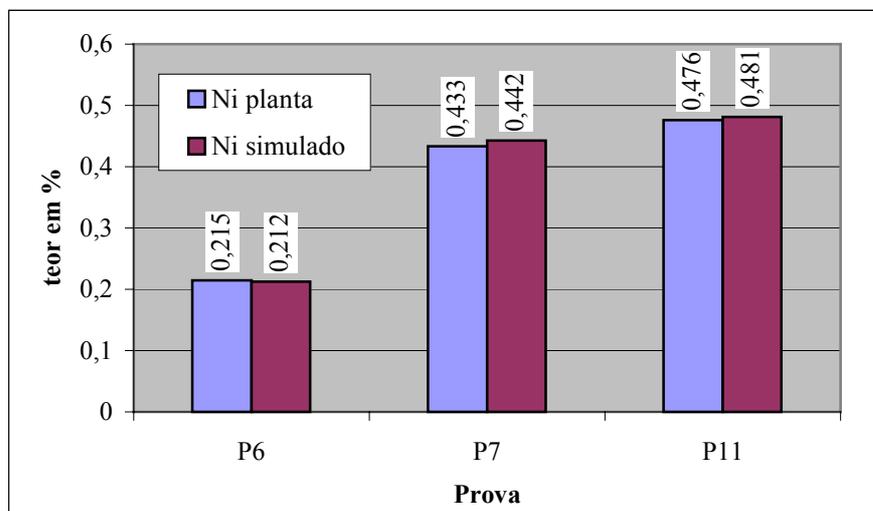


Figura 5.14 - Comparação entre a medição na planta e simulação para o níquel no aço em %.

Esses elementos são encontrados na forma elementar no aço e não são encontrados na escória, com exceção do cromo. A reação com o oxigênio pode levar a formação de CrO ou de Cr₂O₃. Contudo, para a produção do aço SAE 8620, o valor medido para o Cr₂O₃ está na faixa de 0,15 a 0,25%. Desta forma, a formação de óxidos de cromo para a qualidade SAE 8620 não é significativa.

Observa-se uma boa aproximação entre os valores medidos e os obtidos pela simulação para os elementos majoritários (C, Mo, Cr, Ni). Essa aproximação indica que, para os elementos majoritários, o sistema na prática atingiu o equilíbrio termodinâmico.

As figuras 5.15 e 5.16 mostram a comparação dos valores medidos na planta x valores obtidos via simulação para os elementos silício no aço líquido e SiO₂ na escória.

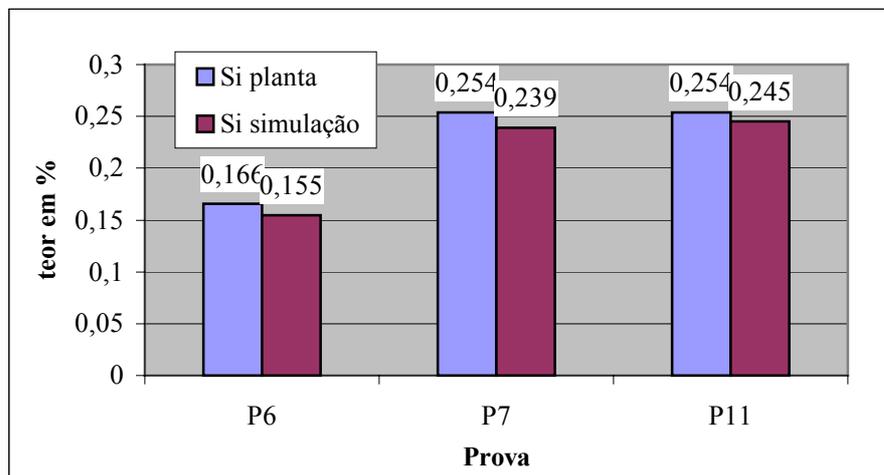


Figura 5.15 - Comparação entre a medição na planta e simulação para o silício no aço em %.

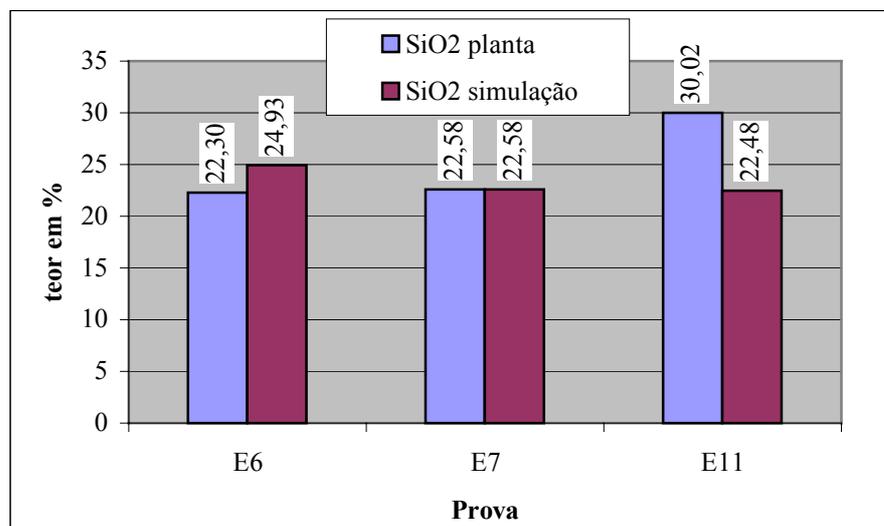


Figura 5.16 - Comparação entre a medição na planta e simulação para SiO₂ na escória em %.

Nas figuras 5.15 e 5.16 pode-se observar que na prova P6/E6 ocorreu uma maior oxidação do silício, pelo teor mais elevado de SiO₂ na escória. Para as demais provas, observa-se uma boa aproximação entre os valores medidos e os obtidos via simulação. Na prova P11, o teor mais elevado de SiO₂ pode ser explicado pois nesta etapa é realizada a adição de casca de arroz calcinada (SiO₂) para isolamento térmico.

As figuras 5.17 e 5.18 mostram a comparação dos valores medidos na planta x valores obtidos via simulação para os elementos manganês no aço líquido e MnO na escória.

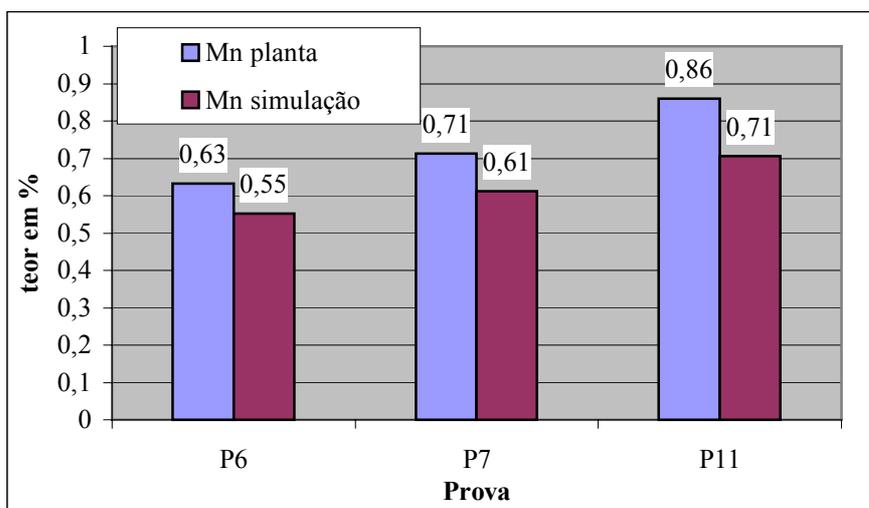


Figura 5.17 - Comparação entre a medição na planta e simulação para o Mn no aço em %.

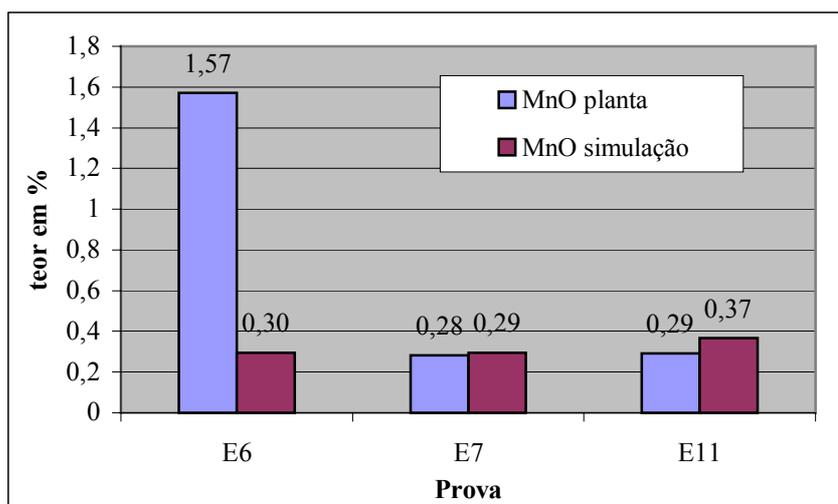


Figura 5.18 - Comparação entre a medição na planta e simulação para MnO na escória em %.

Para o manganês no aço líquido, a diferença entre a medida na planta e o simulado está na faixa de 0,08 a 0,1%. Não há explicação aparente para a diferença entre o teor de MnO

medido na planta e o teor de MnO obtido via simulação, podendo ser um erro na amostragem ou na análise.

Na figura 5.19 pode-se analisar os teores de FeO medidos x simulados. Para o padrão de operação da Gerdau Aços Finos Piratini, o FeO provém principalmente da passagem de escória do forno elétrico para a panela, durante a operação de vazamento. O controle do teor de FeO é importante pois ele é considerado um óxido instável, ou seja, do ponto de vista de processo, quanto mais FeO na escória, maior a quantidade de inclusões no banho. Do ponto de vista termodinâmico, a instabilidade indica que a energia livre de formação é uma das mais altas entre os óxidos. O FeO possui a facilidade de ser reduzido, liberando oxigênio para o banho.

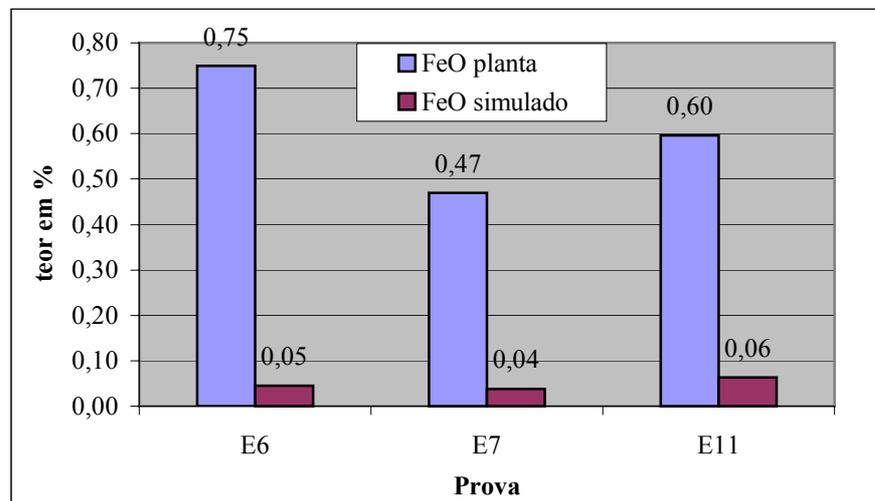


Figura 5.19 - Comparação entre a medição na planta e simulação para FeO na escória em %.

O resultado das simulações ao longo das provas mostra que o FeO é completamente reduzido, diferente do que ocorre na prática. É importante salientar que, na prática, a escória pode ficar exposta à atmosfera, reoxidando o banho. A reoxidação do aço pela atmosfera não é considerada no modelo termodinâmico.

A figura 5.20 mostra somente os valores obtidos via simulação para o magnésio no aço, uma vez que não foi possível fazer a análise química de magnésio para este trabalho.

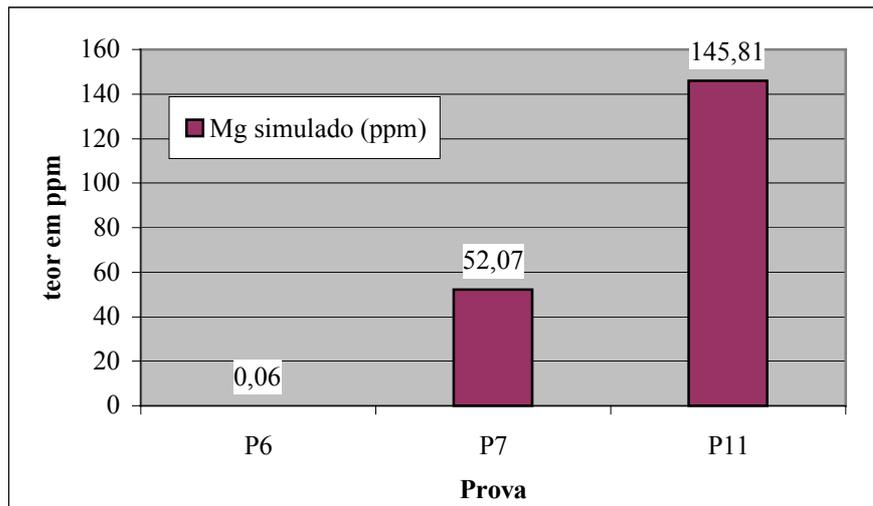


Figura 5.20 - Simulação para o magnésio no aço em ppm.

A análise do gráfico da figura 5.20 mostra que o magnésio dissolvido no aço aumenta durante a operação de refino no forno-panela. Embora não se tenha a análise de magnésio das amostras de aço, observa-se o aumento da quantidade de magnésio (na forma de MgO) nas inclusões analisadas.

O aumento do teor de magnésio no banho é proveniente da redução do MgO (figura 5.21) e do MgS (figura 5.22) da escória, uma vez que para o modelo em estudo não é considerado o desgaste dos refratários da panela.

A figura 5.21 mostra a comparação dos valores medidos na planta x valores obtidos via simulação para o MgO na escória.

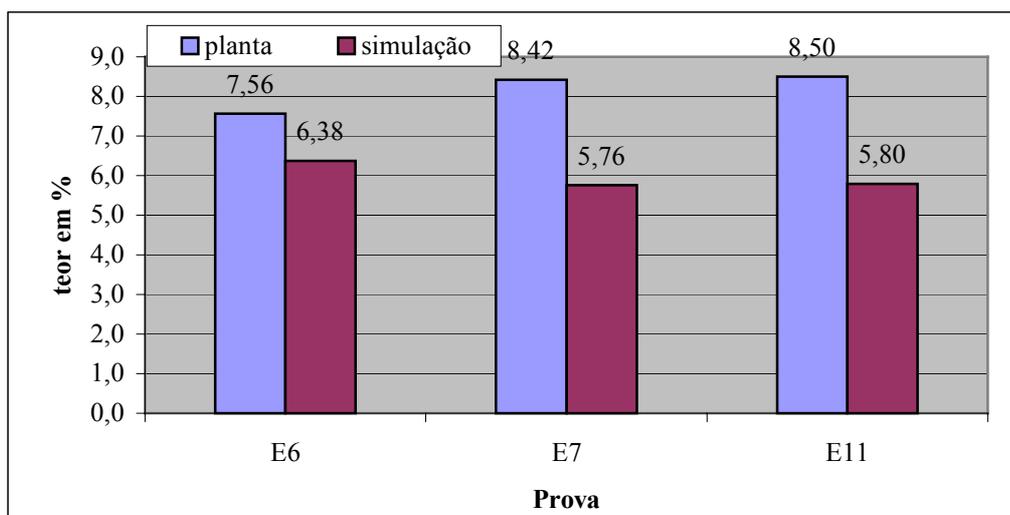


Figura 5.21 - Comparação entre a medição na planta e simulação para o MgO em %.

Com relação a figura 5.21, o fato de não se considerar o desgaste do refratário da panela pode ser a causa da diferença entre os teores de MgO medidos e calculados via simulação.

A figura 5.22 mostra a variação dos teores de MgS na escória ao longo das provas de acordo com a simulação. A análise química realizada na planta considera o enxofre total na escória, e não os compostos formados por ele.

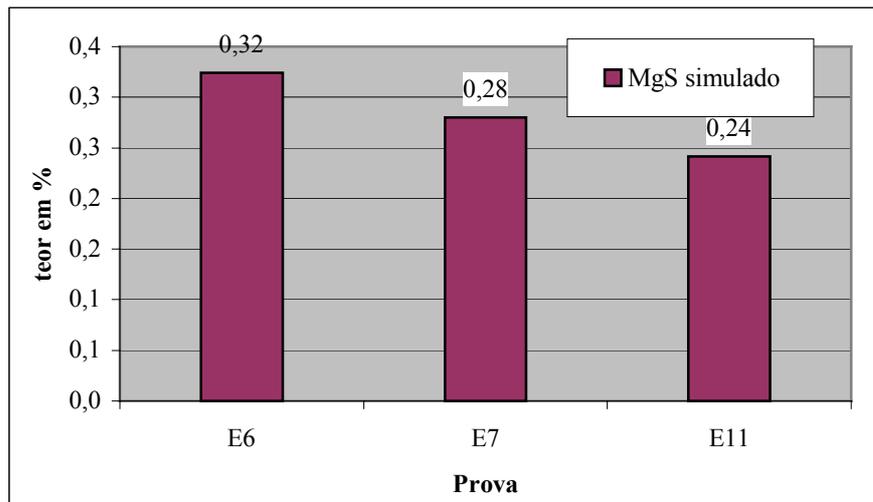


Figura 5.22 - Simulação para o MgS na escória em %.

As figuras 5.23 e 5.24 mostram a comparação dos valores medidos na planta x valores obtidos via simulação para os elementos enxofre no aço líquido e enxofre total na escória.

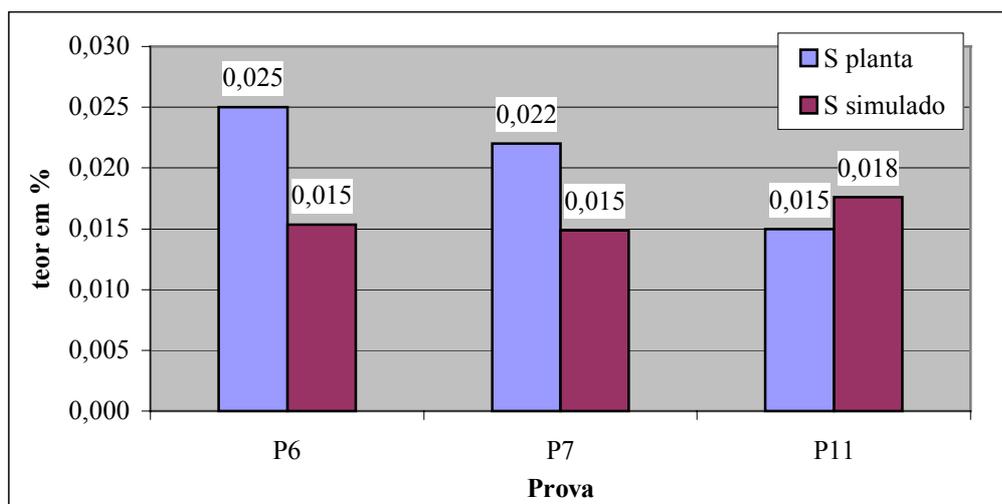


Figura 5.23 - Comparação entre a medição na planta e simulação para o enxofre no aço em %.

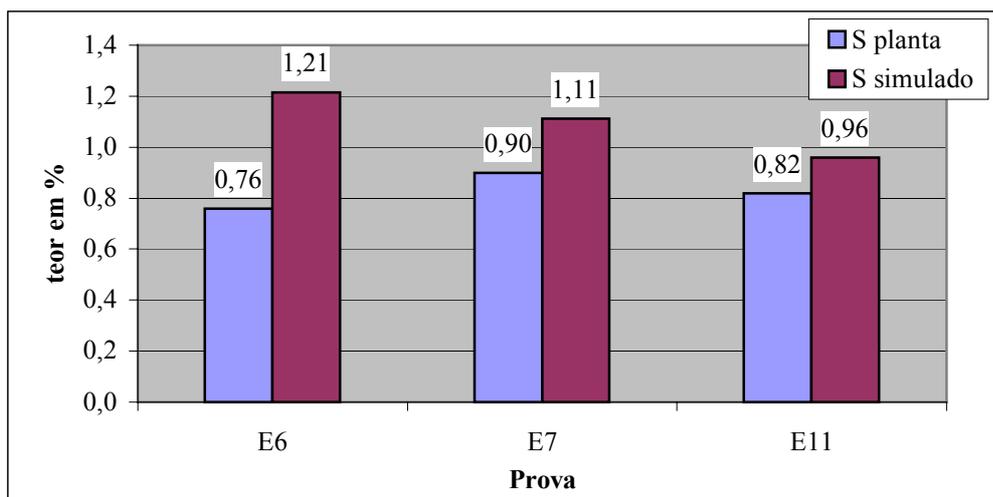


Figura 5.24 - Comparação entre a medição na planta e simulação para o enxofre total na escória em %.

Pode-se observar nos gráficos das figuras 5.23 e 5.24 que nas provas P6/E6 e P7/E7 os teores de enxofre no aço na simulação são menores do que as medições da planta. Por sua vez, os teores de enxofre total na escória da simulação são maiores do que na planta. Essa correlação não se observa nas provas P11/E11, porém observa-se uma boa aproximação entre os teores medidos e simulados.

As figuras 5.25 e 5.26 mostram a comparação dos valores medidos na planta x valores obtidos via simulação para os elementos cálcio no aço líquido e CaO na escória.

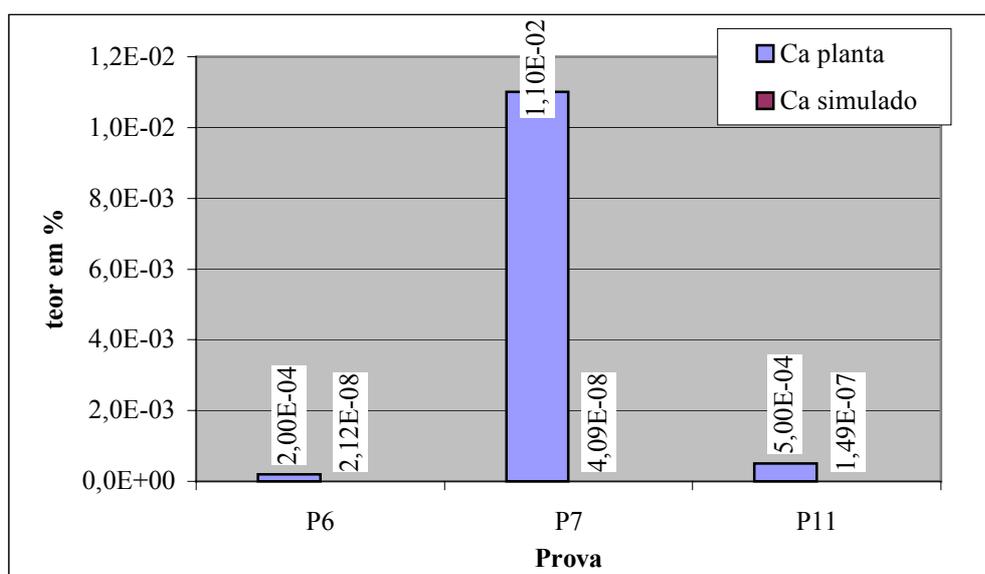


Figura 5.25 - Comparação entre a medição na planta e simulação para o cálcio no aço em %.

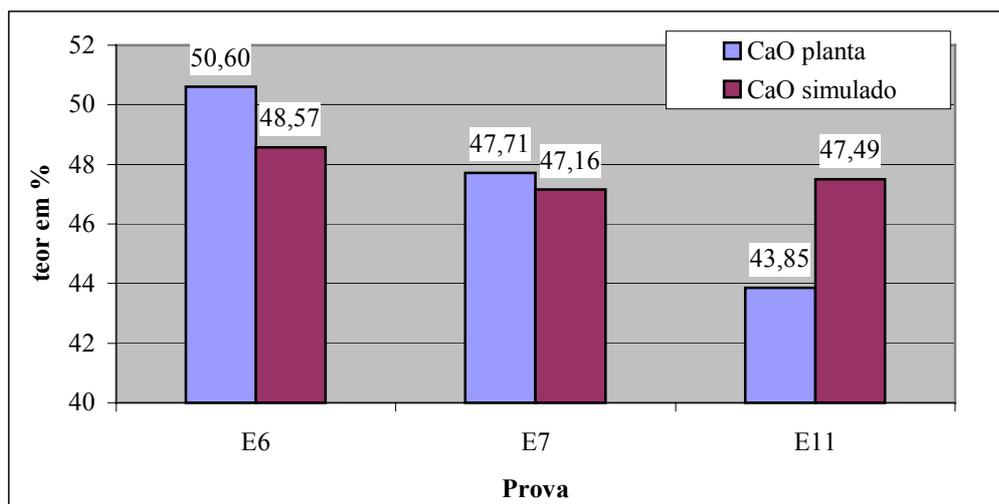


Figura 5.26 - Comparação entre a medição na planta e simulação para o CaO em %.

De acordo com o gráfico da figura 5.25, o teor de cálcio no aço líquido é menor na simulação do que na planta industrial. Esse fato ocorre, pois na simulação existe maior formação de sulfeto de cálcio do que na prática, ou seja, a dessulfuração é mais efetiva. Embora não se possa comparar diretamente a quantidade de sulfeto de cálcio obtida via simulação com a prática (pois na prática não se avalia a quantidade de CaS, mas sim o enxofre total), pode-se avaliar o enxofre dissolvido no aço.

Ainda avaliando o gráfico da figura 5.25, verifica-se um elevado teor de cálcio na P7. Neste caso, é recomendável a repetição da análise, pois o resultado é discrepante levando em conta o padrão do processo.

Para o CaO na escória (figura 5.26), observa-se uma boa aproximação entre os valores medidos e simulados (provas P6 e P7). Para a prova P11, observa-se a influência da adição de casca de arroz, que resultou no aumento do teor de SiO₂ e, conseqüentemente, modificando a proporção dos teores dos demais elementos da escória.

A figura 5.27 mostra a % de CaS na escória ao longo das provas, obtida via simulação.

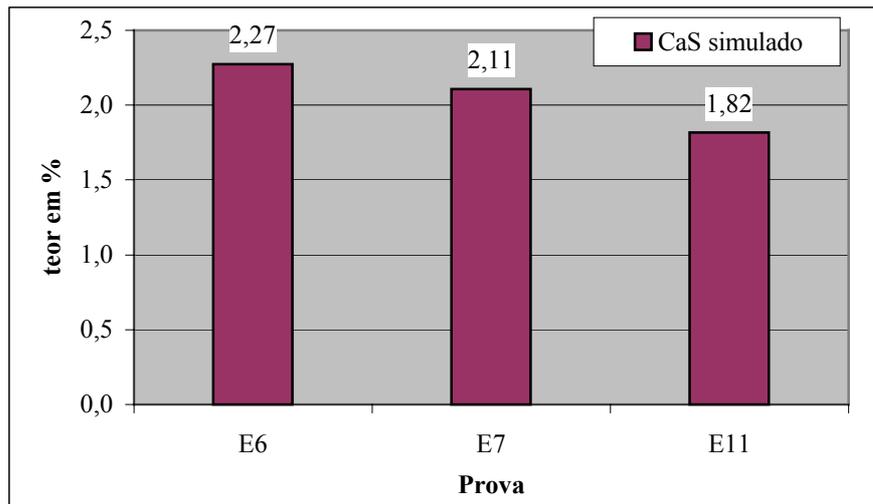


Figura 5.27 - Simulação para o CaS na escória em %.

Observa-se que a porcentagem de CaS obtida via simulação decresce ao longo das provas, conseqüentemente ocorre a incorporação de enxofre no banho metálico, o que pode ser comprovado no gráfico da figura 5.23.

As figuras 5.28 e 5.29 mostram a comparação dos valores medidos na planta x valores obtidos via simulação para os elementos alumínio no aço líquido e Al_2O_3 na escória.

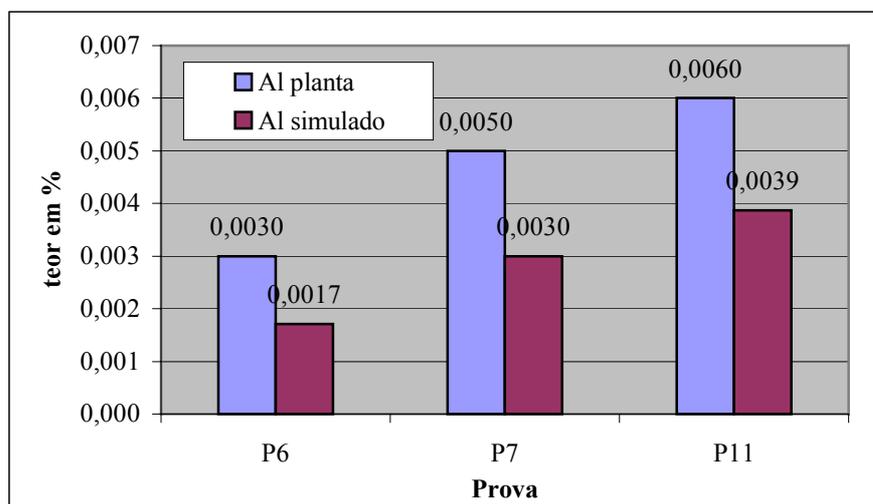


Figura 5.28 - Comparação entre a medição na planta e simulação para o Al no aço em %.

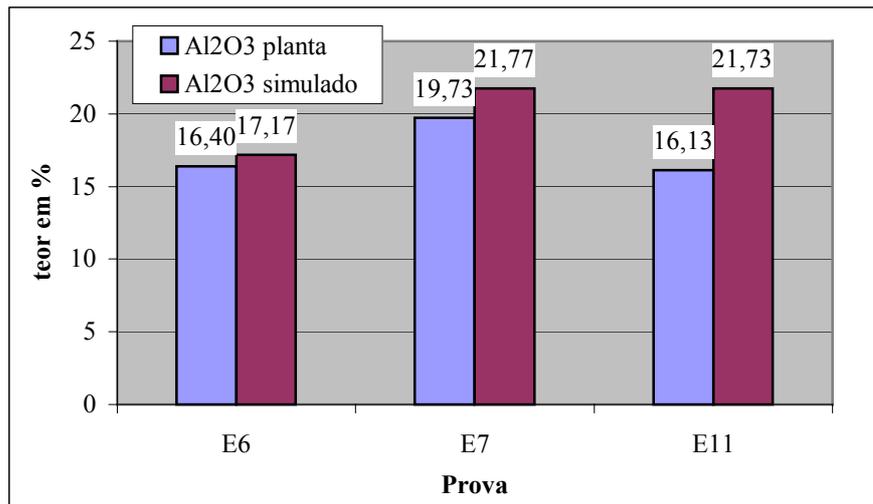


Figura 5.29 - Comparação entre a medição na planta e simulação para Al₂O₃ em %.

O gráfico da figura 5.28 mostra a mesma tendência de aumento de alumínio no banho ao longo do processo, quando comparados os resultados da simulação x resultados da planta. Os resultados das simulações mostram ainda que o processo não atingiu o equilíbrio termodinâmico, pois o teor de alumínio dissolvido no banho pode ser menor, como observado no gráfico.

O gráfico da figura 5.29 confirma o que foi dito anteriormente: o teor de Al₂O₃ ao longo das provas é sempre maior na simulação do que na prática, pois se há menos alumínio no banho é porque ele incorporou-se à escória na forma de Al₂O₃.

A figura 5.30 mostra a comparação entre as medidas de oxigênio ativo na planta e o calculado pela simulação.

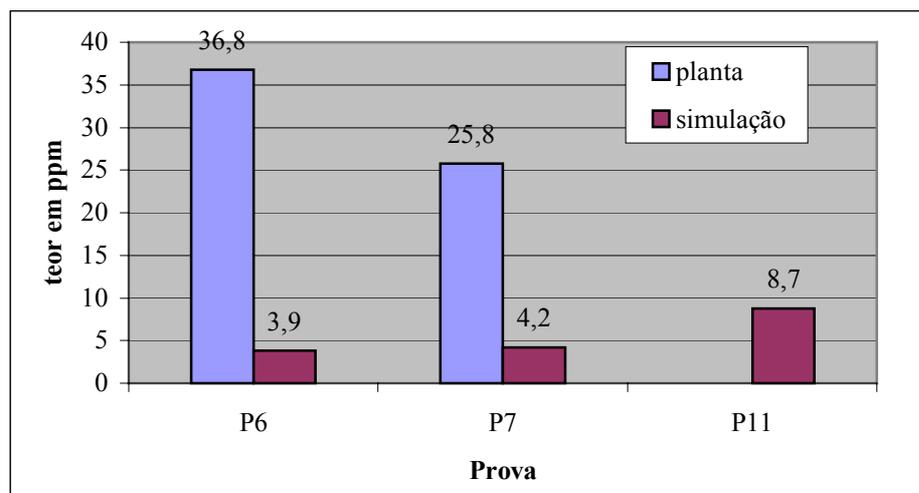


Figura 5.30 - Comparação entre a medição na planta e simulação para oxigênio ativo em ppm.

A medida de oxigênio ativo na prova P6 no gráfico corresponde, na verdade, a realizada na prova P5. Em virtude das medições das provas P5 e P6 terem sido realizadas com uma diferença de dez minutos, pode-se considerar a medida da prova P5. Na prova P11 não foi realizada a medição de oxigênio ativo, de acordo com o item 4.4.3 do trabalho.

Com relação aos dados obtidos via simulação, observa-se um aumento do teor de oxigênio ativo na P11, esse oxigênio vai reagir com o alumínio adicionado posteriormente. Comparando os gráficos das figuras 5.28 e 5.30, observa-se que o teor de oxigênio no equilíbrio deve-se preferencialmente pela oxidação do alumínio. Sendo a alumina um dos óxidos de menor energia livre de formação, os resultados obtidos pela simulação são coerentes.

Na prática industrial, a escória possui uma fração de sólidos que acaba por não reagir com o banho. Esse fato, somado às perdas térmicas da camada de escória e o desgaste do refratário, irão afetar o resultado final das análises.

Importante acrescentar que as reações entre aço e escória dependem da difusão dos elementos químicos até a interface entre o aço e a escória. A difusão, por sua vez, é governada pelo escoamento do aço líquido na panela. O escoamento também fará com que a panela apresente uma distribuição de temperatura em seu volume. O modelo termodinâmico não considera a influência desses fatores. Desta forma, é de se esperar certa discrepância para os elementos onde a influência da concentração é importante, como o oxigênio, alumínio e enxofre.

6. CONCLUSÕES

- O desvio-padrão das análises químicas de aço e escória é baixo para a maioria dos elementos, o que é de se esperar em um processo de produção estável. O mesmo não ocorre em elementos críticos com relação a formação de inclusões: cálcio, alumínio e enxofre. Isso indica que embora o processo de produção esteja estabilizado, o processo ainda precisa ser otimizado;
- O desenvolvimento de um programa de experiência foi fundamental na realização da amostragem, levando em conta as características particulares de produção de cada qualidade de aço;
- As inclusões das provas P5 e P6 (produtos de desoxidação do aço) estão afastadas da região da espessartita. Esse tipo de inclusão tem menor ponto de fusão e excelentes características de flotação;
- Observou-se uma grande dispersão na composição química das inclusões da P7, após a adição de ligas no forno-panela;
- As inclusões das provas P11, P12 e P13 caracterizam-se por possuir altos teores de alumina e MgO;
- O tamanho das inclusões analisadas está na faixa de 4 a 10 μ m;
- Observou-se uma queda gradativa na área ocupada pelas inclusões ao longo do processo;
- Entre as provas P12 e P13, antes e depois do período de flotação, observou-se que embora a quantidade de inclusões seja praticamente a mesma, a área ocupada caiu de 0,051% para 0,029%;
- As inclusões da prova final possuem um teor de MgO em torno de 10%, o que afasta as inclusões da região dos cálcio-aluminatos de baixo ponto de fusão;

- A estimativa de massa de escória na panela está bem consolidada;
- A simulação indica que os elementos: carbono, cromo, níquel e molibdênio, estão em equilíbrio termodinâmico no banho pois os resultados de simulação possuem boa aproximação com a prática;
- Com relação aos elementos silício e manganês, seus teores são menores na simulação em relação aos resultados medidos na planta. Isso é esperado pois parte do silício e manganês está na forma de inclusões no banho;
- Para os elementos cálcio, alumínio, enxofre e FeO, os valores obtidos via simulação são discrepantes em relação à prática. Isso indica que as reações químicas as quais esses elementos participam não atingiram o equilíbrio.

7. CONTINUAÇÃO DO TRABALHO

Com base neste trabalho alguns estudos podem ser realizados para fins de complementação, tais como:

- Para uma melhor interpretação dos resultados do levantamento estatístico, realizar uma estratificação dos dados, devido às modificações operacionais realizadas durante o último ano na produção do SAE 8620. Essas modificações podem ser outro fator responsável pela flutuação dos teores dos elementos alumínio, cálcio, enxofre, FeO e MnO;
- Fazer um estudo para otimizar a técnica de contagem de inclusões, com base na literatura e nas normas usuais para caracterização de inclusões em aços;
- É necessário avaliar o rendimento (com relação à dissolução) das ligas adicionadas, tanto no aço como na escória;
- Realizar um estudo mais aprofundado das reações que ocorrem durante a etapa de refino secundário, através da utilização da ferramenta de simulação termodinâmica;
- Obter a melhor composição de escória que tenha máxima absorção de inclusões e que mantenha o enxofre nos teores desejados;
- Realizar experimentos em escala de laboratório para estudar o equilíbrio aço/escória/inclusões;
- Realizar o acoplamento entre o modelo termodinâmico com o modelo de escoamento do aço líquido na panela. Entender a influência do escoamento do aço na panela é fundamental para obter a melhor aproximação entre a prática e os resultados da simulação.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Beskow, K. et al; **Chemical characteristics of inclusions formed at various stages during the ladle treatment of steel.** Ironmaking and Steelmaking, vol. 29, nº 6, p. 427-435, 2002.

Bielefeldt W. V.; Ortega, L. **Perfil de microinclusões durante o processo de refino do aço SAE 1040 na aciaria.** Unisinos - Mostra de Iniciação Científica, 2002.

Bielefeldt W. V. **Modelamento termodinâmico da etapa de dessulfuração do aço SAE 1040 Modificado.** Unisinos - Mostra de Iniciação Científica, pp. 56 - 57, 2003.

Bielefeldt W. V. **Relatório de Estágio Supervisionado.** Departamento de Engenharia Metalúrgica - UFRGS, 37 p., 2003.

C. W. Bale; P. Chartrand; S. A. Degterov; G. Eriksson; K. Hack; R. Ben Mahfoud; J. Melançon; A. D. Pelton; S. Petersen. **FactSage Thermochemical Software and Databases.** Calphad, vol. 26, p. 189-228, 2002.

Carrenõ-Galindo V.; Morales R. D.; Romero J. A.; Chavez J. F.; Toledo M. V.. **Thermodynamic Analysis of Steel Deoxidisation Process During Tapping and Refining Operations.** Process metallurgy, p. 107-114, 2000.

Chiaverini V. **Aços e Ferros Fundidos.** Associação Brasileira de Metais, sexta edição, p. 283-288, 1988.

Choudhary, S. K. et al.; **Thermodynamic Model for Deoxidation and Inclusion Precipitation in Liquid Steel.** Tata Steel, p. 95-102, Jamshedpur - India, 2002.

Cicutti, C.; Madias, J.; Gonzalez, J. **Control of microinclusions in calcium treated aluminium killed steels.** Ironmaking and Steelmaking, London, Vol. 24, nº 2, 1997, p. 155-159.

Cramb, A. W.; **High Purity, Low residual and Clean Steels.** Continuous casting of Steel Billets, Blooms and Slabs, p. 1-43, 1997.

FactSage Power Point Presentations, 2002.

Faulring, G. M.; **Inclusions modifications in semi-killed steels**. Ironmaking and Steelmaking, p. 29-36, julho de 1999.

Finardi, J.; **Inclusões em aços: seu efeito e seu controle**.

Hollapa, L. E. K. et al; **Inclusion Control in High-Performance Steels**. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 53, p. 177-186, 1995.

<http://www.crct.polymtl.ca/fact/index.php>

<http://www.electro-nite.be/Products/IronAndSteel.html>

<http://www.gtt-technologies.de/>

<http://www.npl.co.uk/npl/cmmt/mtdata/sgte.html>

Kiesling, R. et al; **Non Metallic Inclusions in Steels Parts I-IV**. The Institute of Materials, 1978.

Lachmund H.; X. Yongkun; Harste K. **Thermodynamic and kinetic aspects of the desulphurisation reaction in secondary metallurgy**. Steel Research 72, no 11, p. 452-459, 2001.

Leal, P. R.; “**Caracterização e controle de macro-inclusões em tarugos de lingotamento contínuo**”, Porto Alegre, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica da UFRGS.

L. E. K. Hollapa et al. **Thermodynamic examination on inclusion modification and precipitation from calcium treatment to solidified steel**. 6^o Clean Steel, p. 116-125, 2002.

Madias, J. **Palestra sobre Inclusões em Aços Acalmados com Alumínio e Tratados com Cálcio**, IAS, 1998, p. 22-56.

Moraes C. A. M.; Bordin F.; Zettermann L. F.; W. V. Bielefeldt; Vilela A. C. F. **Análise termodinâmica das interfaces metal-escória e metal-inclusões na produção do aço – utilização de modelo termodinâmico computacional e sua combinação com modelos de escoamento.** 57º Congresso Anual da ABM - Internacional, São Paulo, pp. 348-358, julho de 2002.

Oertel L. C.; Silva A. C. **Application of Thermodynamic Modeling to Slag-Metal Equilibria in Steelmaking.** Calphad, vol. 23, p. 379-391, 1999.

Oertel L. C.; Silva A. C. **Aplicações do modelamento termodinâmico para a previsão do equilíbrio metal-escória em aciaria. XXVIII Seminário sobre Fusão, Refino e Solidificação das Aços,** p. 439 - 455, 12 a 14/05 de 1997.

Ribeiro L. S. **Desenvolvimento de um aço médio carbono com inclusões controladas para melhoria de usinabilidade.** Trabalho de Diplomação - Departamento de Engenharia de Materiais - UFRGS, 72 p., 2002.

Silva, A. L. V. C.; **Refino dos Aços – Avanços e Perspectivas.** Simpósio Aços: Perspectivas para os próximos 10 anos, p. 55-62, Rio de Janeiro, 2002.

SLAG ATLAS, 2. Ed., VDEh, 1995.

S.V. Subramanian, X. Zhang. **Inclusion Engineering of Steels.** Report II, 2002.

Velásquez, V. H.; Ortega, L.; Bielefeldt, W.; Moraes, C. A. M.; Vilela, A. C. F; Belloc, R. S. **Caracterização de inclusões formadas durante o processo de fabricação de aço.** Sulmat - Congresso em Ciência dos Materiais do Mercosul, 2002.