



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG



Dissertação de Mestrado

"Avaliação da Limpeza do Aço Líquido Através da Modelagem Matemática do Desgaseificador – RH da Companhia Siderúrgica de Tubarão - CST"



Autor: Paulo Sérgio Bringhamti Lascosqui
Orientador: Prof. Carlos Antônio da Silva
Co-Orientador: Geraldo Alves Vargas Filho





REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG

Paulo Sérgio Bringhenti Lascosqui

**Avaliação da Limpeza do Aço Líquido Através da Modelagem Matemática do
Desgaseificador – RH da Companhia Siderúrgica de Tubarão – CST**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processo de Fabricação

Orientador: Prof. Carlos Antônio da Silva

Co-Orientador: Geraldo Alves Vargas Filho

Ouro Preto, novembro de 2006

L342a

Lascosqui, Paulo Sérgio Bringhenti.

Avaliação da limpidez do aço líquido através da modelagem matemática do desgaseificador – RH da Companhia Siderúrgica de Tubarão – CST [manuscrito]. / Paulo Sérgio Bringhenti Lascosqui. – 2006.

xii, 86f.: il. color.; grafs.; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antônio da Silva.

Co-orientador: Prof. Geraldo Alves Vargas Filho.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Rede Temática em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processo de Fabricação.

1. Aço - Metalografia - Teses. 2. Vácuo - Metalurgia - Teses. 3. Alumina - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. II.Título.

CDU: 620.163



**“Avaliação da Limpidez do Aço Líquido Através da
Modelagem Matemática do Desgaseificador – RH da
Companhia Siderúrgica de Tubarão-CST”**

Autor(a): Paulo Sérgio Bringhenti Lascosqui

Dissertação defendida e aprovada, em 14 de dezembro de 2006, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Carlos Antônio da Silva (PhD) - Orientador
REDEMAT / Univ. Federal de Ouro Preto / DEMET

Engº Geraldo Alves Vargas Filho (MSc.)
Cia. Siderúrgica de Tubarão / ARCELOR

Engº Joaquim Gonçalves Costa Neto (DSc)
BELGO / ARCELOR

Prof. Varadarajan Seshadri (Dr. Ing.)
Universidade Federal de Minas Gerais / DEMET

Prof. Itavahn Alves da Silva (DSc)
Universidade Federal de Ouro Preto / DEMET

Dedico esse trabalho aos meus pais e minha esposa Flávia pelo carinho e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Carlos Antônio da Silva pela orientação, dedicação e paciência durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao engenheiro e amigo de trabalho Geraldo Alves Vargas Filho pela co-orientação no desenvolvimento do trabalho.

A CST-ARCELOR BRASIL pela oportunidade de aperfeiçoamento técnico, profissional e pessoal, bem como pelos recursos financeiros que viabilizaram a elaboração deste trabalho.

Ao engenheiro Dimas Bahiense Moreira por ter possibilitado a realização desta conquista.

Aos engenheiros Marcelo Kruger e Eduardo Hoff pela dedicação e comprometimento durante a execução do trabalho.

A minha esposa e família pelo apoio e paciência durante o desenvolvimento deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
RESUMO	XI
ABSTRACT	XII
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1. INCLUSÕES NÃO METÁLICAS	3
3.2. ORIGEM DAS INCLUSÕES	4
3.2.1. <i>Inclusões encontradas no tratamento da panela</i>	7
3.2.2. <i>Reação de desoxidação</i>	8
3.2.3. <i>Reação entre refratário e a escória da panela (vitrificada)</i>	11
3.2.4. <i>Reação entre a escória de topo e o refratário da panela</i>	11
3.2.4.1. <i>Considerações termodinâmicas</i>	11
3.2.5. <i>Influência do aquecimento químico na formação das inclusões</i>	12
3.3. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA LIMPIDEZ DO AÇO	12
3.3.1. <i>Métodos diretos de avaliação</i>	13
3.3.2. <i>Métodos indiretos de avaliação</i>	15
3.3.2.1. <i>Medição do oxigênio total (T.O.)</i>	15
3.3.2.2. <i>Pick-up de Nitrogênio</i>	17
3.3.2.3. <i>Análise da composição química da escória</i>	17
3.4. PRINCIPAIS MECANISMOS DE REMOÇÃO DE INCLUSÕES NO DESGASEIFICADOR RH	18
3.4.1. <i>Flotação das Inclusões</i>	18
3.4.2. <i>Anexação das Inclusões as bolhas de gás inerte</i>	20
3.4.3. <i>Coalescimento das Inclusões</i>	22
3.5. MODELOS MATEMÁTICOS PARA REMOÇÃO DE INCLUSÕES NO RH	22
3.5.1. <i>Evolução da distribuição do tamanho das inclusões</i>	23
3.5.1.1. <i>Modelo de colisão das inclusões (Coalescimento)</i>	24
3.5.2. <i>Flotação de STOKES</i>	25
3.5.3. <i>Efeito das bolhas de argônio</i>	26
3.5.4. <i>Raio e densidade do cluster</i>	28
3.5.5. <i>Trajatória das inclusões</i>	30
3.5.6. <i>Mecanismo de remoção das inclusões</i>	31
3.5.7. <i>Efeito da taxa de dissipação turbulenta</i>	31

3.5.8. <i>Influência do tempo de homogeneização</i>	33
4. METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS	37
4.1 <i>Teores de oxigênio obtidos Através de Amostragem e Análise de Imagens</i>	38
4.1.1. <i>Planejamento dos Testes para amostragem</i>	39
4.2. ANÁLISE DO OXIGÊNIO TOTAL	40
4.3. ANÁLISE OPTICA DAS IMAGENS	42
4.3.1. <i>Procedimentos para classificação das inclusões</i>	43
4.3.2. <i>Características Geométricas Estimadas para as Inclusões</i>	45
4.3.3. <i>Classificação das inclusões</i>	48
4.4 DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO NUMÉRICO - CFX	54
4.4.1. <i>Equações Governantes do Escoamento</i>	55
4.4.2. <i>Condições de Contorno</i>	56
4.5. DETERMINAÇÃO DA TAXA DE DISSIPACÃO DE ENERGIA	59
4.5.1. <i>Valores de taxa de dissipação de energia</i>	59
4.6. MODELO MACROSCÓPICO PARA CHOQUE, COALESCIMENTO E FLOTAÇÃO DE INCLUSÕES NA PANELA DO DESGASEIFICADOR.	65
4.6.1. <i>Estimativa do Número de Inclusões</i>	65
4.6.2. <i>Termos do Balanço de População</i>	66
4.6.3. <i>Separação das Inclusões</i>	69
4.6.4. <i>Distribuição Inicial de Inclusões</i>	73
4.6.5. <i>Implementação do Modelo</i>	74
5. SIMULAÇÕES COM O MODELO E DISCUSSÃO FINAL	78
6. CONCLUSÕES	82
7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	84
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1 – Mecanismos da evolução das inclusões no aço líquido ⁽⁴⁾	5
Figura 3. 2 – Distribuição das inclusões de Al ₂ O ₃ na panela e distribuidor ⁽³⁾	7
Figura 3. 3 – Morfologias da inclusão de alumina: a) cluster dendrítico, b) estrutura coral ⁽⁴⁾	9
Figura 3.4 - Equilíbrio entre o alumínio e o oxigênio no aço (1873 K) ⁽³⁾	15
Figura 3. 5 – Relação entre o O _{total} no distribuidor e índice de defeitos no produto ⁽³⁾	16
Figura 3. 6 – Relação entre pick-up de nitrogênio, oxigênio total e qualidade do aço ⁽³⁾	17
Figura 3. 7 – O _{total} no fim do refino secundário x tempo de espera ⁽²⁰⁾	19
Figura 3. 8 – O _{total} x tempo de agitação do aço ⁽²⁰⁾	20
Figura 3. 9 – Probabilidades de colisão e coesão x diâmetro da bolha, para diferentes tamanhos de inclusões ⁽²⁰⁾	21
Figura 3. 10 – Linhas de fluxo calculadas em torno de uma bolha de argônio ⁽¹⁶⁾	27
Figura 3.11 – Raio da inclusão e densidade ⁽¹⁶⁾	29
Figura 3. 12 – Imagens de inclusões no Microscópio eletrônico, 1 minuto (a) e 15 minutos (b) após a adição de alumínio.	30
Figura 3.13 – Teor de oxigênio calculado das inclusões de Al ₂ O ₃ no desgaseificador RH ⁽¹⁶⁾	31
Figura 3.14 – Comparação do teor total de Al ₂ O ₃ calculado e observado ⁽¹⁶⁾	32
Figura 3.15 – Distribuição do tamanho das inclusões em diferentes taxas de dissipação turbulenta ⁽¹⁶⁾	32
Figura 3.16 – Teor de O _{total} em aços LCSAK, MCAK e LCAK, DEKKERS ⁽³⁴⁾	33
Figura 3.17 – Al total analisado, Oxigênio total e Oxigênio dissolvido calculado como função do tempo de homogeneização, SÖDER ⁽³⁵⁾	34
Figura 3.18 – Concentração de oxigênio e taxa de desoxidação em função do tempo de borbulhamento, AOKI ⁽³⁶⁾	35
Figura 3.19 – Comparação do Oxigênio total calculado e real, NAKANISHI ⁽⁴⁾	35
Figura 3.20 – Efeito do oxigênio de vazamento na diminuição do O _{total} durante a desgaseificação no RH, ZHANG ⁽³⁾	36
Figura 4. 1 – Desenho esquemático da coquilha utilizada na CST.	38
Figura 4. 2 – Amostrados TOS utilizado para amostragem e análise do O _{total}	40
Figura 4. 3 – Evolução do O _{total} em relação ao tempo de homogeneização no RH.	41
Figura 4.4 – Evolução do O _{total} em relação ao tempo de homogeneização do RH (Ajustada).	42

Figura 4. 5 – Padrões de classificação das inclusões segundo YAWATA.	43
Figura 4. 6 – Padrão de coleta das imagens em cada amostra.....	44
Figura 4. 7 – Exemplo de imagem adquirida nas amostras da CST.....	44
Figura 4. 8 – Exemplo de propriedades geométricas de um objeto.....	46
Figura 4. 9 – Exemplo de área de objeto.	46
Figura 4. 10 – Exemplo de perímetro de objeto.	47
Figura 4. 11 – Modelo de identificação de inclusões nodulares.	50
Figura 4. 12 – Resultados da análise de imagens (após 60 segundos), com o IMAGO®.....	51
Figura 4. 13 – Resultados da análise de imagens (após 180 segundos), com o IMAGO®.....	52
Figura 4. 14 – Resultados da análise de imagens (após 360 segundos) com o IMAGO®.....	52
Figura 4. 15 – Resultados da análise de imagens (após 480 segundos) com o IMAGO®.....	53
Figura 4. 16 – Resultados da análise de imagens (após 600 segundos) com o IMAGO®.....	53
Figura 4. 17 – Resultados O_{total} Análise de imagens x Medição da análise química (TOS).	53
Figura 4. 18 – Domínio de cálculo.....	54
Figura 4. 19 – Malha tetraédrica utilizada no CFX.	54
Figura 4.20 – Regiões com condição de contorno de parede.....	57
Figura 4. 21 – Região do topo do reator.....	57
Figura 4.22 – Região de entrada e saída do Aço.....	58
Figura 4. 23 – Taxa de dissipação de energia , corte vertical coincidente com plano médio das pernas (Caso 01 – tabela VII).....	60
Figura 4. 24 – Taxa de dissipação de energia – Corte vertical a 45 graus do plano médio das pernas (Caso 01 – tabela VII).....	60
Figura 4. 25 – Taxa de Dissipação de Energia – Corte Vertical a 90 graus do plano médio das Pernas (Caso 01 – Tabela VII).	61
Figura 4.26 – Evolução da taxa de circulação com a vazão de gás injetado, VARGAS ⁽³²⁾	63
Figura 4.27 – Taxa de dissipação de energia em cm^2/s^3 , de acordo com SZEKELY ⁽³³⁾	64
Figura 4. 28 – Esquemático de distribuição de tamanho de inclusões.	67
Figura 4. 29 – Campo de Velocidade na Panela de Aço.	69
Figura 4. 30 – Divisão esquemática da panela em reator de coalescimento e de flotação.....	71
Figura 4.31 – Oxigênio total em função do tempo de circulação, amostragem via TOS.....	74
Figura 4. 32 – Evolução do oxigênio total de acordo com o modelo proposto.	75
Figura 4. 33 – Evolução do Oxigênio Total para 06 condições iniciais distintas.....	76

Figura 5.1 – Comparação Modelo x Medições realizadas.	78
Figura 5.2 – Variação do O_{total} em função do tempo de homogeneização para diferentes condições, de acordo com dados da Tabela XII e modelo proposto.	79
Figura 5.3 - Efeito do Aumento do Diâmetro da Perna de Descida Sobre a Remoção de Inclusões.....	80

RESUMO

Para atender a crescente demanda por aços de elevada qualidade, em especial aos aços para aplicação na indústria automobilística, a CST - Companhia Siderúrgica de Tubarão adquiriu em 1998 sua primeira unidade de desgaseificação a vácuo RH.

Com o advento da expansão para 7,5 milhões de toneladas por ano, uma segunda unidade estará sendo adquirida, esta escolha foi feita baseando-se no foco de atendimento ao mercado de aços de alto valor agregado.

No processo RH ocorre a circulação do aço líquido entre a panela e a câmara de vácuo. Nesta câmara, também ocorrem as reações metalúrgicas de descarburização e desgaseificação (remoção do hidrogênio, oxigênio e em menor escala do nitrogênio). Neste processo se consegue atingir uma grande energia de misturamento como consequência da circulação do aço, fator que influi positivamente nas reações físicas de remoção das inclusões não metálicas na panela.

Como a adição de alumínio para aquecimento ou desoxidação do aço gera uma grande quantidade de inclusões (alumina), o tempo de circulação após a adição do desoxidante tem grande influência na limpidez do aço. Então diferentes condições de operação têm sido estudadas com o objetivo de se obter melhorias no desempenho e na produtividade. Modelos de simulação matemáticos e/ou físicos podem ser empregados para tal, bem como a amostragem do aço ao longo do processo, para caracterização em laboratório.

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo matemático tridimensional para a simulação da circulação do aço na panela, com a finalidade de avaliar o escoamento do aço, a trajetória das inclusões, bem como também foi desenvolvido um modelo macroscópico para determinar a influência do tempo de circulação (homogeneização), após a adição do alumínio, no grau de limpidez do aço. Para a validação deste modelo, foi empregada a técnica de contagem de inclusões em microscópio e medição do teor de oxigênio total.

ABSTRACT

In order to comply with an increasing market for high quality steels, specially steels for automobile applications, CST – Companhia Siderúrgica de Tubarão – has acquired in 1998 its RH degasification unit. As a production expansion up to 7.5 million tons of crude steel per year is scheduled, a 2nd RH unit has been commissioned.

The RH process is based upon the circulation of the liquid steel between the steel ladle and a vacuum chamber, where low-pressure-enhanced reactions such as decarburation and degasification occur. The reactor is also a place for inclusion removal.

Thus circulation through the vacuum camera has a great influence on the productivity of the equipment. Experiments have been conducted worldwide aiming to improve the steel quality and productivity under different operational conditions. Physical modeling, mathematical modeling, plant experiments, as well as physicochemical evaluations of industrial samples have been employed to evaluate the process.

In this work a three-dimensional mathematical model have been developed for simulation of the steel circulation the vacuum chamber and in the ladle. A macroscopic model also was developed, the purpose was to evaluate the influence of the circulation time on the degree of the steel cleanliness – the inclusion content. The model incorporates a collision-coalescence-removal scheme for the inclusions and its validation is provided by techniques of microscope inclusions counting and measurement of the dissolved/total oxygen content.

1. INTRODUÇÃO

Para atender aos crescentes requisitos de desempenho, a diversidade de produtos e ao aumento da competição com outros materiais, devido principalmente ao desenvolvimento de novos materiais não metálicos (cerâmicas, plásticos, polímeros, etc.), a indústria siderúrgica tem investido em progressos tecnológicos nas várias etapas que compõem a elaboração do aço.

Desta forma aços com alta limpidez, e processos com alta funcionalidade e baixo custo são os principais objetivos atuais para os aciaristas. Isto significa que um controle rígido da qualidade do aço passa a ser um dos fatores mais importantes para a produção do aço, o que inclui o controle da composição, tamanho, distribuição e evolução das inclusões.

Uma das maneiras mais eficazes de se minimizar o custo de produção é através do aumento da produtividade. As unidades de refino secundário têm impacto direto neste item, pois trouxeram uma grande evolução a indústria siderúrgica. Em particular as tecnologias de refino sob vácuo, que permitiram a produção de aços com maior grau de limpidez e com menor variação em relação às composições químicas objetivadas.

Dentre as tecnologias de refino sob vácuo, destaca-se o desgaseificador RH, por aliar fatores como versatilidade, produtividade e qualidade. Entre as principais aplicações do desgaseificador RH estão a produção de aços com restrição ao teor máximo de hidrogênio e de aços com ultra-baixos teores de carbono - UBC, na faixa de 30 ppm.

Atualmente encontra-se em plena evolução, principalmente para indústria automobilística, o desenvolvimento de aços de elevada exigência mecânica e de faixas de composição química restritas. Entre eles podem ser citados os aços BH (“Bake Hardening”) cuja característica principal é o fenômeno de envelhecimento controlado, ligado à presença de carbono em solução sólida no aço; aços Bifásicos (“Dual Phase”), que se caracterizam por conciliarem de maneira otimizada resistência e conformabilidade.

2. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são:

- Utilizar modelo matemático para simulação do escoamento do aço líquido em regime de fluxo turbulento na panela do desgaseificador a vácuo RH, da Companhia Siderúrgica de Tubarão – CST;
- Desenvolver modelo de remoção das inclusões, incluindo flotação e coalescimento;
- Validar os resultados do modelo através da distribuição do tamanho de inclusões e da medição do oxigênio total;
- Utilizar o modelo matemático validado, para simular os efeitos de diversos tempos de homogeneização na remoção de inclusões, avaliando e discutindo os resultados da simulação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. INCLUSÕES NÃO METÁLICAS

A inclusão é uma fase não metálica, geralmente sulfetos ou óxidos simples e complexos, podendo ser originada ao longo de todo o processamento do aço líquido. Sua influência nas propriedades mecânicas do aço será mais ou menos deletéria em função do tamanho, tipo e forma da inclusão, ver Tabela I.

Tabela I – Tipo e forma da inclusão no produto laminado ⁽¹⁾.

INCLUSÃO	FORMA NO PRODUTO LAMINADO
MnS	Alongada continuamente
SiO ₂	Alongada continuamente
Al ₂ O ₃	Inclusões dispersas não deformadas
CaS	Inclusões dispersas não deformadas
CaO. Al ₂ O ₃	Inclusões dispersas não deformadas

Todas as inclusões apresentadas na Tabela I são inclusões endógenas, ou seja, têm origem em reações que ocorrem no interior do banho durante o tratamento do aço.

Uma característica destas inclusões é que são microscópicas, em geral têm tamanho inferior a 100µm.

Quando as inclusões são provenientes de arraste de escória, pó fluxante ou de interação entre o metal e o refratário, são denominadas inclusões exógenas, pois são de fonte externa ao aço líquido. Geralmente as inclusões exógenas possuem um tamanho maior que as endógenas, podendo ser vistas a olho nu. Apresentam-se como defeitos internos quando o produto final tem espessura elevada, e superficiais quando a espessura final do produto é pequena. A Tabela II apresenta a composição química provável das inclusões exógenas.

Tabela II – Principais inclusões exógenas⁽¹⁾.

INCLUSÃO	CARACTERÍSTICA/COMPOSIÇÃO QUÍMICA
Interação Metal-Refratário	MnO.SiO ₂ .Al ₂ O ₃ , com alinhamento de Al ₂ O ₃ em sua proximidade.
Escória	Teores elevados de CaO, SiO ₂ , MnO, Al ₂ O ₃ , presença de MgO
Pó Fluxante	Teores elevados de CaO e SiO ₂ , presença de sódio e potássio.

Dentro do contexto atual de fabricação de aços com requisitos de qualidade cada vez mais rigorosos, o problema de inclusões não metálicas constitui um sério item a ser controlado, uma vez que as inclusões podem causar esfoliações e trincas, que vão influir tanto na qualidade superficial dos aços destinados a chapas e folhas finas, quanto nas propriedades mecânicas do produto.

Existe um grande número de fatores que podem influenciar na geração de óxidos nos aços durante o processamento na aciaria. Embora seja difícil a determinação clara da participação de cada um, pode-se classificar estes fatores em termodinâmicos (composição da escória e reoxidação), cinéticos (taxa de dissipação de energia para misturamento) e mecânicos (arraste de escória e pó fluxante).

Devido à característica do desgaseificador RH, este trabalho tem como foco os aspectos cinéticos, em particular à avaliação da influência da alumina sobre a limpidez do aço.

3.2. ORIGEM DAS INCLUSÕES

É bem conhecido que inclusões não metálicas podem gerar muitos defeitos, degradando significativamente as propriedades mecânicas do aço, além de influenciarem negativamente no processo de produção, podendo causar desde obstrução até rompimento de pele no lingotamento contínuo^(2, 3, 4, 5).

As inclusões podem ter diversas origens como por exemplo, desoxidação, reoxidação, reação aço-escória, aquecimento químico e reações escória-refratário.

O processo de evolução das inclusões pode ser visualizado na Figura 3.1.

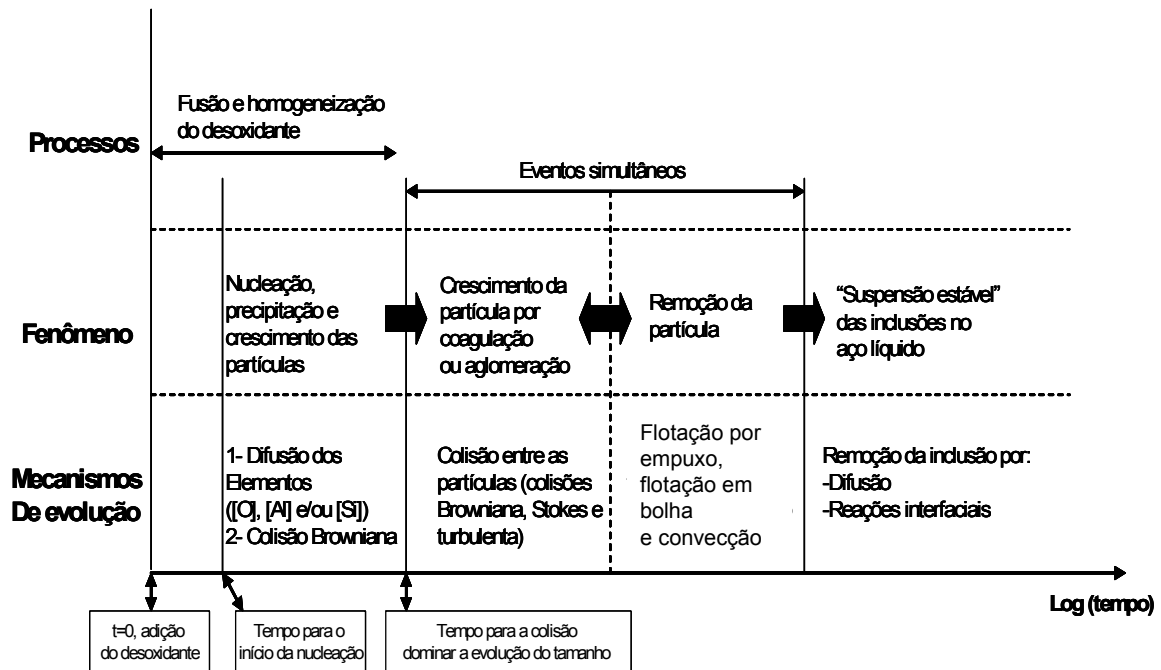


Figura 3.1 – Mecanismos da evolução das inclusões no aço líquido ⁽⁴⁾.

A demanda por aços com maior limpidez tem aumentado ano a ano. Além das exigências de diminuição da quantidade de inclusões não metálicas e controle da sua distribuição de tamanho, morfologia e composição, são requeridos também controle do enxofre, fósforo, hidrogênio, nitrogênio e carbono. Estas exigências variam com o tipo de aço e uso, como pode ser visualizado na Tabela III.

Tabela III – Requisitos de limpidez típicos para diferentes tipos de aço⁽³⁾.

Produto	Fração máxima de impurezas	Tamanho máximo da inclusão
Aço IF	[C] ≤ 30ppm, [N] ≤ 40ppm, T.O. ≤ 40ppm ⁽⁶⁾ [C] ≤ 10ppm ⁽⁷⁾ , [N] ≤ 50ppm ⁽⁸⁾	
Automotivo e Chapa estampagem profunda	[C] ≤ 30ppm, [N] ≤ 30ppm ⁽¹⁰⁾	100µm ^(9,10)
Latas D&I	[C] ≤ 30ppm, [N] ≤ 30ppm, T.O. ≤ 20ppm ⁽¹⁰⁾	20µm ⁽¹⁰⁾
Aços ligados para vasos de pressão	[P] ≤ 70ppm ⁽¹¹⁾	
Barras de aço ligado	[H] ≤ 2ppm, [N] ≤ 10-20ppm, T.O. ≤ 10ppm ⁽¹²⁾	
Aço HIC (resistente à trinca induzida por hidrogênio)	[P] ≤ 50ppm, [S] ≤ 10ppm ^(11,13)	
Aços para tubos	[S] ≤ 30ppm ⁽¹¹⁾ , [N] ≤ 35ppm, T.O. ≤ 30ppm ⁽¹²⁾ , [N] ≤ 35ppm ⁽⁸⁾	100µm ⁽¹⁰⁾
Aço para recozimento contínuo	[N] ≤ 20ppm ⁽¹¹⁾	
Chapa para soldagem	[H] ≤ 1,5ppm ⁽¹¹⁾	
Esferas para rolamentos	T.O. ≤ 10ppm ^(11,14)	15µm ^(12,14)
Aços para pneus (tire cord)	[H] ≤ 2ppm, [N] ≤ 40ppm, T.O. ≤ 15ppm ⁽¹²⁾	10µm ⁽¹²⁾ 20µm ⁽⁹⁾
Magnético GNO	[N] ≤ 30ppm ⁽⁸⁾	
Chapa grossa	[H] ≤ 2ppm, [N] ≤ 30-40ppm, T.O. ≤ 20ppm ⁽¹²⁾	Inclusão 13µm ⁽¹⁰⁾ Cluster 200µm ⁽¹⁰⁾
Arame (fio)	[N] ≤ 60ppm, T.O. ≤ 30ppm ⁽¹²⁾	20µm

A limpidez do aço depende não só da quantidade, composição e morfologia das inclusões, mas também da distribuição do tamanho. A distribuição do tamanho das inclusões é particularmente importante, pois grandes inclusões são muito mais danosas às propriedades mecânicas do aço do que pequenas inclusões.

Defeitos catastróficos podem ser causados por apenas uma única inclusão grande.

Devido a isso, o conceito de aço limpo (clean steel), envolve não somente o controle do percentual das inclusões, mas também, evitar inclusões maiores que um tamanho crítico, o qual cause dano ao produto⁽³⁾.

A importância da distribuição do tamanho das inclusões pode ser visualizada na Figura 3.2, a qual mostra a diminuição do teor de inclusões maiores que 30 μm medidas na panela e no distribuidor⁽³⁾.

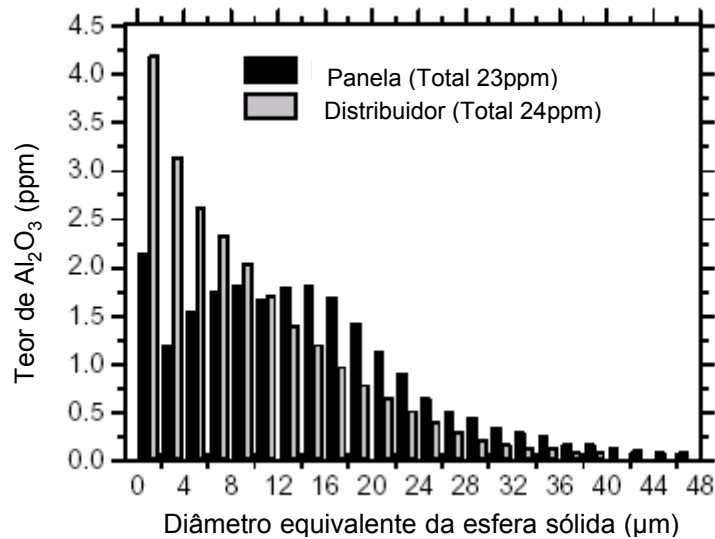


Figura 3. 2 – Distribuição das inclusões de Al_2O_3 na panela e distribuidor⁽³⁾.

3.2.1. INCLUSÕES ENCONTRADAS NO TRATAMENTO DA PANELA

Uma vez que o tratamento na panela é o passo imediatamente anterior ao lingotamento, a formação de inclusões não metálicas durante o refino secundário têm impacto direto na qualidade final do produto.

Por exemplo, SICHEN et al.⁽²⁾ detectaram 8 tipos de inclusões no processo de tratamento na panela, inclusões essas provenientes de reações químicas e da reação escória-refratário.

A Tabela IV lista os tipos de inclusão ao longo das fases do processo, de acordo com os autores⁽²⁾.

Tabela IV – Principais tipos de inclusões encontradas ⁽²⁾.

Tipo	Especificação	Geração	Vida Panela	Estágio				
				Chegada panela	Início da adição de Al	Fim Adição Al	Antes vácuo	Após vácuo
1	- MgO puro	- Pó do novo revestimento	1	X	X			
2	- Formato esférico - Líquida	- Escória da panela	Velha	X	X			
3	- MgO.Al ₂ O ₃	- Forno - Escória da panela	Qualquer	X	X	X	X	
4	- Duas fases - Combina 2 e 3	- Escória da panela	Qualquer	X	X			
5	- Al ₂ O ₃ pura	-Desoxid. Al	(Qualquer)		X			
6	- Duas fases - Espinélio + óxido sólido	- MgO.Al ₂ O ₃ reação metal	Qualquer			X	X	X
7	- Solução óxida	- Tipo 6, reação post. - (escória da panela?)	Qualquer					X
8	- Duas fases - MgO + sol. Oxida	- Escória da panela	Velha					X

3.2.2. REAÇÃO DE DESOXIDAÇÃO

A desoxidação do aço é realizada mediante a adição de elementos que tenham pelo oxigênio uma afinidade muito maior que o ferro, formando com ele os produtos da desoxidação. Os elementos desoxidantes mais usados na indústria siderúrgica são o alumínio e o silício.

PLÖCKINGER discutiu em 1963 ⁽¹⁵⁾ a influência da prática da desoxidação na limpidez do aço, especialmente o tratamento a vácuo e o uso de alumínio como desoxidante. A vantagem do alumínio é o baixíssimo teor de oxigênio solúvel atingido, o que previne a formação de monóxido de carbono durante a solidificação. A grande energia interfacial do óxido de alumínio em contato com o banho aumenta a remoção das inclusões. Interessante foi a observação de que as inclusões de alumina separam-se do aço muito mais rápido que as

inclusões de silicatos, e que a flotação independe do tamanho da inclusão ou da densidade.

Estes desoxidantes clássicos irão gerar inclusões não metálicas primárias.

Logo após a adição do desoxidante, partículas nucleiam, precipitam e crescem rapidamente. Este estágio é principalmente controlado pela difusão do elemento desoxidante e o oxigênio. Após a nucleação grandes inclusões continuam a crescer. Devido ao crescimento de inclusões grandes, as concentrações de oxigênio e alumínio no banho decrescem e pequenas inclusões são dissolvidas. Este processo é conhecido como “OTSWALD RIPENING”. O fenômeno de “OTSWALD RIPENING” ocorre rapidamente até o tamanho das inclusões ficar uniforme.

Depois das inclusões crescerem suficientemente, o processo de crescimento das mesmas é controlado pela colisão turbulenta e pela colisão devida à lei de STOKES. Devido à diferença de densidade entre o aço líquido e as inclusões, da anexação às bolhas e ao transporte no vaso metalúrgico, as inclusões maiores são removidas.

As distribuições do tamanho das inclusões têm sido relatadas por medições experimentais de painéis e distribuidores ⁽¹⁶⁾. Durante a desoxidação, o número total de partículas maior que 3 μm de diâmetro é em torno de $10^6 - 10^7$ por kg entre 0,5 e 1,5 min. após a adição de alumínio. As inclusões pequenas continuam suspensas no aço líquido e passam ao próximo processo, e podem ser removidas pela escória de panela e pelas paredes do revestimento refratário através de reações interfaciais e de difusão.

As inclusões endógenas observadas em aços baixo carbono acalmados ao alumínio têm várias formas, tais como “clusters” de alumina dendríticos (30 a 100 μm) e alumina em forma de coral (< 50 μm) Figura 3.3.

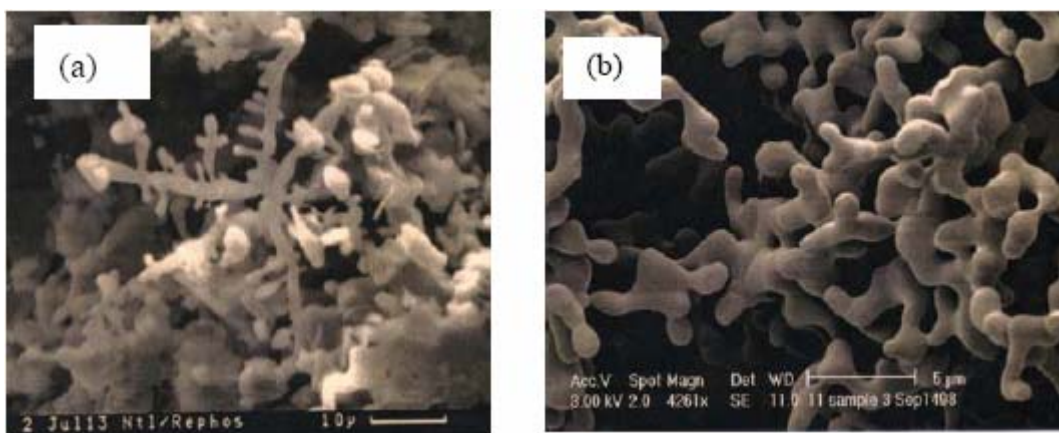


Figura 3. 3 – Morfologias da inclusão de alumina: a) cluster dendrítico, b) estrutura coral ⁽⁴⁾.

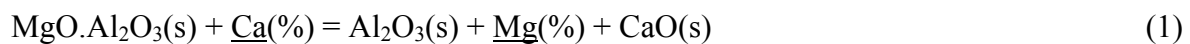
No estágio inicial do período de desoxidação, inclusões do tipo 2, 3 e 4 (mostradas na tabela IV) podem ser encontradas no aço líquido. Poucas inclusões do tipo 5 (Al_2O_3 pura) são observadas. A existência de inclusões de alumina pura do tipo 5 durante o período da desoxidação, evidencia a ocorrência da nucleação homogênea da Al_2O_3 ⁽²⁾.

Esta afirmação concorda com os resultados dos experimentos em laboratório e estudo de modelamento matemático, onde a nucleação homogênea da alumina foi mostrada ocorrer em regiões com grande supersaturação de alumínio. A presença de “clusters” de alumina um minuto após a desoxidação, indica que o processo de aglomeração é muito rápido.

Durante a desoxidação, a adição de alumínio irá diminuir a atividade do oxigênio no banho e, ao mesmo tempo, aumentar a atividade do alumínio. A operação de desgaseificação a vácuo ajuda a diminuir o potencial de oxigênio no banho. Mesmo antes da desgaseificação a vácuo, a atividade do oxigênio pode ser menor que 0,0001.

Quando a atividade do oxigênio no banho atinge este valor, a fase $\text{MgO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ não é mais estável.

Se o metal líquido não contém Ca, a fase $\text{MgO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ começaria a se decompor, deixando o banho sem nenhuma fase óxida. Por outro lado, a presença de Ca dissolvido no banho levaria à redução da fase espinélio de acordo com a seguinte reação:



$$\Delta G_1^0 = -36625,5 \text{ (J/mol)} \text{ (1873 K)}$$

Como visto na Tabela IV, apenas as inclusões tipo 3 ($\text{MgO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ espinélio) e 6 (fase espinélio envolvida por uma solução $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$) são encontradas no banho após a desoxidação. A concentração de alumina nas inclusões do tipo 3 aumenta neste estágio. Este é o resultado natural do aumento da atividade de alumínio no banho durante a desoxidação. A existência da inclusão tipo 6 é uma forte evidência da ocorrência da reação (1) após a desoxidação.

3.2.3. REAÇÃO ENTRE REFRAATÁRIO E A ESCÓRIA DA PANELA (VITRIFICADA)

A escória vitrificada da panela é formada durante o seu esvaziamento, quando a escória entra em contato com o revestimento da mesma. Uma fina cobertura de escória é então formada na parede da panela. Esta escória líquida irá aderir e penetrar nos poros do refratário, formando uma camada de escória vítrea.

Um exame visual de amostras retiradas mostrou que a zona de escória infiltrada era muito mais espessa em uma panela velha. Desta forma, quando a corrida seguinte é vazada numa panela nesta condição, a camada de escória é total ou parcialmente removida, resultando na formação de inclusões no metal líquido ⁽¹⁷⁾.

3.2.4. REAÇÃO ENTRE A ESCÓRIA DE TOPO E O REFRAATÁRIO DA PANELA

3.2.4.1. CONSIDERAÇÕES TERMODINÂMICAS

O $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ não é estável quando está em contato com escória de panela (topo – cobertura da panela de aço), em temperaturas acima de 1811K.

Segundo D. SICHEN et al. ⁽²⁾, um contato adequado aliado a uma elevada temperatura promovem a reação entre $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ e a escória de topo. Os produtos desta reação dependem da quantidade de escória vitrificada de panela e da escória de panela (topo) em contato. Levando em conta todas as situações, são esperados quatro tipos de inclusão:

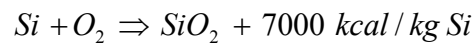
- 1) $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ espinélio;
- 2) Solução de óxido líquida;
- 3) $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ espinélio + líquido;
- 4) $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ espinélio + $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$

3.2.5 INFLUÊNCIA DO AQUECIMENTO QUÍMICO NA FORMAÇÃO DAS INCLUSÕES

O aquecimento químico é realizado nas estações de refino secundário através do sopro de oxigênio por uma lança, e a adição de um elemento que em combinação com este oxigênio, resulte uma reação exotérmica, fornecendo assim energia suficiente para elevar a temperatura do aço.

Dependendo do tipo de aço a ser tratado utiliza-se o alumínio ou o silício para aquecer o aço.

O esquema básico destas reações está esquematizado abaixo.



A grande vantagem do aquecimento químico é a sua alta taxa de aquecimento, quando comparada com o aquecimento elétrico, através de eletrodos, como no forno panela (7 °C para 4 °C).

Entretanto, assim como na desoxidação, o aquecimento químico também irá gerar inclusões não metálicas, principalmente alumina (Al₂O₃), no caso do aquecimento com alumínio. E se não forem utilizados os procedimentos adequados para eliminação das mesmas, as propriedades físicas e mecânicas do produto final serão afetadas.

3.3. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA LIMPIDEZ DO AÇO

Para controlar a limpidez do aço é fundamental dispor de métodos de avaliação precisos. A quantidade, distribuição do tamanho, forma e composição das inclusões deveria ser mensurada em todos os estágios da produção do aço. As técnicas de medição variam desde métodos diretos, os quais são precisos, porém têm alto custo, a métodos indiretos, que são rápidos e de menor custo, porém só são aplicáveis como indicadores relativos.

3.3.1. MÉTODOS DIRETOS DE AVALIAÇÃO

Existem diversos métodos diretos de avaliação ⁽³⁾ da limpidez do aço. A seguir estão expostos alguns dos métodos utilizados.

- Observação metalográfica por microscópio (MMO)

Método tradicional, em que amostras de aço são examinadas em microscópio ótico, em duas dimensões e as inclusões presentes são quantificadas e qualificadas por avaliação visual.

- Análise de imagens (IA)

Evolução do MMO, permite mensurar a quantidade de inclusões através de uma rápida avaliação computacional das imagens microscópicas. Um programa permite distinguir regiões escuras e claras. Este método pode avaliar, mais facilmente, maiores áreas e um maior número de inclusões que o MMO, mas é sujeito a erros como, arranhões, corrosões e manchas, que podem ser confundidos com inclusões não metálicas.

- Microscopia eletrônica de varredura (SEM)

Este método revela claramente a forma tridimensional e a composição de cada inclusão examinada. A composição é mensurada através do micro analisador de sonda de elétron (EPMA). Entretanto, longas preparações da amostra são necessárias, para localizar e expor as inclusões.

- Dissolução (Slime)

Método preciso, entretanto demorado. Uma amostra relativamente grande de aço (200 g – 2 kg) é completamente dissolvida em ácido (HCl), e as inclusões não metálicas remanescentes são filtradas para inspeção, contagem e posterior análise.

A Tabela V apresenta um quadro comparativo de diversos métodos de avaliação direta de inclusões.

Tabela V – Métodos diretos de avaliação da limpidez do aço.

Método	Vantagens	Pontos fracos
MMO	- Quantidade de inclusões, distribuição de tamanho (principalmente de 5 - 30 μ m) e possível forma	- Bidimensional - Avaliação visual (erro humano) - Composição das inclusões - Longo tempo
IA	- Distribuição do tamanho das inclusões	- Não avalia morfologia e composição - Bidimensional - Contagem de inclusões inexistentes (erro da máquina)
Impressão de enxofre	- Grande área de cobertura - Baixo custo	- Não avalia quantidade, composição e distribuição de tamanho das inclusões - Serve apenas para macro inclusões
(SEM e EPMA)	- Revela forma tridimensional da inclusão - Mensura a composição da inclusão	- Mede apenas individualmente as inclusões - Longo tempo processamento
Espectrometria fotoeletrônica de raios-X (XPS)	- Medição da composição da inclusão	- Não avalia morfologia, quantidade e distribuição de tamanho - Aplicável apenas para inclusões maiores que 10 μ m
Varredura Ultra-sônica Convencional (CUS)	- Medição da distribuição do tamanho (> 20 μ m)	- Não avalia morfologia e composição das inclusões
Raios-X	- Medição da quantidade de inclusões	
Dissolução (Slime)	- Medição precisa da quantidade de inclusões - Captura grandes inclusões raras - Com análise sub seqüente, pode obter distribuição de tamanho e morfologia 3-D	- Longo tempo para dissolução completa da amostra

3.3.2. MÉTODOS INDIRETOS DE AVALIAÇÃO

Devido ao alto custo, grande tempo requerido e dificuldades de amostragem dos métodos diretos, geralmente, a avaliação da limpidez do aço é realizada nas indústrias através de métodos indiretos como, medição do oxigênio total, análise da composição química da escória, “pick-up” de nitrogênio e outros.

3.3.2.1. MEDIÇÃO DO OXIGÊNIO TOTAL (T.O.)

O oxigênio total no aço é a soma do oxigênio livre (dissolvido no aço), e o oxigênio combinado, na forma de inclusões não-metálicas. O oxigênio livre pode ser mensurado de maneira relativamente fácil, usando sensores de medição de oxigênio. Ele é controlado principalmente pelo equilíbrio termodinâmico com elementos desoxidantes, o alumínio, por exemplo. O equilíbrio entre o alumínio e o oxigênio durante a desoxidação é mostrado na Figura 3.4.

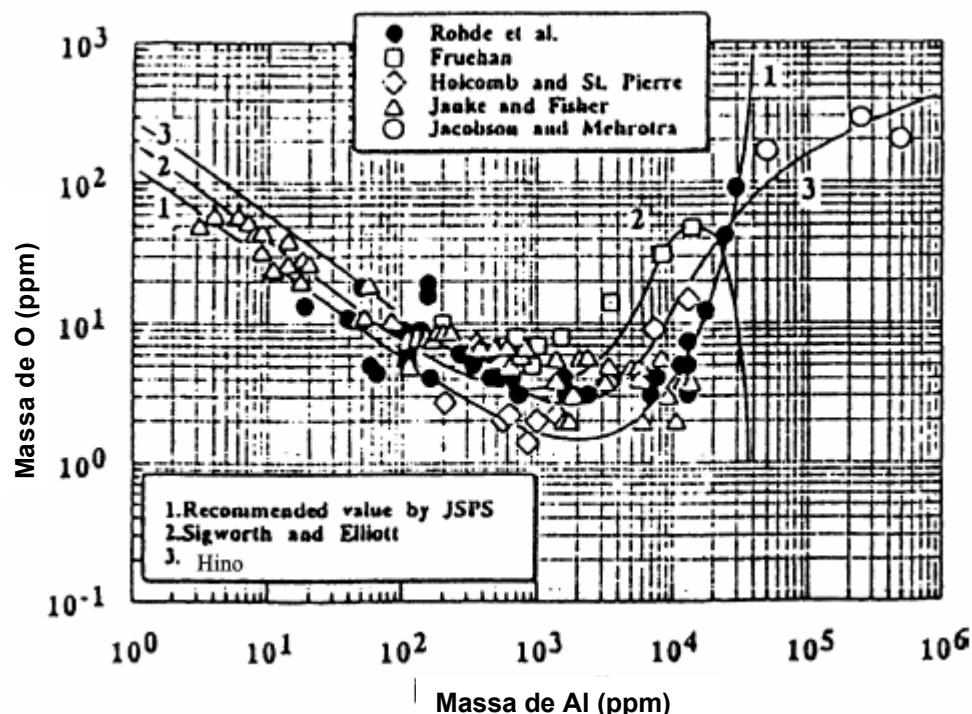


Figura 3.4 - Equilíbrio entre o alumínio e o oxigênio no aço (1873 K) ⁽³⁾.

Na equação 3 se representa o equilíbrio para pequenos teores de alumínio, incluindo o efeito da temperatura.

$$\log k = \log([\%Al]2[\%O]3) = - 62780/T (k) + 20,54 \quad (3)$$

De acordo com a Figura 3.4 e a equação (3), para $[\%Al] = 0,03$ a $0,06$; o oxigênio livre se encontra entre 3 a 5 ppm a 1600°C . Como o % de oxigênio livre não varia muito, o oxigênio total é um método razoável para medição indireta da quantidade de inclusões no aço (limpidez).

O oxigênio total, medido em amostras de aço líquido, tem uma correlação direta com a incidência de esfoliação no produto, como pode ser visto na Figura 3.5.

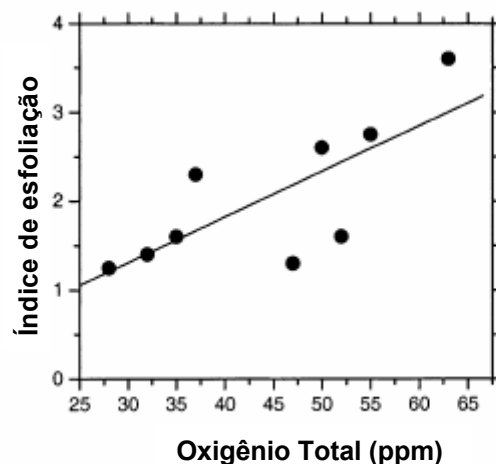


Figura 3. 5 – Relação entre o O_{total} no distribuidor e índice de defeitos no produto ⁽³⁾.

Amostras no distribuidor são normalmente retiradas para indicar limpidez para disposição das placas. Por exemplo, a Kawasaki Steel requer oxigênio total < 30 ppm para garantir o despacho de bobinas a frio sem inspeção especial. Amostras com oxigênio total entre 30 e 55 ppm requerem inspeção crítica e corridas com T.O. > 55 ppm são encaminhadas para aplicações menos exigentes ⁽³⁾.

3.3.2.2. PICK-UP DE NITROGÊNIO

As diferenças no teor de nitrogênio entre processos siderúrgicos (especialmente panela e distribuidor), são indicadores de entrada de ar durante as operações de transferência.

Após a desoxidação, o baixo teor de oxigênio dissolvido no aço permite a absorção do nitrogênio. O pick-up de nitrogênio é uma medição indireta grosseira do oxigênio total, da limpeza do aço e de problemas de qualidade devido inclusões formadas por reoxidação, como indicado na Figura 3.6.

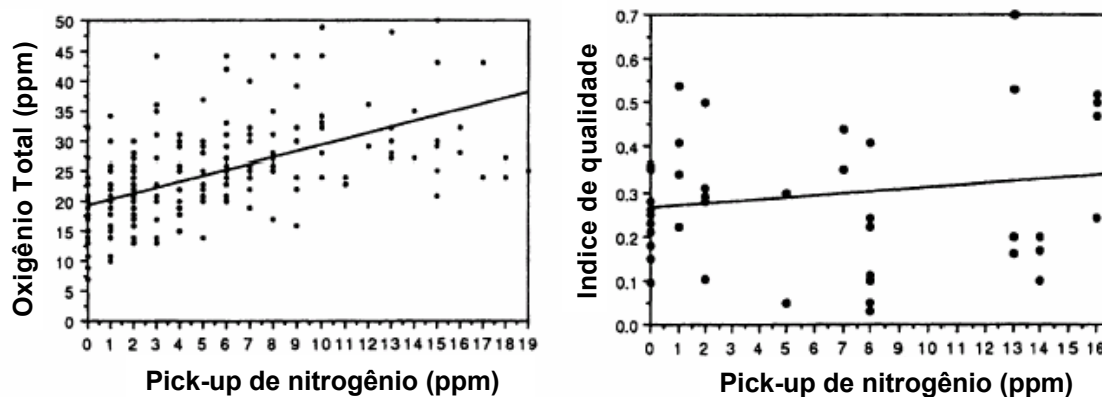


Figura 3. 6 – Relação entre pick-up de nitrogênio, oxigênio total e qualidade do aço ⁽³⁾.

Nota-se que o pick-up de oxigênio é sempre bem maior que o pick-up de nitrogênio medido, isto é devido a maior cinética de absorção na interface ar-aço ⁽¹⁸⁾. Soma-se a este fato que a absorção de nitrogênio é bem mais rápida quando os teores de oxigênio e enxofre são baixos.

3.3.2.3. ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ESCÓRIA

Com a análise da composição da escória podemos avaliar basicamente dois itens.

Primeiro a evolução da composição da escória antes e depois do tratamento do aço na estação de refino secundário pode ser utilizada para estimar a absorção de inclusões pela escória.

Outro item que pode ser avaliado é a origem de uma inclusão de óxido complexa, a qual pode ser rastreada, através da análise da composição química da escória.

3.4. PRINCIPAIS MECANISMOS DE REMOÇÃO DE INCLUSÕES NO DESGASEIFICADOR RH

O desgaseificador RH tem participado de forma bastante positiva no aumento da capacidade da aciaria em produzir aços de maior limpidez, devido a suas características de maior energia de misturamento, quando comparado aos reatores convencionais.

A remoção das inclusões envolve fenômenos complexos, tais como, flotação, coalescimento por colisão, anexação às bolhas de gás inerte e o campo de velocidade.

Devido à alta complexidade do modelamento matemático do mecanismo de anexação das inclusões às bolhas de gás inerte, este estudo abordará apenas os mecanismos de flotação e coalescimento no desgaseificador RH.

3.4.1. FLOTAÇÃO DAS INCLUSÕES

A densidade das inclusões de alumina é em torno de 60% da densidade do aço líquido. Portanto as inclusões tendem a flotar para a superfície do aço líquido. De acordo com a lei de STOKES, a velocidade de flotação é dada por:

$$v_{incl.} = \frac{2 (\rho_{aço} - \rho_{incl.}) g r^2}{9 \mu} \quad (4)$$

Onde,

v_{incl} – velocidade de flotação da inclusão (m/s)

$\rho_{aço}$ – densidade do aço (kg/m³)

ρ_{incl} – densidade da inclusão (kg/m³)

g – força da gravidade (m/s²)

r – raio da inclusão (μm)

μ – viscosidade do aço (kg/ms)

Devido às pequenas dimensões das inclusões e à alta viscosidade do aço líquido, a velocidade de flotação das inclusões é limitada a poucos micrômetros por segundo. Esta velocidade seria de, por exemplo, $30 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ para uma partícula de alumina de $10 \mu\text{m}$ ⁽¹⁹⁾.

Portanto, espera-se que a remoção das inclusões, promovida pela convecção do aço, prevaleça sobre a ascensão vertical prevista pela lei de STOKES.

Ao se plotar um gráfico do O_{total} versus tempo de espera, observa-se uma pequena tendência de aumento do O_{total} com o aumento do tempo de espera. Ainda que a relação seja fraca, isto é o oposto do esperado se a remoção de inclusões fosse controlada exclusivamente pela lei de STOKES. Entretanto, excluindo os aços desgaseificados, que têm um tempo de espera menor após a adição do Al e um menor O_{total} , uma pequena relação negativa pode ser observada na Figura 3.7.

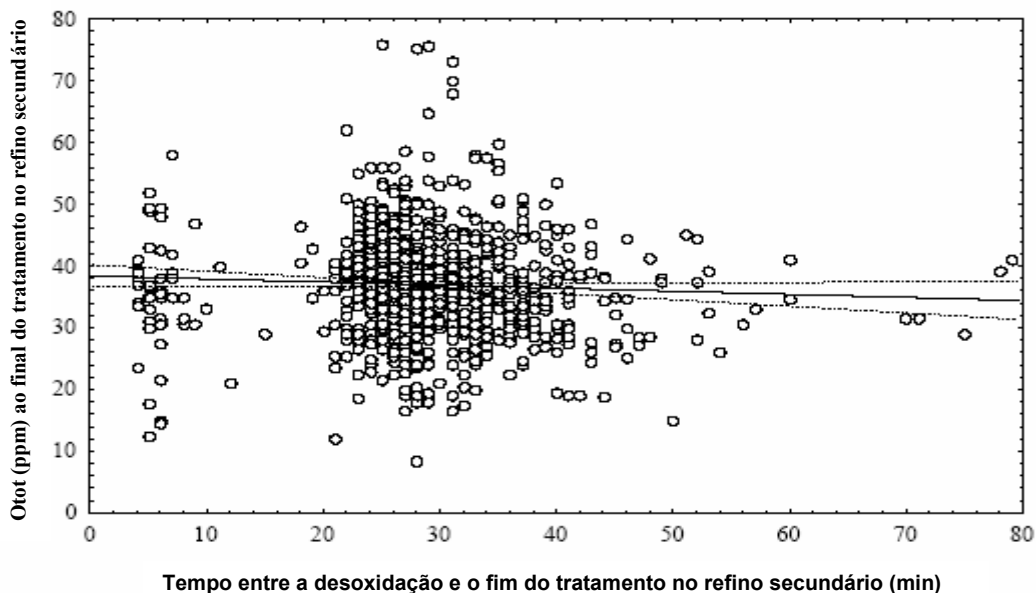


Figura 3. 7 – O_{total} no fim do refino secundário x tempo de espera ⁽²⁰⁾.

Para homogeneizar o aço e aumentar o número de colisões entre as inclusões (capazes de levar ao coalescimento), o aço é agitado na panela através de energia eletromagnética, mecânica ou pela injeção de gás para borbulhamento.

A Figura 3.8 mostra que a agitação eletromagnética do aço, utilizando forno panela, aumenta a remoção de oxigênio.

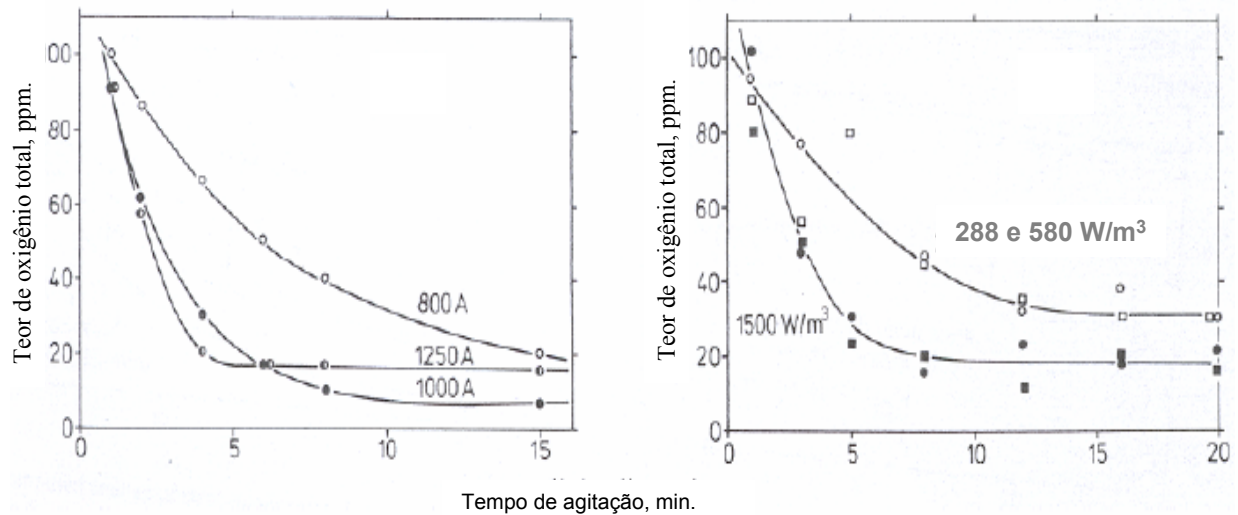


Figura 3. 8 – O_{total} x tempo de agitação do aço ⁽²⁰⁾.

A remoção de oxigênio decresce exponencialmente com o tempo de agitação. Após aproximadamente 10 minutos, o prolongamento da agitação tem pouca eficiência no aumento da limpeza ⁽²⁰⁾. A desgaseificação do aço no RH, que é comum para aços ultra baixo carbono, é uma eficiente prática para agitação do aço e remoção de inclusões ⁽²⁰⁾.

3.4.2. ANEXAÇÃO DAS INCLUSÕES AS BOLHAS DE GÁS INERTE

Para aços não desgaseificados, a homogeneização através da injeção de gás inerte é prática comum. A falta de molhabilidade das inclusões ajuda na separação das mesmas do aço líquido e na sua anexação às bolhas de gás (e também na parede do refratário e na interface metal-escória).

Uma vez que a separação do aluminato de cálcio do aço é mais difícil que as partículas de alumina, a adição de cálcio deve ser postergada até que a taxa de remoção da alumina seja insignificante. Cálculos da eficiência da remoção das inclusões através do borbulhamento de gás foram realizados por vários autores. WANG et al. ⁽²¹⁾ calcularam a probabilidade de uma inclusão encontrar uma bolha de gás, e a probabilidade da mesma ser anexada à bolha, como pode ser observado na Figura 3.9.

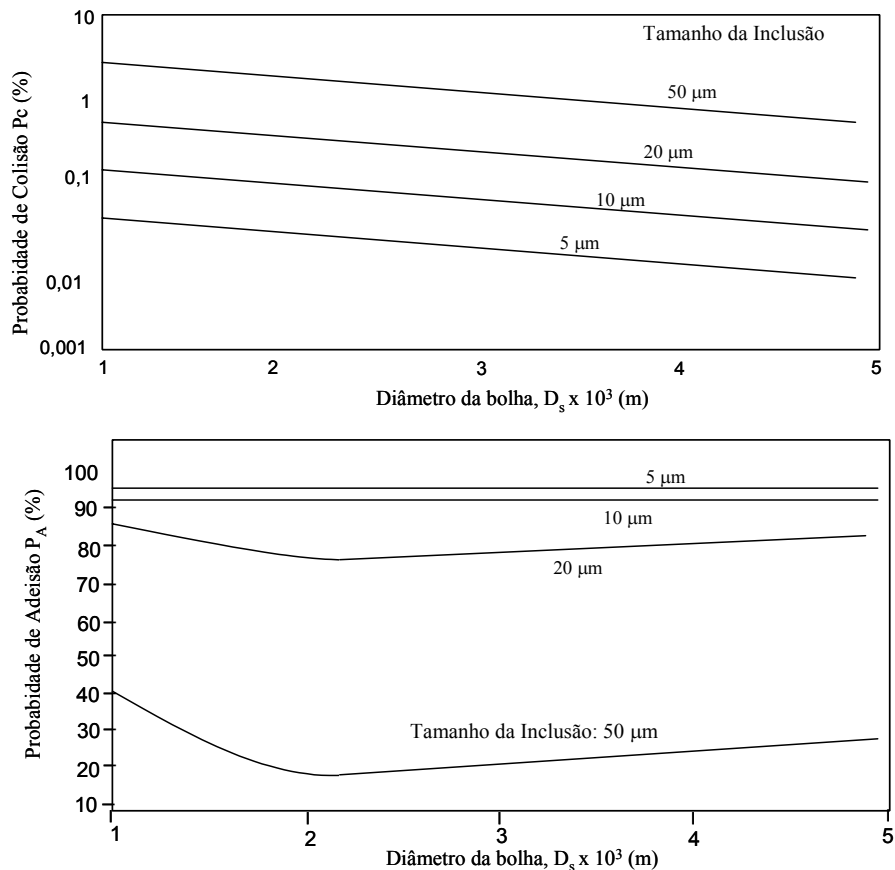


Figura 3. 9 – Probabilidades de colisão e coesão x diâmetro da bolha, para diferentes tamanhos de inclusões ⁽²⁰⁾.

A anexação às bolhas depende da velocidade de deslizamento de uma inclusão ao longo da bolha, da taxa de drenagem do filme de aço e da ruptura entre a inclusão e a bolha.

Um grande número de pequenas bolhas aumenta a chance de que as inclusões e as bolhas se encontrem, mas a capacidade de remoção das inclusões decresce. Além disso, se as bolhas forem menores que 0,5 mm elas ficariam presas pela convecção do aço e não seriam removidas do banho. CHO e LEE ⁽²²⁾ confirmaram que as probabilidades de coalescimento e anexação são importantes, mas acrescentaram que, para a remoção de inclusões finas, a energia interfacial também é importante. Uma grande energia interfacial preveniria a separação das inclusões das bolhas.

Em uma Usina siderúrgica na Bélgica nenhuma relação entre o O_{total} ao final do refino secundário e o tempo de homogeneização, quantidade de gás e fluxo de gás foi encontrada. Aparentemente borbulhamento prolongado com gás não apresentou efeito significativo ⁽²³⁾.

3.4.3. COALESCIMENTO DAS INCLUSÕES

Coalescimento é quando duas ou mais partículas (inclusões) se chocam formando uma outra de maior tamanho. As principais razões para a coalescência são as colisões de inclusões de tamanhos diferentes, seja devido à diferença de velocidade, seja devido ao aprisionamento de duas inclusões no mesmo redemoinho ou em um grande fluxo turbulento de redemoinhos. O alongamento de um redemoinho também forçará as inclusões a ficarem mais próximas.

A frequência de colisão entre os clusters de alumina pode ser estimada de acordo com a teoria da colisão e coalescência de partículas esféricas.

De acordo com esta teoria, a frequência de colisão, N_{ij} , por unidade de tempo e unidade de volume entre duas partículas com volumes particulares v_i e v_j pode ser expressa pela equação abaixo ⁽²⁴⁾.

$$N_{ij} = \beta(v_i, v_j) n_i n_j \quad (5)$$

$\beta(v_i, v_j)$, é uma função de frequência de colisão entre as duas partículas i e j (m^3/s), a qual é determinada pelo modo do fluxo e tamanho das partículas, n_i e n_j são as concentrações numéricas das partículas i e j ($-/m^3$).

De acordo com a força motriz considerada, expressões específicas precisam ser fornecidas.

3.5. MODELOS MATEMÁTICOS PARA REMOÇÃO DE INCLUSÕES NO RH

Conforme comentado por THOMAS et al. ⁽¹⁶⁾, a remoção das inclusões envolve fenômenos complexos tais como, coalescimento das inclusões por colisão, flotação das inclusões e a adesão das inclusões às bolhas.

LINDBORG e TORSSELL, calcularam a mudança do percentual de oxigênio usando o modelo de colisão de STOKES. NAKANISHI e SZEKELY ⁽¹⁶⁾ calcularam a distribuição do tamanho das inclusões, considerando que as inclusões colidem em redemoinhos turbulentos, usando a teoria de SAFFMAN e TURNER, e assumindo que inclusões com raio maior que 16 μm são removidas instantaneamente. A colisão de partículas em fluxo turbulento tem sido estudada em outros campos da engenharia.

Existem várias propostas de um modelo numérico, no qual o coalescimento, flotação e remoção das inclusões por aprisionamento nas bolhas de argônio são calculados para prever a mudança na distribuição do tamanho das inclusões durante a desgaseificação no RH. Uma das propostas é descrita a seguir e não é a única que pode ser aplicada. Entretanto variações da mesma são as mais comuns.

3.5.1. EVOLUÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DAS INCLUSÕES

A distribuição do tamanho das inclusões é governada pela conservação de massa dentro de cada faixa de tamanho e espaço de tempo. Os raios das inclusões podem ser discretizados em intervalos de, por exemplo, 0,05 μm , com um raio médio, r_k .

A taxa de mudança do nº de inclusões em cada faixa de tamanho, $f(r_k)$, pode ser calculada pelas seguintes equações:

$$\frac{df(r_k)}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{i=k-1} f(r_i) f(r_{k-i}) w(i, k-i) - \sum_{i=1}^{i=\max} f(r_i) f(r_k) w(i, k) - S \quad (6)$$

Sob as condições, que refletem a conservação de massa.

$$r_{k-i}^3 = r_k^3 - r_i^3 \quad (7)$$

Os três membros do lado direito da equação (6), representam, geração de massa (da aglomeração de partículas menores, i e $k-i$), desaparecimento (da aglomeração em partículas maiores devido à colisão com qualquer faixa de tamanho de partícula, r_k), e remoção por flotação (S).

A colisão das inclusões ocorre principalmente em regiões turbulentas e são proporcionais à taxa de dissipação da turbulência; e ocorre também devido às diferentes taxas de flotação de STOKES de duas partículas:

$$W = W_t + W_s \quad (8)$$

Onde,

W_t = Taxa de colisão da inclusão em região turbulenta

W_s = Taxa de colisão de Stokes

As funções nestas equações dependem dos sub-modelos de colisão das inclusões, flotação das inclusões e aprisionamento pelas bolhas de argônio.

3.5.1.1. MODELO DE COLISÃO DAS INCLUSÕES (COALESCIMENTO)

A taxa de colisão em regiões turbulentas pode ser calculada usando o modelo de SAFFMAN&TURNER, a teoria de HIGASHITANI e a teoria de colisão de STOKES.

A taxa de colisão entre duas inclusões de faixas de tamanho, r_i e r_j , é representada por SAFFMAN e TURNER ⁽¹⁶⁾ :

$$W_t(r_i, r_j) = 1.3 \alpha (r_i + r_j)^3 \left(\frac{\varepsilon}{\nu} \right)^{0.5} \quad (9)$$

Onde,

r_i e r_j = raios das inclusões (μm)

ε = Taxa de dissipação de energia (m^2/s^3)

ν = Viscosidade cinemática (m^2/s)

O coeficiente empírico de colisão, α , foi introduzido por K. NAKANISHI e SZEKELY ⁽¹⁶⁾, estimado entre 0,27 e 0,63 por comparação dos percentuais de oxigênio calculados e os percentuais medidos.

HIGASHITANI et al. ⁽¹⁶⁾, sugeriram equações para achar o valor de α .

No modelo proposto, o aumento da viscosidade do fluido reduz a taxa de colisão e as interações entre as partículas são consideradas:

$$\alpha = C1 \log N + C2 \quad (10)$$

$$N = \frac{6\pi\mu(r_i + r_j)^3 \sqrt{4\varepsilon/15\pi\nu}}{A} \quad (11)$$

Onde,

C1 e C2 = Constantes empíricas

N = número adimensional (razão entre a força viscosa e força de Van der Waals)

μ = Viscosidade dinâmica do aço líquido (Pa.s)

ε = Taxa de dissipação de energia (m^2/s^3)

ν = Viscosidade cinemática (m^2/s)

A = Constante de HAMAKER (J)

A diferença da velocidade de flotação entre as inclusões grandes e pequenas, também provoca colisão entre as partículas. A taxa de colisão de STOKES, W_s , é apresentada na equação abaixo:

$$W_s = \frac{2\pi\Delta\rho g}{9\mu} (r_i + r_j)^3 |r_i - r_j| \quad (12)$$

Onde,

$\Delta\rho$ = Diferença de densidade entre as inclusões e o aço líquido

μ = Viscosidade dinâmica do aço líquido

r_i e r_j = raios das inclusões

g = força da gravidade

3.5.2. FLOTAÇÃO DE STOKES

A taxa de remoção por flotação, S, é calculada usando as equações abaixo, assumindo velocidade terminal de Stokes e distribuição homogênea das inclusões:

$$S = f(r) \text{ vdt/L} \quad (13)$$

$$v = \frac{2g}{9\mu} \Delta \rho r^2 \quad (14)$$

Onde,

L = altura do aço líquido no vaso

v = Velocidade terminal das inclusões no aço líquido

g = aceleração da gravidade

μ = Viscosidade do aço líquido

r = raio das inclusões

A taxa de flotação varia com a distribuição instantânea de tamanhos das inclusões.

3.5.3. EFEITO DAS BOLHAS DE ARGÔNIO

A taxa de “anexação” das inclusões às bolhas de argônio pode ser calculada assumindo-se que o centro da inclusão percorre uma trajetória correspondente às linhas de fluxo e, são anexadas às bolhas se estas linhas de fluxo estiverem mais próximas da bolha do que do raio da inclusão. O cálculo é complexo e envolve a probabilidade de choque além do sucesso do choque entre bolha e inclusão. Vários parâmetros de cálculo não são conhecidos com precisão e assumem o caráter de parâmetros de ajuste, específicos do sistema. Alguns resultados devidos a THOMAS ⁽¹⁶⁾ são apresentados a seguir.

A linha de fluxo em torno da bolha foi calculada pela equação 15, assumindo fluxo potencial:

$$\varphi = \frac{1}{2} U \sin^2 \theta \left(R^2 - \frac{a^3}{R} \right) \quad (15)$$

Onde,

φ = Função Fluxo

U = Velocidade Relativa bolha-líquido

a = Raio da bolha

Esta equação foi utilizada para calcular a distância de aprisionamento crítica, b . As linhas de fluxo calculadas em torno de uma bolha de argônio com diâmetro de 5 mm são mostradas na Figura 3.10.

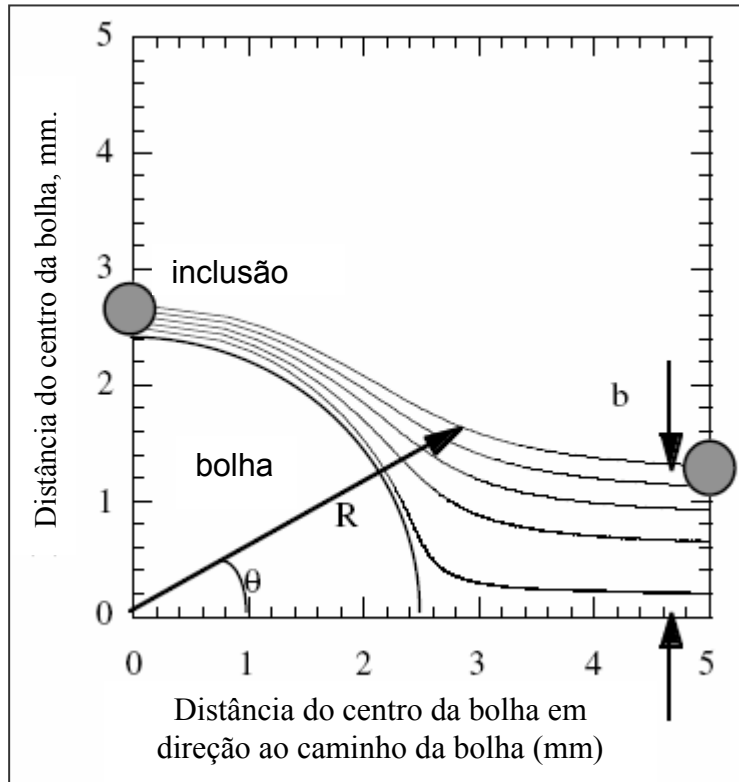


Figura 3. 10 – Linhas de fluxo calculadas em torno de uma bolha de argônio ⁽¹⁶⁾.

A diferença de velocidade entre o aço e as bolhas, v_b , foi estimada como 0,3 m/s ⁽¹⁶⁾. Quando as inclusões estão na quantidade de $v_b b^2 \pi$, elas são aprisionadas pela bolha em segundos. Assumindo que as inclusões são distribuídas homogeneamente, a taxa de aprisionamento, S_b , é demonstrada pela equação 16.

$$S_b = N_b v_b b^2 \pi / V \quad (16)$$

Onde,

N_b = nº de bolhas

v_b = diferença de velocidade entre a bolha e o aço

V = volume total de aço líquido

O aprisionamento das inclusões leva tempo, então a probabilidade de ocorrer é assumida como sendo apenas 3%.

Supondo que todas as bolhas de argônio têm 5 mm de diâmetro, o nº de bolhas de argônio concentradas no snorkel de subida foi estimado em $3,6 \times 10^6$, baseado nos resultados do modelo de fluxo fluido multifásico.

Assumiu-se que as inclusões aprisionadas pelas bolhas de argônio são removidas pela escória da panela ou na superfície superior livre do desgaseificador.

3.5.4. RAIOS E DENSIDADE DO CLUSTER

O raio da inclusão (cluster), de Al_2O_3 , para cálculos de colisão, foi considerado ser como o de uma esfera circoambiente. TOZAWA et al. ⁽¹⁶⁾ usaram a teoria fractal para relacionar os raios medidos das inclusões (cluster), e o nº de partículas compondo a inclusão:

$$N = d^{1,8} D^{1,8} \quad (17)$$

Onde,

N = número das partículas em uma inclusão (cluster)

d = diâmetro de uma partícula

D = diâmetro de uma inclusão (cluster)

Usando a equação 18, o raio da esfera circoambiente da inclusão (cluster), R_c , é calculado a partir do raio medido de uma esfera equivalente, R_m .

$$R_c = (d/2)^{1,8} R_m^{5/3} \quad (18)$$

Os conceitos de raio de uma esfera circoambiente e o raio de uma esfera sólida são mostrados na Figura 3.11.

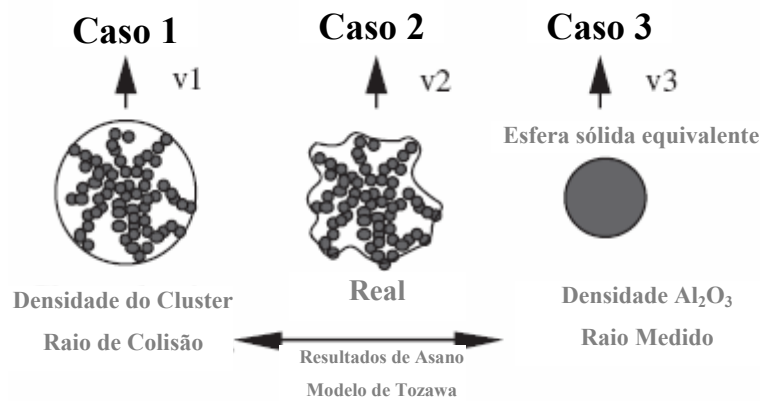


Figura 3.11 – Raio da inclusão e densidade ⁽¹⁶⁾.

O diâmetro das partículas do cluster, d , foi de aproximadamente $1,5 \mu\text{m}$, baseando-se em medições das inclusões.

A densidade do cluster foi estimada como uma função da fração do volume da Al_2O_3 no cluster.

$$\rho_{cluster} = (1 - \beta)\rho_{Fe} + \beta \rho_{Al_2O_3} \quad (19)$$

Onde,

$\rho_{cluster}$ = densidade do cluster

β = Fração do volume da Al_2O_3 no cluster

ρ_{Fe} = densidade do aço

$\rho_{Al_2O_3}$ = densidade da Al_2O_3

ASANO e NAKANO ⁽¹⁶⁾ mediram a fração do volume de Al_2O_3 na inclusão (cluster), e concluíram que a fração é em torno de 0,03, para clusters grandes.

De acordo com a equação 19, e considerando β é igual a 0,03 (0,97 de Fe), para clusters grandes, a densidade da inclusão é quase a mesma do aço. Isto é, existe uma pequena força direcionando os clusters grandes a flotar.

Na equação 19, se assume que clusters inteiros, incluindo espaços preenchidos com aço, se movem com velocidade uniforme, como mostrado no caso 1 da Figura 3.11.

A velocidade de flotação de uma esfera de massa equivalente feita de Al_2O_3 , caso 3 da Figura 3.11, é maior que a do cluster real. Acredita-se que a velocidade de flotação do cluster do caso 1 (com $\beta = 0,03$), seja menor que a do cluster real, caso 2.

Assim, considera-se que as inclusões movem-se a uma velocidade entre o caso 1 e o caso 3.

3.5.5. TRAJETÓRIA DAS INCLUSÕES

As trajetórias das inclusões podem ser calculadas usando o método de rastreamento Lagrangiano, onde a equação de transporte é resolvida para cada inclusão ao longo da sua trajetória através do aço líquido. O balanço de forças inclui a flotação e o arraste relativo ao aço líquido.

Também pode se aplicar, um modelo randômico discreto, para calcular a trajetória das inclusões. Neste modelo, um componente de velocidade randômico, é adicionado à velocidade calculada da partícula, para simular sua interação com uma sucessão de fluidos discretos da fase turbulenta. Este componente randômico é proporcional ao nível de energia cinética de turbulência, K .

A Figura 3.12 mostra uma imagem típica de inclusões. No 1º minuto após a adição de alumínio, tanto as inclusões dendríticas como as partículas sólidas irregulares podem ser vistas. No 15º minuto, não existe nenhuma inclusão dendrítica, apenas clusters de partículas sólidas irregulares. Isto significa que grandes inclusões dendríticas são eliminadas por flotação. Além disso, clusters são gerados por pequenas partículas, que se aderem, durante o processo de desgaseificação no RH.

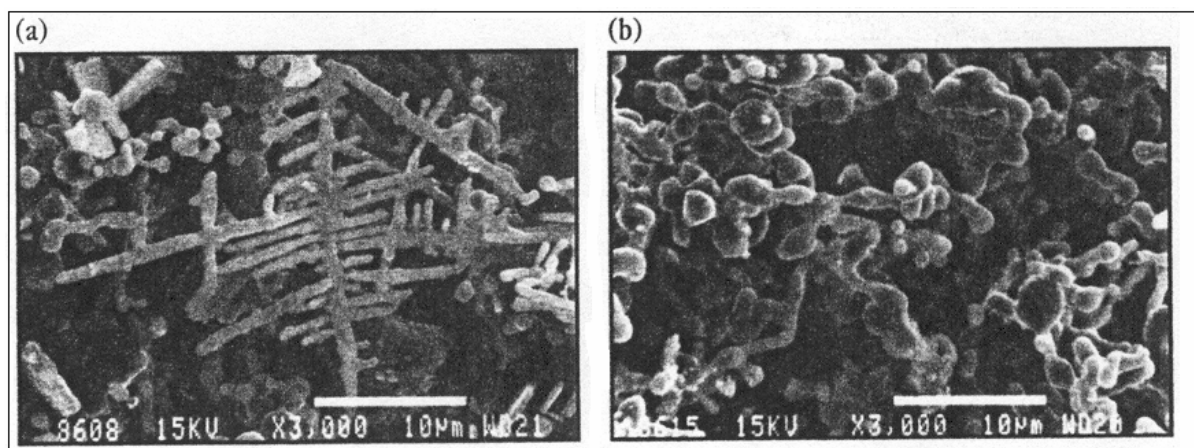


Figura 3. 12 – Imagens de inclusões no Microscópio eletrônico, 1 minuto (a) e 15 minutos (b) após a adição de alumínio.

3.5.6. MECANISMO DE REMOÇÃO DAS INCLUSÕES

A figura 3.13 mostra o teor de oxigênio calculado no desgaseificador RH para cada faixa de tamanho, baseado em distribuições de tamanho de inclusões medidas. Cada raio representa o tamanho médio da inclusão para o intervalo de tamanho. Mais do que 50% do teor de oxigênio vêm das inclusões com raios menores que 5 μm . Este resultado explica por que a taxa de dissipação turbulenta, a qual afeta inclusões menores que 5 μm de raio, é importante no teor de oxigênio total ⁽¹⁶⁾.

O coalescimento diminui o nº de inclusões, porque as colisões são as principais responsáveis pelo decréscimo do nº de inclusões (com raio menor que 5 μm).

O nº de inclusões grandes é controlado por um balanço entre o coalescimento, o qual forma inclusões grandes (clusters), e remoção de inclusões por flotação rápida devido à adesão às bolhas e ao movimento turbulento randômico próximo à superfície.

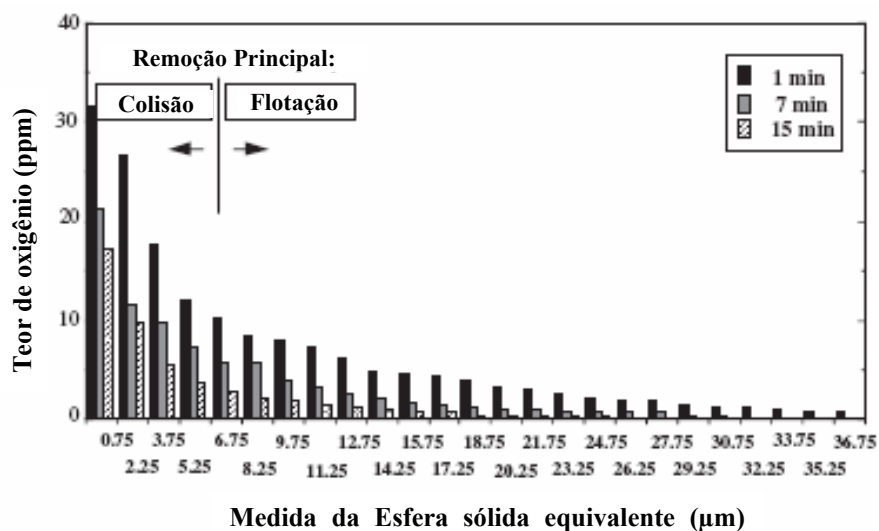


Figura 3.13 – Teor de oxigênio calculado das inclusões de Al_2O_3 no desgaseificador RH ⁽¹⁶⁾.

3.5.7. EFEITO DA TAXA DE DISSIPACÃO TURBULENTA

A Figura 3.14 mostra o teor total de Al_2O_3 , calculado e observado ⁽¹⁶⁾ na panela durante desgaseificação no RH. Estes resultados foram obtidos por integração prévia da distribuição do tamanho das inclusões. Os resultados medidos coincidem com os calculados, assumindo taxa de dissipação de energia em torno de $0,01 \text{ m}^2/\text{s}^3$. O teor de Al_2O_3 , considerando uma taxa de dissipação em torno $0,05 \text{ m}^2/\text{s}^3$ após 600 segundos, é menor que 50 ppm.

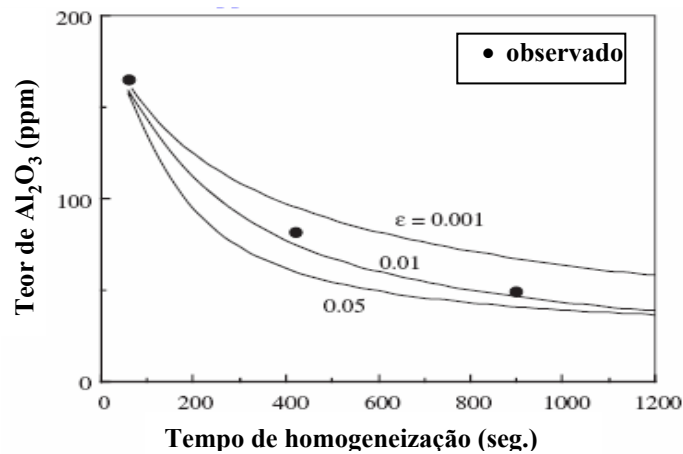


Figura 3.14 – Comparação do teor total de Al_2O_3 calculado e observado ⁽¹⁶⁾.

A Figura 3.15 mostra a distribuição do tamanho das inclusões calculada para cada taxa de dissipação turbulenta no 15º minuto após a adição de alumínio. O nº calculado de inclusões com raio de 35 μm , com baixíssima taxa de dissipação de energia, da ordem de 0,001 m^2/s^3 , é menor devido à menor taxa de colisão.

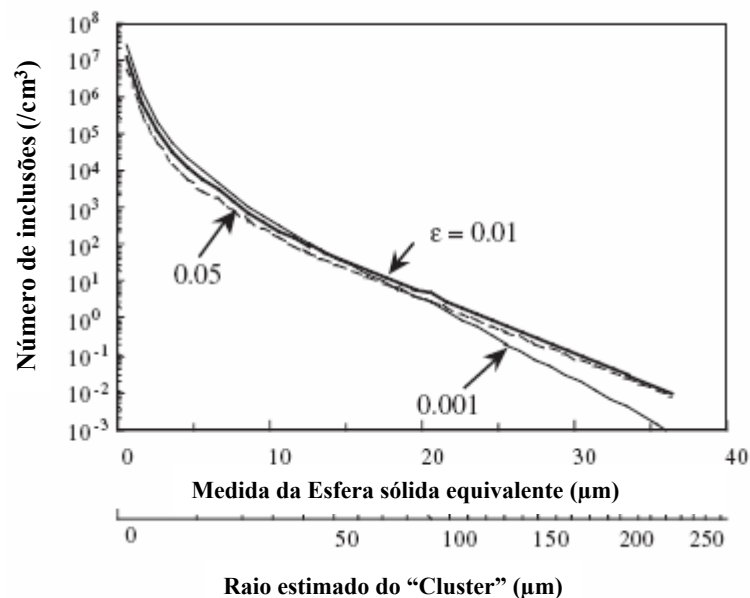


Figura 3.15 – Distribuição do tamanho das inclusões em diferentes taxas de dissipação turbulenta ⁽¹⁶⁾.

O aumento da taxa de injeção de argônio indica aumento do rendimento da remoção de inclusão, devido aos seguintes fatores:

- Anexação pelas inclusões maiores;
- Aumento da turbulência.

Como já comentado anteriormente, estes são fatores que influenciam diretamente na dinâmica de remoção das inclusões.

3.5.8. INFLUÊNCIA DO TEMPO DE HOMOGENEIZAÇÃO

DEKKERS ⁽³⁴⁾, determinou a influência do tempo de homogeneização sobre o teor de oxigênio total, após a adição de Al no refino secundário. Os resultados podem ser visualizados na figura 3.16.

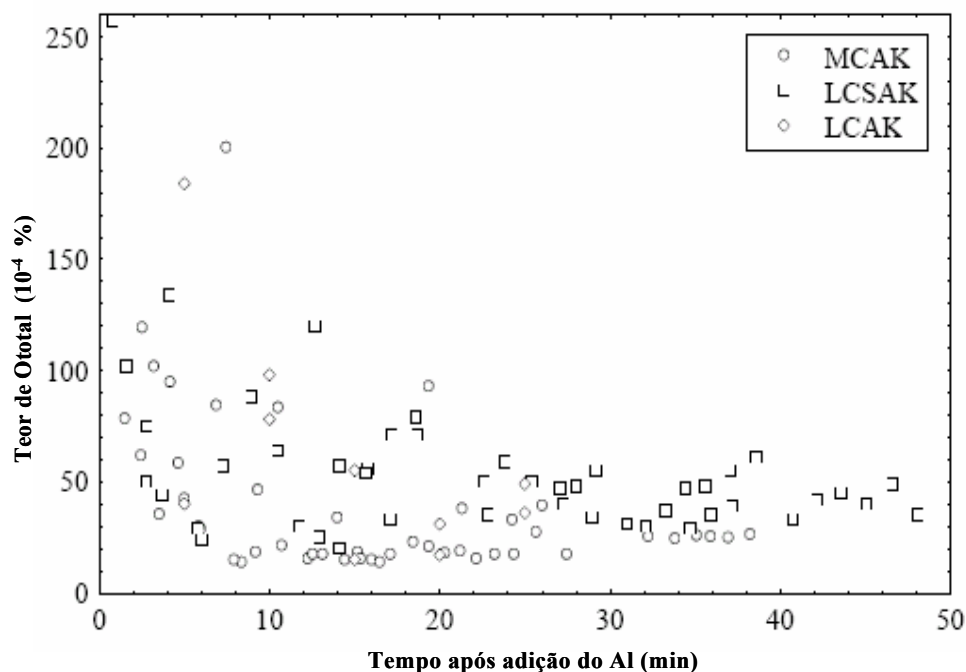


Figura 3.16 – Teor de O_{total} em aços LCSAK, MCAK e LCAK, DEKKERS ⁽³⁴⁾.

LCSAK – Aço baixo carbono acalmado ao Alumínio e Silício;

MCAK – Aço médio carbono acalmado ao Alumínio;

LCAK – Aço baixo carbono acalmado ao Alumínio.

Apesar da forte dispersão, pode ser percebido que tempos maiores que 10 minutos têm pouca influência na diminuição do teor de O_{total} .

SÖDER ⁽³⁵⁾ determinou o teor de O_{total} após a desoxidação de uma corrida processada em um forno elétrico (EAF). No início do experimento o teor de alumínio total foi de 0,007 (% em peso), após a primeira desoxidação no vazamento da corrida. Então uma escória sintética foi adicionada e um total de 65 kg de Al em fio foram injetados durante 7 minutos, até ser atingido um teor de Al total de 0,057%. Os resultados estão mostrados na figura 3.17. Pode ser percebido que o O_{total} se estabiliza após o fim da adição do Al em fio.

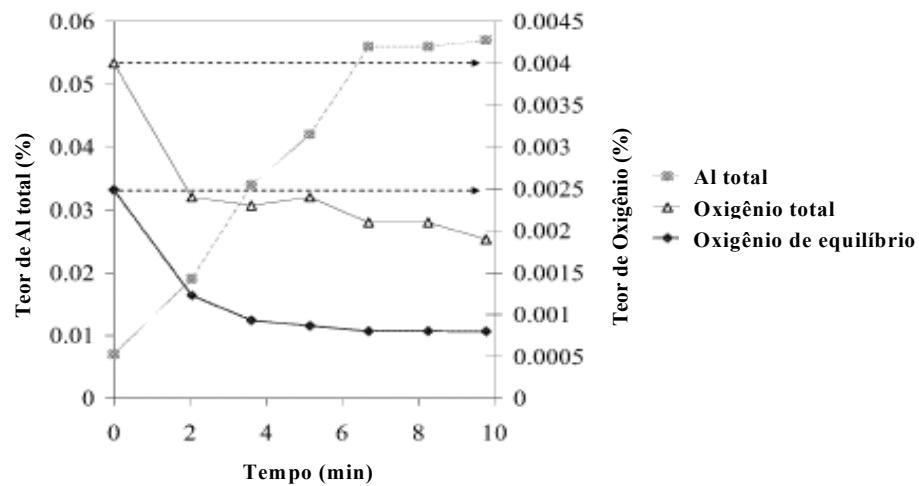


Figura 3.17 – Al total analisado, Oxigênio total e Oxigênio dissolvido calculado como função do tempo de homogeneização, SÖDER ⁽³⁵⁾.

AOKI et al. ⁽³⁶⁾, desenvolveu um modelo matemático tridimensional para determinar a evolução do O_{total} em uma panela com borbulhamento pelo fundo. A figura 3.18. mostra a evolução da concentração de oxigênio e a taxa de desoxidação k_0 , em relação ao tempo de borbulhamento.

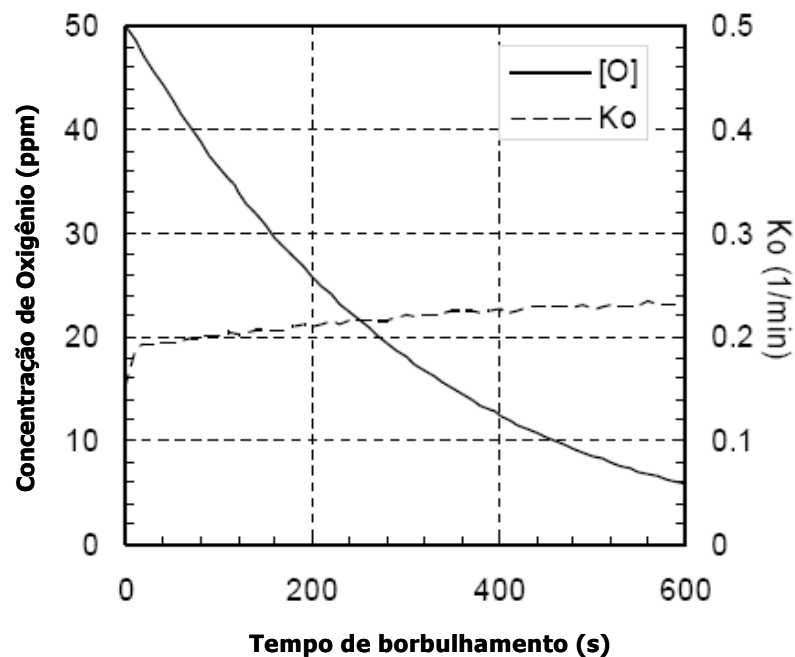


Figura 3.18 – Concentração de oxigênio e taxa de desoxidação em função do tempo de borbulhamento, AOKI ⁽³⁶⁾.

A figura 3.19 compara o teor de oxigênio total entre os experimentos de ZHANG et al. ⁽⁴⁾, e os experimentos realizados por NAKANISHI ⁽⁴⁾, como pode ser percebido o decréscimo do O_{total} foi incremental após 400 s.

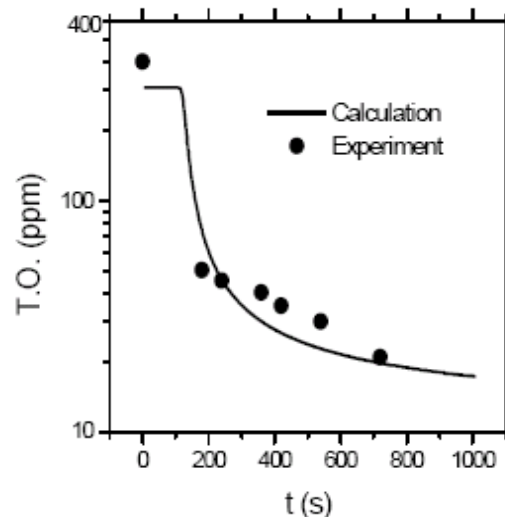


Figura 3.19 – Comparação do Oxigênio total calculado e real, NAKANISHI ⁽⁴⁾.

A figura 3.20 mostra como o O_{total} decresce com o tempo de degaseificação durante o tratamento no RH. O teor de O_{total} ao final do tratamento é praticamente o mesmo, independente do oxigênio de vazamento. Este experimento foi realizado por ZHANG et al. ⁽³⁾.

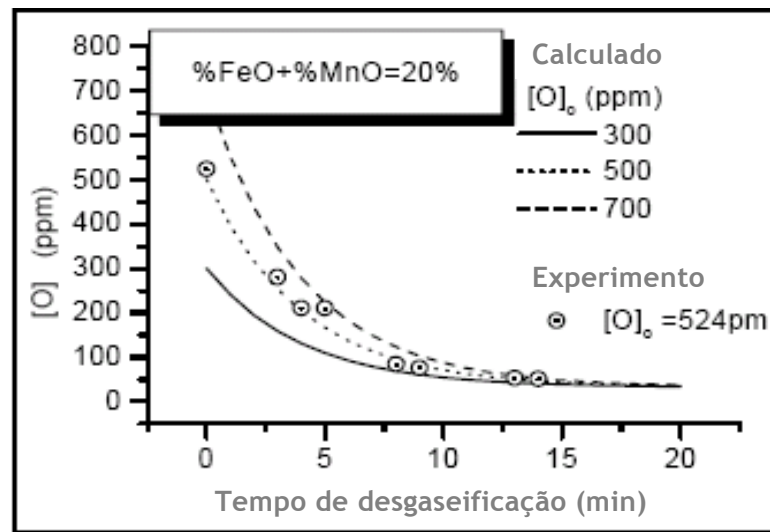


Figura 3.20 – Efeito do oxigênio de vazamento na diminuição do O_{total} durante a degaseificação no RH, ZHANG ⁽³⁾.

4. METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS

Algumas das principais características, ou condições típicas de processamento, do reator de degaseificação RH da CST Arcelor Brasil, são apresentadas na Tabela VI.

Tabela VI – Configurações básicas do RH da CST.

Item	Valores Referenciais
Diâmetro interno snorkel	750 mm
Imersão do snorkel	450 mm
Altura do snorkel	900 mm
Número de bicos de injeção de gás	16 bicos (dois níveis de injeção)
Vazão de injeção	2000 a 3000 NI/min
Taxa nominal de circulação	180 ton/min
Capacidade da panela	315 ton

De maneira a avaliar a cinética de choque-coalescimento-flotação de inclusões neste sistema uma série de procedimentos, descritos na sequência, foram adotadas:

- Avaliação da taxa de dissipação de energia como função de alguns dos parâmetros operacionais, a partir de um procedimento numérico;
- Construção de um modelo macroscópico de choque – coalescimento – flotação de inclusões, tendo como variável de entrada a taxa de dissipação de energia;
- Validação do modelo a partir de dados da evolução do oxigênio total e do conteúdo de inclusões

4.1 TEORES DE OXIGÊNIO OBTIDOS ATRAVÉS DE AMOSTRAGEM E ANÁLISE DE IMAGENS

Para validação dos resultados obtidos no modelo matemático, foram utilizadas as técnicas de análise de imagens (contagem e avaliação da distribuição das inclusões), via microscópio e medição do teor de O_{total} . As amostras de aço para análise ótica de imagens foram retiradas com coquilhas de aço 1020, (Figura 4.1), e as amostras para avaliação do % de O_{total} foram retiradas com amostradores especiais para este fim. Após a retirada das amostras com coquilha, as mesmas foram preparadas e enviadas para um laboratório de avaliação de imagens.

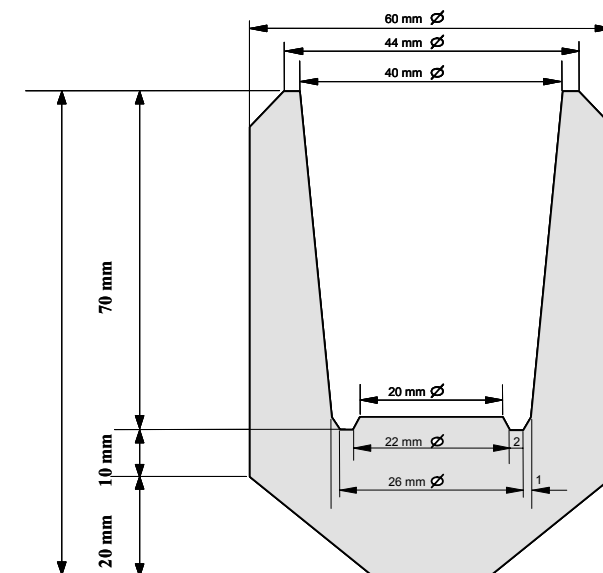


Figura 4.1 – Desenho esquemático da coquilha utilizada na CST.

4.1.1. PLANEJAMENTO DOS TESTES PARA AMOSTRAGEM

Realizar as amostragens de aço, na panela do desgaseificador, como se segue:

- 1) Utilizar corridas produzidas na rota, convertedores x refino secundário RH;
- 2) Amostrar corridas acalmadas ao alumínio estabilizadas com adição de titânio no RH;
- 3) Restringir ao aço com composição química dada na Tabela VII.

Tabela VII – Composição química dos aços utilizados para amostragem.

	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	N(ppm)	Ti (%)	Al (%)
Mínimo	-	-	0,07	-	-	-	0,035	0,015
Visado	0,0030	-	0,12	-	-	-	0,040	0,030
Máximo	0,0040	0,03	0,16	0,015	0,0080	35	0,045	0,045

- 4) Amostrar 04 corridas no RH (5 amostras por corrida), conforme os tempos abaixo listados, com amostrador do tipo coquilha de aço:

- 1º amostra: 1 min após a desoxidação da corrida com alumínio;
- 2º amostra: 3 min após a desoxidação da corrida com alumínio;
- 3º amostra: 6 min após a desoxidação da corrida com alumínio;
- 4º amostra: 8 min após a desoxidação da corrida com alumínio;
- 5º amostra: 10 min após a desoxidação da corrida com alumínio.

Retirar simultaneamente às amostragens com coquilha e amostras para avaliação do O total.

- 5) Considerar corridas com valores típicos de processo (devido às dificuldades de controle efetivo):
 - Vazão do gás de arraste : 2000~2500 NI/min;
 - Oxigênio solúvel no aço (antes da desoxidação da corrida): 350 a 650 ppm
 - Temperatura no momento da desoxidação: 1560 a 1590 °C;
 - Quantidade de Oxigênio para descarburização forçada: 0 a 200 Nm³
 - Teor de FeT da escória: < 8%;
 - Intervalo entre fim de vazamento e início de tratamento: 20 a 100 min.

4.2. ANÁLISE DO OXIGÊNIO TOTAL

O método utilizado para aquisição de amostras para análise do % de oxigênio total foi o amostrador tipo TOS “Total Oxygen Sampler”, do fornecedor Heraeus Electro-Nite.

O sistema de amostragem utiliza um sensor em forma de pino, o qual é imerso no aço líquido. O pino é preenchido através de um sistema de jato de argônio, de modo a obter-se uma amostra isenta de impurezas. A amostra então foi enviada ao laboratório, onde a mesma foi preparada para análise do O_{total} da corrida.

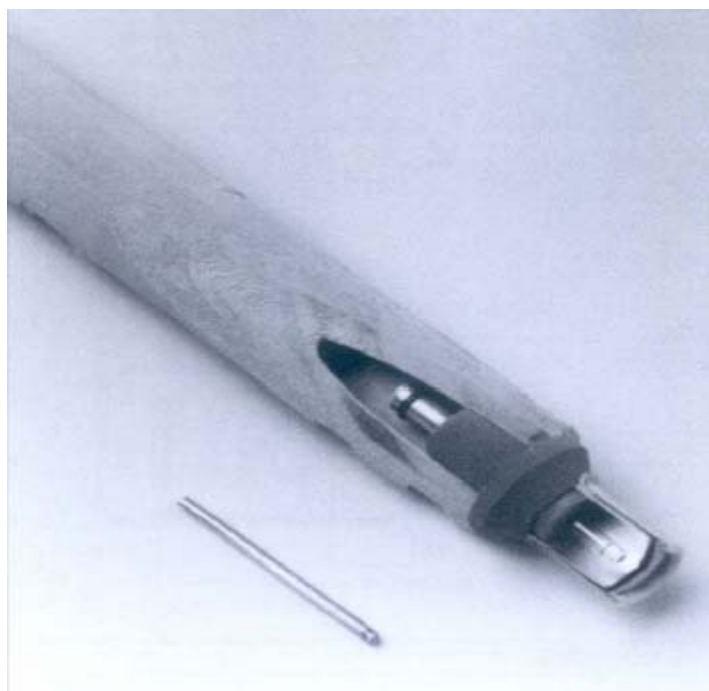


Figura 4. 2 – Amostrados TOS utilizado para amostragem e análise do O_{total} .

As amostragens para avaliação do oxigênio total foram realizadas com os mesmos tempos de referência usados para a amostragem para contagem de inclusões.

Os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela VIII.

Tabela VIII – Resultados (%) O_{total} medidos na CST.

Corrida	Tempo após desoxidação da corrida (s)				
	60	180	360	480	600
243222-1	0,0067	0,0069	0,0028	0,0026	0,0023
243221-8	0,0037	0,0016	0,0049	0,0022	0,0026
146305-7	0,0019		0,0022	0,0019	0,0023
244917-5		0,0055	0,0018	0,0024	

■ Amostras sem resultado. ■ Média de 03 resultados.

A principal dificuldade aqui encontrada foi a agilidade e destreza necessárias para sincronizar as duas amostragens, uma para análise de imagens e outra para avaliação do oxigênio total. Com os resultados obtidos foi construída uma curva para avaliação do desenvolvimento do teor de oxigênio total em relação ao tempo de homogeneização, após a desoxidação da corrida. Esta curva permite extrair uma correlação que descreve o comportamento da porcentagem de oxigênio total, vide Figura 4.3.

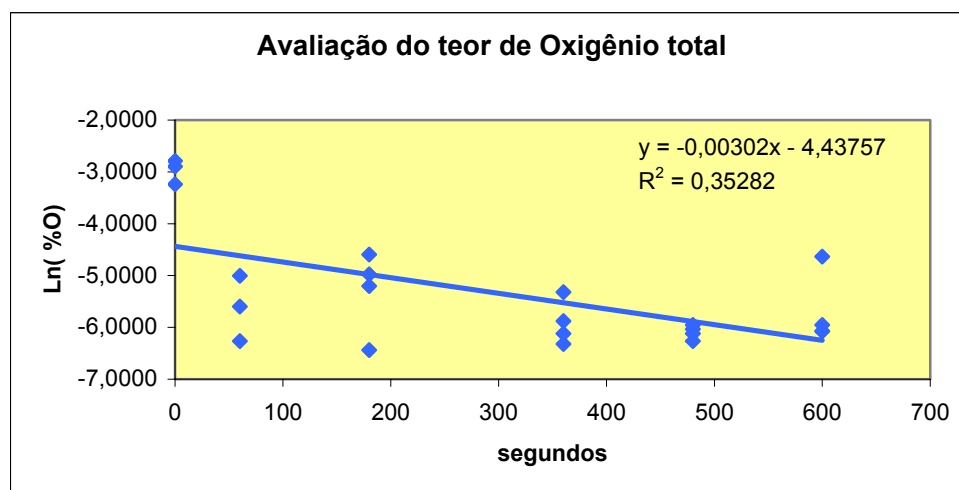


Figura 4.3 – Evolução do O_{total} em relação ao tempo de homogeneização no RH.

Entretanto, como pode ser visualizado na figura 4.3, não foi possível atingir um coeficiente de correlação razoável, ao se considerar uma única curva capaz de explicar dados referentes a tempos curtos e tempos longos de circulação. Deste modo se procurou um ajuste por trechos, o que resultou em:

$t < 60$ segundos

$$O = 0,050937 e^{-0,03486 t} \quad R^2 = 1 \quad (49)$$

$t > 60$ segundos

$$O = 0,00715 e^{-0,00214 t} \quad R^2 = 0,85 \quad (50)$$

Os resultados são apresentados na figura 4.4 e sugerem, como exposto anteriormente, a atuação de um processo de choque-coalescimento-flotação de inclusões bastante efetivo nos períodos iniciais de circulação, onde a concentração de inclusões é ainda significativa.

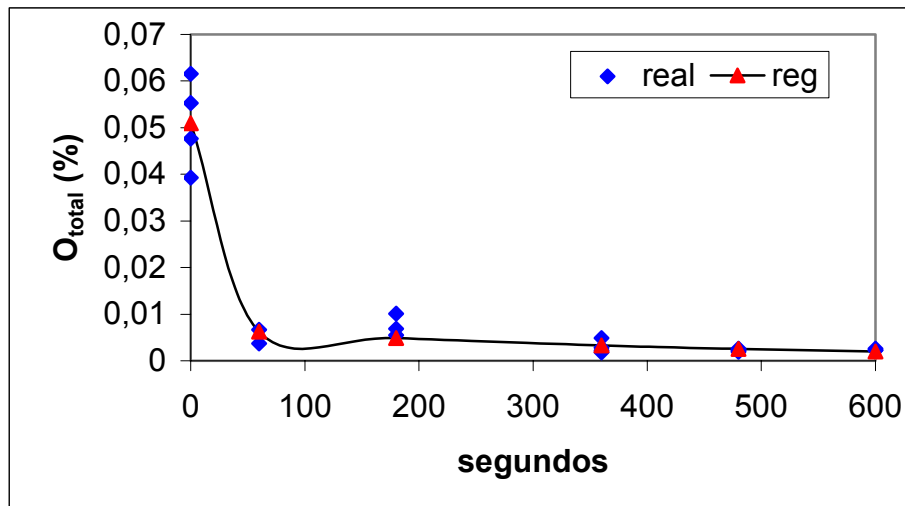


Figura 4.4 – Evolução do O_{total} em relação ao tempo de homogeneização do RH (Ajustada).

4.3. ANÁLISE ÓPTICA DAS IMAGENS

A análise ótica das inclusões visualizadas sobre as seções polidas das amostras seguiu o método de YAWATA ⁽²⁵⁾. Consideraram-se então as formas e as cores exemplificadas na figura 4.5. A metodologia original separa as inclusões de acordo com as faixas seguintes de tamanho : 10 μ m a 20 μ m; 20 μ m a 40 μ m; 40 μ m a 100 μ m; 100 μ m a 400 μ m e maiores do que 400 μ m, sendo que aquelas menores que 10 μ m são desprezadas.

As inclusões são então agrupadas de acordo com o tipo :

- ✓ Alumina (inclusões de cor escura e pode apresentar variadas morfologias);
- ✓ Globulares (todas as inclusões de formato circular);
- ✓ Clusters (agrupamentos de quatro ou mais inclusões próximas entre si);
- ✓ Outros (inclusões que não se enquadram em nenhuma das demais categorias).

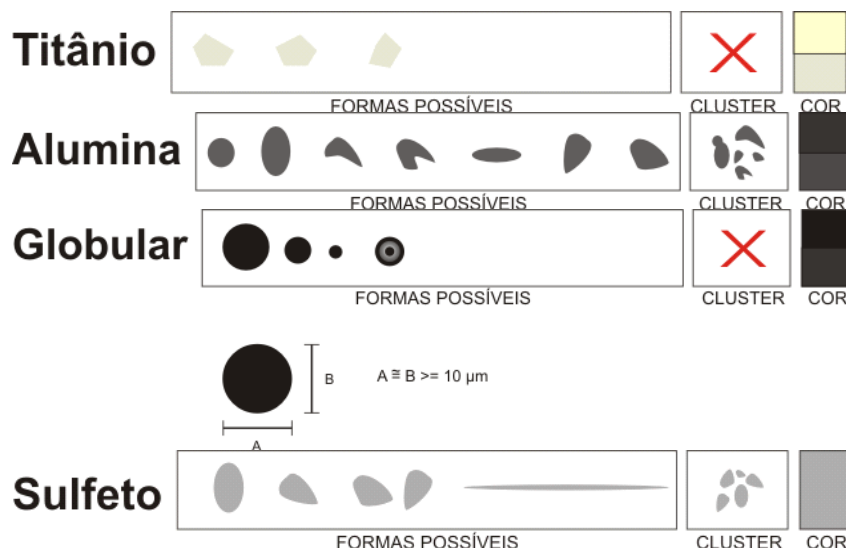


Figura 4.5 – Padrões de classificação das inclusões segundo YAWATA.

Os *clusters* são subdivididos em dois grupos: os de alumina (inclusões escuras) e os de sulfeto (cinza claro).

Neste trabalho o foco foi as inclusões de ALUMINA, sendo que os outros tipos foram colocados em um grande grupo denominado OUTROS + GLOBULARES. O número de classes foi aumentado para permitir melhor comparação com o software desenvolvido e a amplitude das classes diminuída.

4.3.1. PROCEDIMENTOS PARA CLASSIFICAÇÃO DAS INCLUSÕES

Utilizou-se o sistema comercial de aquisição e análise de imagens IMAGO[®] (26), operacionalizado pela ESSS (27). A descrição a seguir se concentra apenas na definição e descrição dos critérios utilizados para identificação de inclusões de alumina. Detalhes adicionais podem ser conseguidos junto ao fornecedor.

Após o recebimento e preparação, realizou-se aquisição de um conjunto de 40 imagens de cada amostra através do uso de um microscópio ótico do modelo OLYMPUS BX41M, com ampliação de 100x. Estas imagens foram adquiridas através de uma câmera digital MOTICAM 1300, utilizando uma imagem de dimensões iguais a 1280x1024 pixels e no formato de arquivo TIFF (sem compressão), com escala de cinza (cada pixel tem valores entre o gradiente 0 [preto] e 255 [branco]). Isto foi realizado desta maneira para se obter o máximo de resolução possível por pixel.

As imagens foram adquiridas utilizando o procedimento mostrado na figura 4.6, onde os quadros azuis representam as imagens obtidas e a numeração mostra a seqüência da aquisição. As posições de aquisição não seguiram posições absolutas, ou seja, existe um pouco de aleatoriedade na aquisição, mesmo preservando o alinhamento como sugerido na imagem.

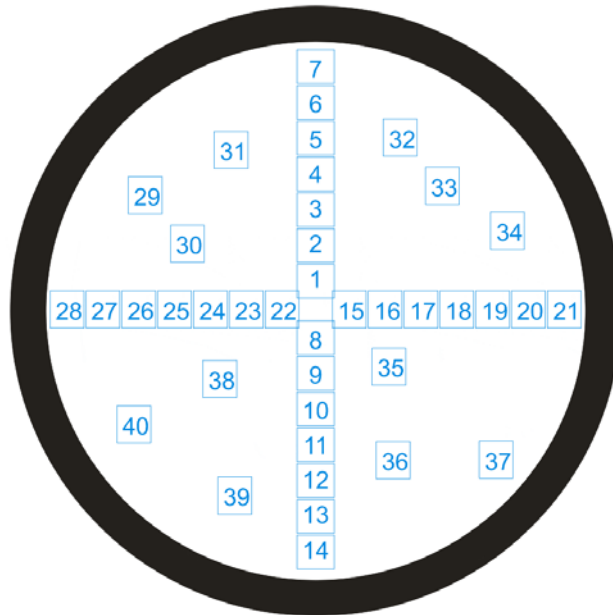


Figura 4. 6 – Padrão de coleta das imagens em cada amostra.

Um exemplo de imagem adquirida nestas condições é mostrado na Figura 4.7.



Figura 4. 7 – Exemplo de imagem adquirida nas amostras da CST.

Após a aquisição foi realizada a etapa de pré-processamento, onde as imagens foram tratadas, visando melhorar contrastes e eliminar algum distúrbio que afetaria a análise. Porém, nesta etapa não se realizou nenhuma intervenção direta sobre as imagens, por exemplo com ferramentas de edição removendo campos específicos da imagem.

Por tanto foram processadas 40 imagens por amostra, seguindo o padrão de aquisição exposto, totalizando cerca de 800 imagens. Todas foram identificadas com o nome da amostra para uma futura avaliação individual, bem como para alguma análise pontual.

Em seqüência utilizou-se um conjunto de filtros e procedimentos para se obter os dados necessários a análise das inclusões:

- a. Para a separação das inclusões empregou-se o filtro denominado Limiar Adaptativo de Bernsen, o qual consiste em calcular o limiar para cada pixel utilizando a sua vizinhança, o que elimina problemas de variação de tons de cinza provocados por iluminação incorreta, bem como provocados pela pequena diferença de tonalidade entre inclusões. Esta separação produziu imagens binárias, onde pixel branco é inclusão e preto é a matriz.
- b. Para se fazer uma análise pontual sobre cada inclusão, permitindo separá-las por tipo, cada uma delas foi rotulada (identificada).
- c. Com os objetos devidamente identificados e definidos, utilizou-se o processo de Fatores de Forma do IMAGO[®] para fazer o levantamento das características geométricas que caracterizam cada inclusão.
- d. Para cada objeto rotulado foi realizado um cruzamento com a imagem original levantando-se as informações: Valor Médio, Máximo e Mínimo de tom de cinza. Este dado foi utilizado como orientação para a separação das inclusões quanto ao seu tipo.

4.3.2. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS ESTIMADAS PARA AS INCLUSÕES

O software IMAGO[®], para realizar as informações geométricas de cada objeto, utiliza a métrica D34, onde os pixels são percorridos de forma lateral, não permitindo a conexão diagonal dos mesmos. Ou seja, se o algoritmo que calcula a distância entre dois pontos for percorrer uma linha na diagonal, fará este caminho através de conexões laterais.

A referência de análise para estes fatores é uma matriz de pontos (pixels), onde o ponto

superior esquerdo é a coordenada $0x0$, conforme pode ser visto na figura 4.8. A partir desta referência foram realizadas todas as análises.

Um pixel é sempre um quadrado. A sua dimensão real é definida através de um processo de calibração onde se arbitra um valor real para o lado deste quadrado, neste caso $1,50527 \mu\text{m}$ de lado, ou $2,26584 \mu\text{m}^2$ de área.

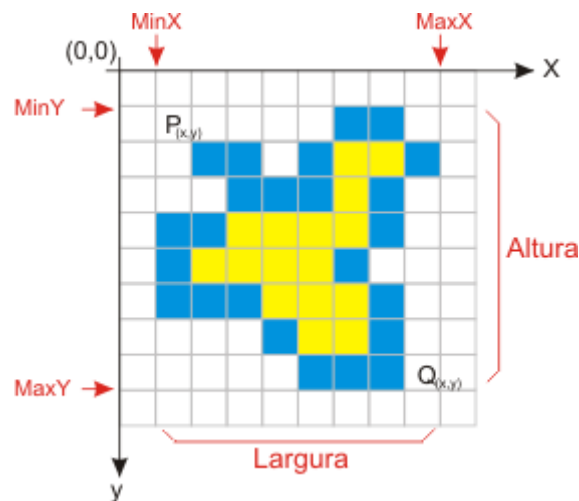


Figura 4. 8 – Exemplo de propriedades geométricas de um objeto.

Os parâmetros considerados nesta dissertação são descritos a seguir.

Área (A), Figura 4.9:

Número de pixels do objeto. É apenas a contagem de pontos brancos pertencentes a um objeto que já está previamente rotulado. Para esta análise os resultados serão dados em μm^2 .

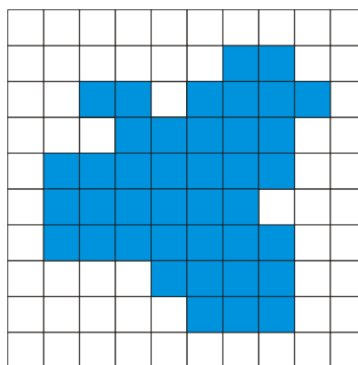


Figura 4. 9 – Exemplo de área de objeto.

Perímetro (P):

Número de pixels mais externos do objeto. Neste caso a utilização do padrão D34 sofre algumas modificações permitindo a análise real do perímetro, como pode ser visto na linha azul na imagem da Figura 4.10.

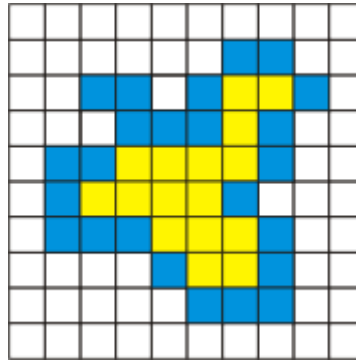


Figura 4.10 – Exemplo de perímetro de objeto.

Shape (SH) e Circularidade:

$$Sh = p^2 / 4\pi A$$

Para deixar este parâmetro adimensional, utilizamos o inverso dele, ou seja, $1/sh$, que resulta na fórmula da Circularidade:

$$Circularidade = 1/Sh$$

ou

$$Circularidade = 4\pi A / p^2$$

Sendo assim, quanto mais próximo de 1, mais próximo de um círculo perfeito será o objeto.

Raio Hidráulico (R_H):

O raio hidráulico é uma grandeza linear característica do escoamento, definida pelo quociente da área molhada pelo perímetro molhado da seção do escoamento.

$$R_H = A / p$$

Onde,

A é área do objeto

p é perímetro do objeto

4.3.3. CLASSIFICAÇÃO DAS INCLUSÕES

Empregou-se o método de YAWATA, onde se realiza uma separação por tamanho de objetos e posteriormente por tipo.

Como citado anteriormente foi realizada uma modificação no método de classificação por tamanho proposto por YAWATA. Os objetos foram separados nas seguintes classes:

- ✓ $0 \mu\text{m}^2$ até $10 \mu\text{m}^2$
- ✓ $10 \mu\text{m}^2$ a $30 \mu\text{m}^2$;
- ✓ $30 \mu\text{m}^2$ a $60 \mu\text{m}^2$;
- ✓ $60 \mu\text{m}^2$ a $90 \mu\text{m}^2$;
- ✓ $90 \mu\text{m}^2$ a $120 \mu\text{m}^2$;
- ✓ $120 \mu\text{m}^2$ a $150 \mu\text{m}^2$;
- ✓ $150 \mu\text{m}^2$ a $180 \mu\text{m}^2$;
- ✓ $180 \mu\text{m}^2$ a $210 \mu\text{m}^2$;
- ✓ $210 \mu\text{m}^2$ a $240 \mu\text{m}^2$;
- ✓ $240 \mu\text{m}^2$ a $270 \mu\text{m}^2$;
- ✓ $270 \mu\text{m}^2$ a $300 \mu\text{m}^2$;
- ✓ $300 \mu\text{m}^2$ a $400 \mu\text{m}^2$;
- ✓ Maiores que $400 \mu\text{m}^2$.

Seguindo o que foi estabelecido pelo método de YAWATA, foram descartados os objetos menores que $10 \mu\text{m}^2$ e maiores que $400 \mu\text{m}^2$. Isto porque na aquisição das imagens vários ruídos são adicionados à mesma. Estes ruídos provocam o surgimento de pequenos objetos (inclusões), que poderão não fazer parte do grupo real e válido de inclusões. Além disto, grandes objetos podem aparecer por diversos motivos associados à preparação da amostra, bem como a fatores que não estão associados às inclusões. Desta forma estes grupos são descartados nesta análise.

Já a classificação por tipo é muito mais subjetiva (menos direta), que a classificação por tamanho, e desta forma requer um refinamento em seus padrões de classificação. Objetivando uma simplificação das classificações por tipo, a análise foi realizada com a seguinte separação:

- ✓ Globulares
- ✓ Alumina
- ✓ Outros

A classificação de inclusões globulares foi baseada nos seguintes parâmetros obtidos sobre cada objeto da imagem:

Tabela IX – Parâmetros para classificação das inclusões globulares.

Propriedade	Fórmula	Peso
Área (μm^2)	Se Área for maior que $10 \mu\text{m}^2$ e menor ou igual a $400 \mu\text{m}^2$ retorna 1, senão 0. Esta propriedade é excludente, ou seja, se estiver fora destes patamares o objeto é excluído e o restante não é checado.	
Circularidade(Circ)	Se o módulo da diferença entre a Circularidade do objeto e 1 (circularidade de um círculo perfeito) for menor ou igual a 0,15 retorna 1, senão 0. Este valor tem peso 0,8 neste calculo.	80%
Cor	Se GRAY MED (tom de cinza médio) for menor ou igual a 125, retorna este valor em percentual.	20%

Desta forma, a soma dos valores multiplicados por seu peso fornece o percentual de proximidade do objeto com um modelo de inclusão globular. Como exemplo note-se na figura 4.11, o objeto globular mais abaixo, identificado pelo círculo vermelho. Este objeto é protótipo de inclusão globular, utilizado para a montagem da seqüência de classificação acima.



Figura 4. 11 – Modelo de identificação de inclusões nodulares.

A classificação de inclusões de alumina foi baseada na classificação das globulares, ou seja, verificou-se se que o objeto em questão não foi classificado como GLOBULAR. Se não foi classificado, utilizaram-se os parâmetros abaixo obtidos sobre cada objeto da imagem:

Tabela X – Parâmetros para classificação das inclusões de alumina.

Propriedade	Fórmula	Peso
Área (μm^2)	Se Área for maior que $10 \mu\text{m}^2$ e menor ou igual a $400 \mu\text{m}^2$ retorna 1, senão 0. Esta propriedade é excludente, ou seja, se estiver fora destes patamares o objeto é excluído e o restante não é checado.	
ALONG	Se ALONG for menor ou igual a 2 retorna 1, senão 0. ALONG representa a forma alongada do objeto, quanto maior, mais alongado e fino é o objeto. Foi utilizado um conjunto de inclusões de alumina para verificar o comportamento desta propriedade.	60%
Cor	Se GRAY MED (tom de cinza médio) for menor que 125, retorna este valor dividido por 125.	40%

Desta forma, a soma dos valores multiplicados por seu peso fornece o percentual de proximidade do objeto com um modelo de inclusão tipo Alumina.

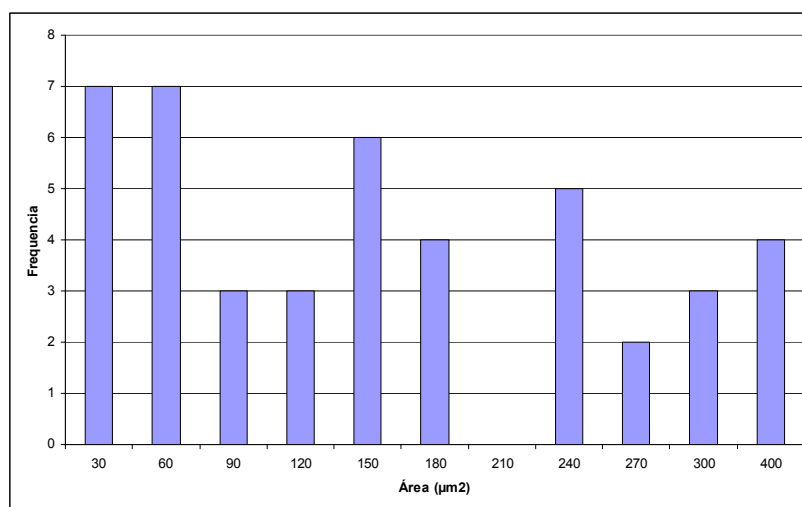
Todos os outros objetos que apresentaram probabilidade nula de ser Globular ou Alumina foram considerados da classe OUTROS.

Um exemplo dos resultados é apresentado na Tabela XI, a qual corresponde a uma amostra retirada após 1 minuto de circulação.

Tabela XI – Exemplo dos resultados obtidos no IMAGO.

Corrida	Amostra	Área	Perímetro	Shape	Circularidade	Raio Hidráulico	Globulares	Alumina	Outros
243222-1	1AM	80	46,5208	2,15276	0,464519965	1,71966	0%	0%	100%
243222-1	1AM	8	12,9853	1,67727	0,596206932	0,616082	0%	60%	40%
243222-1	1AM	1	2,82843	0,63662	1,570795765	0,353553	0%	0%	100%
243222-1	1AM	3	5,53553	0,812808	1,230302851	0,541953	0%	0%	100%
243222-1	1AM	78	55,9914	3,19844	0,312652418	1,39307	0%	0%	100%
243222-1	1AM	8	13,864	1,91194	0,523028965	0,577036	0%	60%	40%
243222-1	1AM	5	9,44975	1,42122	0,703620833	0,529115	0%	60%	40%
243222-1	1AM	27	19,3137	1,09941	0,909578774	1,39797	99%	0%	1%
243222-1	1AM	96	38,3848	1,22134	0,818772823	2,50099	16%	92%	8%
243222-1	1AM	8	10,4853	1,0936	0,914411119	0,762974	80%	0%	20%
243222-1	1AM	1	2,82843	0,63662	1,570795765	0,353553	0%	0%	100%
243222-1	1AM	8	15,364	2,34805	0,425885309	0,520699	0%	60%	40%
243222-1	1AM	97	52,0772	2,22491	0,449456383	1,86262	0%	0%	100%
243222-1	1AM	55	36,8492	1,96465	0,508996513	1,49257	18%	37%	45%
243222-1	1AM	69	32,7279	1,23532	0,809506848	2,10829	17%	95%	12%
243222-1	1AM	65	33,3492	1,3616	0,734430082	1,94907	18%	96%	14%
243222-1	1AM	26	19,3137	1,14169	0,875894507	1,34619	93%	0%	7%
243222-1	1AM	71	48,7487	2,66354	0,375440204	1,45645	0%	0%	100%
243222-1	1AM	9	12,2426	1,32525	0,754574609	0,735136	0%	60%	40%
243222-1	1AM	9	11,7782	1,2266	0,815261699	0,764125	0%	60%	40%

Os resultados são apresentados nas Figuras 4.12 a 4.16, na forma de histogramas que descrevem a distribuição das inclusões de alumina. A maioria das inclusões são menores que 90 μm , sendo que a maioria absoluta é menor que 60 μm .

**Figura 4. 12** – Resultados da análise de imagens (após 60 segundos), com o IMAGO®.

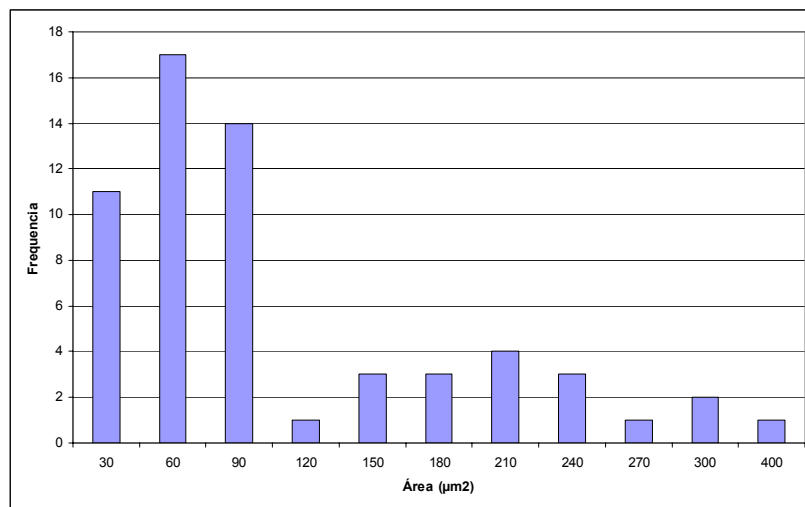


Figura 4. 13 – Resultados da análise de imagens (após 180 segundos), com o IMAGO®.

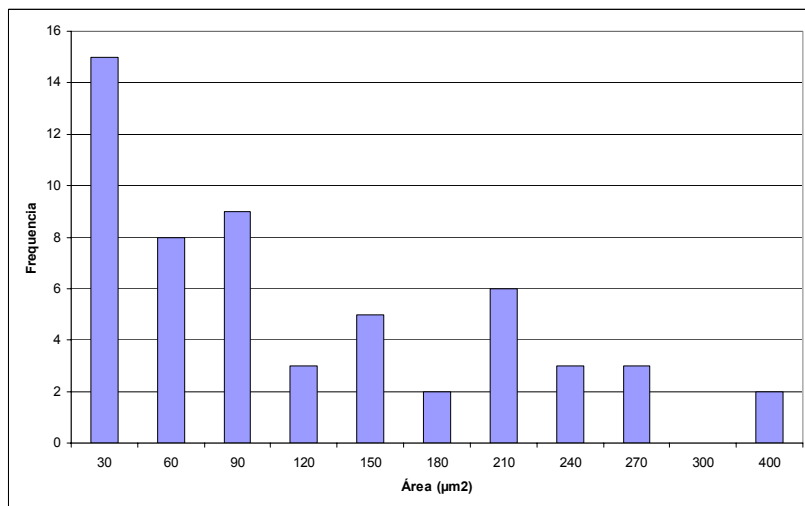


Figura 4. 14 – Resultados da análise de imagens (após 360 segundos) com o IMAGO®.

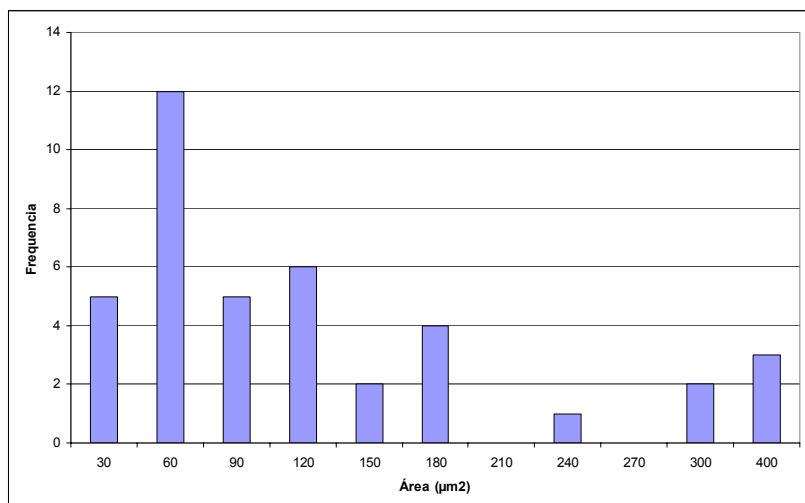
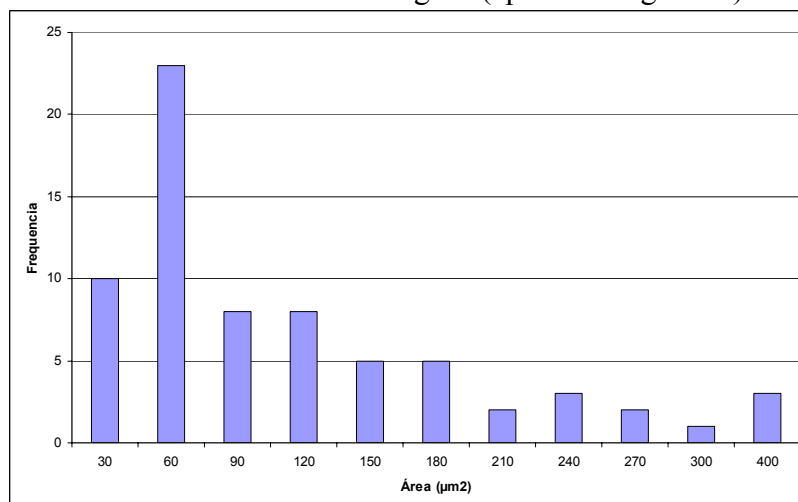
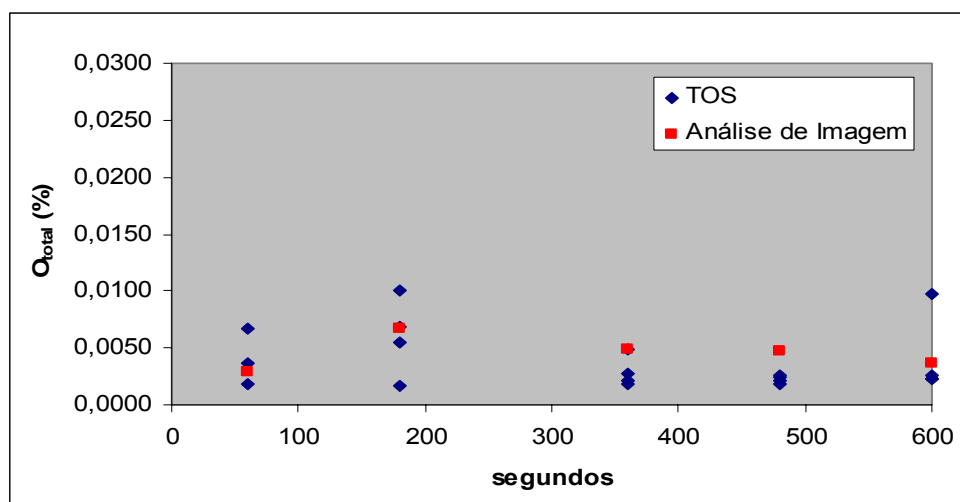


Figura 4. 15 – Resultados da análise de imagens (após 480 segundos) com o IMAGO®.**Figura 4. 16** – Resultados da análise de imagens (após 600 segundos) com o IMAGO®.

A fração de área coberta por inclusões, tal como estimada pelo IMAGO, pode ser diretamente relacionada à fração volumétrica de inclusões na amostra. Daí se torna possível correlacionar a área das inclusões de alumina e o % de O_{total} . Como pode ser visualizado na figura 4.17, os resultados obtidos através da análise química (amostragem via TOS), apresentam boa concordância com os resultados obtidos via análise de imagens e, juntos, apontam para a estabilização dos teores totais de oxigênio após 1 minuto, nestes experimentos.

**Figura 4. 17** – Resultados O_{total} Análise de imagens x Medição da análise química (TOS).

Entretanto os resultados referentes a 60 segundos são ligeiramente inferiores aos obtidos pelo análise química. Isso se deve ao fato de que as inclusões menores que $10\ \mu\text{m}$ são descartadas, método de YAWATA, aliado ao fato da dificuldade de se mensurar com precisão o nº de

inclusões 1 minuto após a adição de alumínio.

4.4 DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO NUMÉRICO - CFX

Modelos numéricos para a solução de problemas envolvendo mecânica dos fluidos devem descrever os aspectos mais importantes da física do problema real. Neste trabalho, de maneira a reduzir os custos computacionais, optou-se por considerar o domínio de cálculo exposto na figura 4.18, o qual inclui o reator e o snorkel e não a região acima, onde está a câmara de vácuo. A malha de integração está exposta na Figura 4.19, sendo neste trabalho empregada uma malha com aproximadamente 200.000 nós.

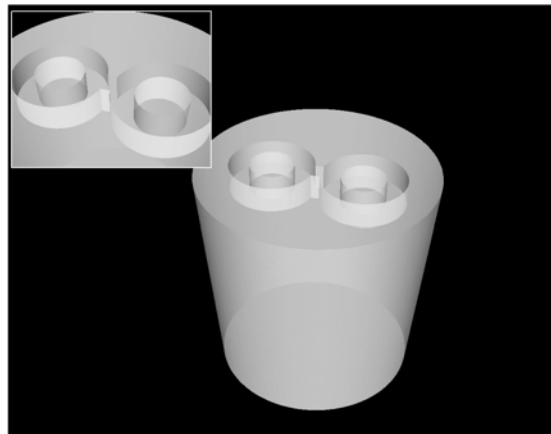


Figura 4. 18 – Domínio de cálculo.

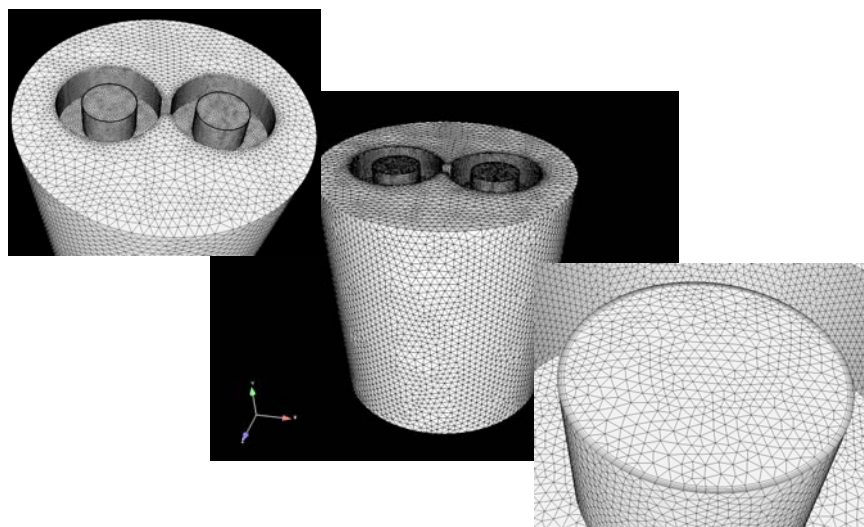


Figura 4. 19 – Malha tetraédrica utilizada no CFX.

4.4.1. EQUAÇÕES GOVERNANTES DO ESCOAMENTO

Escoamentos de fluidos podem ser descritos regidos pelas equações de Navier-Stokes, mas a extrema complexidade (devida à não-linearidade) destas equações impossibilita, até mesmo para casos simples, a obtenção de uma solução com os recursos computacionais atualmente disponíveis, se uma simulação considerando todas as escalas espaciais e temporais (transientes) for desejada. Este seria o caso do fluxo neste sistema, que sendo turbulento é inerentemente transiente. Portanto empregou-se o tratamento padrão, que descreve o fluxo a partir das equações de Continuidade e de Navier-Stokes com valores médios no tempo, conhecidas como *Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations* (RANS) , acopladas a um modelo de turbulência. Ainda de acordo com este tratamento, tomando-se a média das equações de Navier-Stokes surge um novo termo, conhecido por tensor de Reynolds, que carrega as características turbulentas e transitórias do escoamento. Uma das metodologias mais usuais consiste em modelar este tensor a partir das variáveis k (energia cinética turbulenta) e ε (taxa de dissipação turbulenta).

A equação da continuidade, em regime permanente e considerando o aço como fluido incompressível, é dada por:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = S_{massa} \quad (20)$$

Onde, \mathbf{V} é o vetor velocidade médio $\{V_x, V_y, V_z\}$ e o termo S_{massa} representa o termo fonte de geração ou retirada de massa, neste caso nulo.

A equação de conservação da quantidade de movimento é dada por:

$$\nabla \cdot ((\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V})) = \nabla \cdot (\mu_{eff} (\nabla \mathbf{V} + (\nabla)^T)) - \nabla \mathbf{p} + S_{QM} \quad (21)$$

Onde, ρ é a densidade, \mathbf{p} é a pressão, e $S_{QM} = \{S_{QM_x}, S_{QM_y}, S_{QM_z}\}$ é o termo fonte de geração de quantidade de movimento.

Para a solução dos parâmetros turbulentos k e ε da fase líquida é utilizado o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ padrão. As equações de transporte para a fase líquida são:

$$\nabla((\rho\mathbf{KV})) = \nabla\left(\left(\mu_0 + \frac{\mu_t}{Pr_K}\right)\nabla\mathbf{K}\right) + \Phi - \rho\varepsilon \quad (22)$$

$$\nabla((\rho\varepsilon\mathbf{V})) = \nabla\left(\left(\mu_0 + \frac{\mu_t}{Pr_\varepsilon}\right)\nabla\varepsilon\right) + C_1\frac{\varepsilon}{\mathbf{K}}\Phi + C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{\mathbf{K}} \quad (23)$$

Onde, $\Phi_{aço}$ é definido como:

$$\Phi = \mu_{eff}\nabla\nabla(\nabla\mathbf{V} + (\nabla\mathbf{V})^T) - \frac{2}{3}\nabla\cdot\mathbf{V}(\mu_{eff}\nabla\cdot\mathbf{V} + \rho\mathbf{K}) \quad (24)$$

E a viscosidade efetiva μ_{eff} é:

$$\mu_{eff} = \mu_0 + \mu_t \quad (25)$$

Onde, μ_0 é a viscosidade molecular e μ_t é calculado a partir dos parâmetros turbulentos:

$$\mu_t = C_\mu\rho\frac{K^2}{\varepsilon} \quad (26)$$

Maiores detalhes da formulação matemática podem ser encontrados no Manual do CFX ⁽⁴⁸⁾.

4.4.2. CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para o fechamento do problema numérico descrito acima é necessário ainda definir as condições de contorno para cada fronteira do domínio. A seguir, cada uma destas condições é descrita em detalhe.

Nas paredes do reator, panela e snorkels, se aplicou a condição de não-deslizamento. Nestas regiões, Figura 4.20, $\mathbf{V}_x, \mathbf{V}_y, \mathbf{V}_z = 0$.



Figura 4.20 – Regiões com condição de contorno de parede.

Devido ao modelo de turbulência utilizado, se fez necessário definir o perfil de velocidade junto à parede. Este é calculado utilizando um modelo padrão de lei de parede (Law of Wall) para regime turbulento, que permite o emprego de malhas não tão refinadas, possibilitando uma diminuição do custo computacional.

A condição real no topo (ver figura 4.21), é um pouco mais complexa, pois aí se encontra a camada de escória. Além disso, em algumas situações, pode haver um intenso movimento turbulento devido à superfície livre. Foi empregada uma condição assumindo a tensão de cisalhamento nula.



Figura 4.21 – Região do topo do reator.

De modo a tornar mais realística a computação numérica se faz necessário especificar os valores de K e ε na entrada da panela, isto é, no plano de entrada correspondente ao snorkel, Figura 4.22.

AJMANI et al. ⁽²⁸⁾, considerou energia cinética (k) e taxa de dissipação de energia (ε), conforme as fórmulas seguintes:

$$k = \frac{1}{2} (0,02 \times \text{velocidade snorkel de subida})^2 \quad (27)$$

$$\varepsilon = \frac{0,09 k^2}{10 \times \text{Viscosidade cinemática la min ar}} \quad (28)$$

Neste trabalho empregou-se na entrada do reator valores de $k = 0,00942 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ e de $\varepsilon = 0,00243 \text{ cm}^2/\text{s}^3$, para todas as simulações.

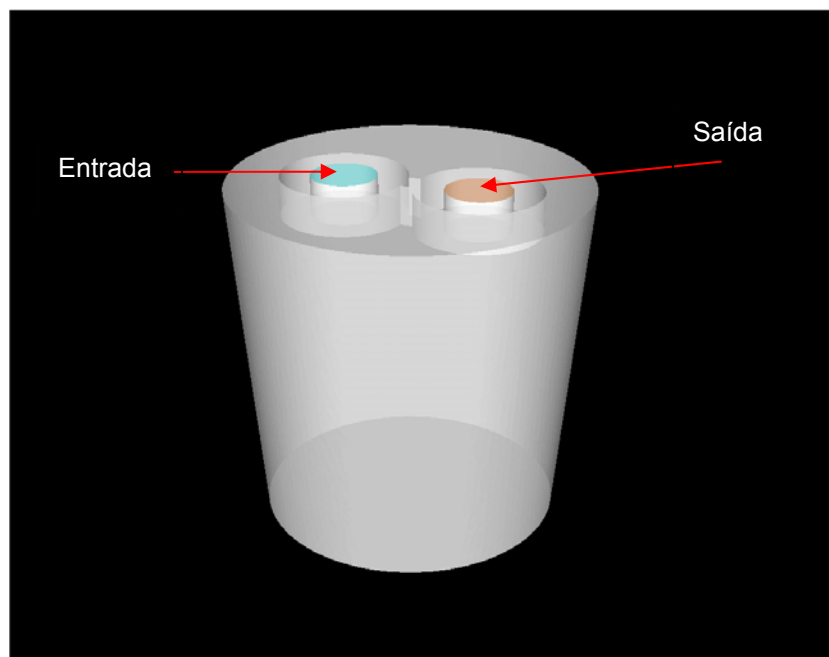


Figura 4.22 – Região de entrada e saída do Aço.

4.5. DETERMINAÇÃO DA TAXA DE DISSIPACÃO DE ENERGIA

O conteúdo de inclusões em um aço liberado no sistema de desgaseificação e enviado ao lingotamento contínuo depende do tempo de circulação após a adição do desoxidante. Por outro lado um fator limitante para o aumento do tempo de circulação no desgaseificador RH é o curto tempo disponível entre o tratamento no RH e o início do lingotamento contínuo.

Conforme discutido, a energia de misturamento do aço (expressa através da taxa de dissipação de energia) é o principal fator para controle da remoção das inclusões do aço, por ser responsável pelo coalescimento e crescimento das mesmas. De fato é de fácil demonstração que num sistema de mistura perfeita, a lei de decaimento do número de inclusões ao longo do tempo seria da forma exponencial, na ausência do fenômeno de choque e coalescimento. O coalescimento seguido do crescimento é o que permite a aceleração do processo de separação de inclusões, o que, como se verá, justifica a importância de se avaliar a taxa de dissipação de energia .

Para tanto foi desenvolvido o modelo matemático tridimensional (descrito na seção anterior), para simulação do escoamento turbulento do aço líquido na panela do desgaseificador RH, com o intuito de avaliar a taxa de dissipação de energia (ϵ).

4.5.1. VALORES DE TAXA DE DISSIPACÃO DE ENERGIA

As Figuras 4.23, 4.24 e 4.25, apresentam mapas de contorno (ou de intensidade) mostrando a distribuição espacial deste parâmetro no interior da panela, conforme calculado via CFX. Os dados apresentados são específicos para a temperatura de 1600 °C, 315 toneladas de aço, pernas com diâmetro interno de 0,75 m e profundidade de imersão igual a 0,45 m. Para outras condições a forma da distribuição não se altera substancialmente.

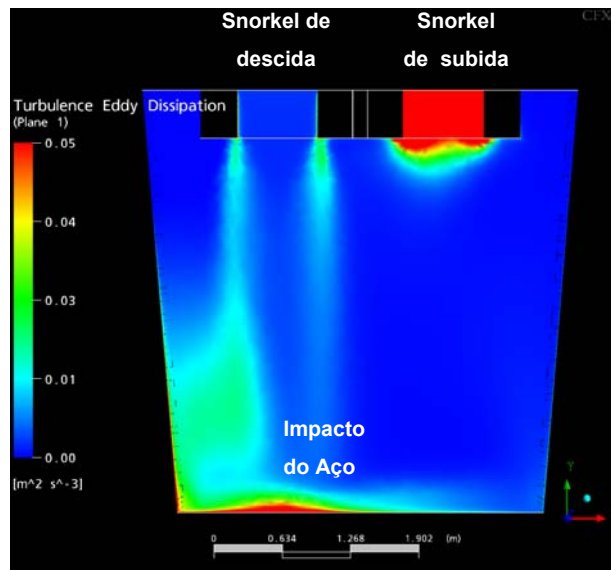


Figura 4.23 – Taxa de dissipação de energia , corte vertical coincidente com plano médio das pernas (Caso 01 – tabela VII).

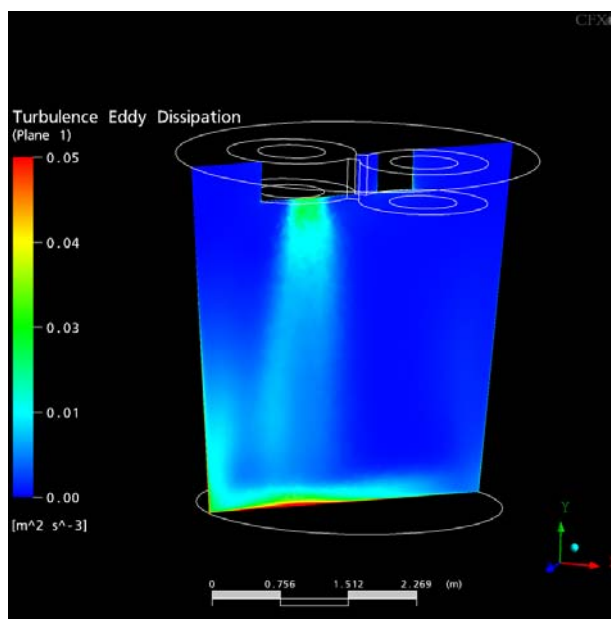


Figura 4.24 – Taxa de dissipação de energia – Corte vertical a 45 graus do plano médio das pernas (Caso 01 – tabela VII).

Observa-se que a taxa de dissipação é maior no snorkel de subida , na saída do snorkel de descida e no fundo da panela, onde ocorre o impacto do jato de aço ao fundo da panela. Estes valores nos levam a deduzir que as maiores taxas de coalescimento ocorrem nestas regiões. Já as outras regiões, representadas pela cor azul, são onde as condições para flotação são mais favoráveis. Observe também que seria razoável assumir uma distribuição quase uniforme desta variável ao longo do volume da panela.

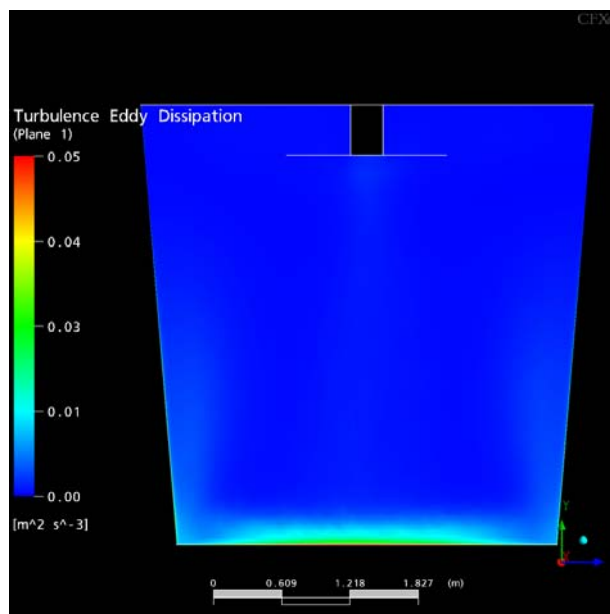


Figura 4. 25 – Taxa de Dissipação de Energia – Corte Vertical a 90 graus do plano médio das Pernas (Caso 01 – Tabela VII).

A tabela XII resume as condições operacionais ensaiadas e os valores médios (volumétricos) encontrados.

Tabela XII – Valores médios de taxa de dissipação de energia, parâmetros típicos da CST

	Diametro Snorkel subida (mm)	Diametro Snorkel descida (mm)	Vazão (t/min)	Temperatura (°C)	Epsilon médio (m^2/s^3)
Caso 1	750	750	180	1600	0,00395
Caso 2	750	750	220	1600	0,00726
Caso 3	750	750	180	1650	0,00388
Caso 4	800	800	180	1600	0,00312
Caso 5	800	800	220	1600	0,00547
Caso 6	800	800	180	1650	0,00315
Caso 7	750	750	220	1650	0,00680
Caso 8	800	800	220	1650	0,00559
Caso 9	750	800	180	1600	0,00319
Caso 10	750	800	180	1650	0,00330
Caso 11	750	800	220	1600	0,00608
Caso 12	750	800	220	1650	0,00608

Os resultados sugerem que a influência da temperatura (que atua sobre a massa específica e sobre a viscosidade), é mínima e que o maior efeito provém da taxa de circulação.

De fato uma regressão passo a passo fornece (MINITAB):

Stepwise Regression: Epsilon [m²/s³] versus Diâmetro snorkel subida [m], Diâmetro snorkel descida [m], Taxa de circulação [ton/min], Temperatura do aço [°C] .

Alpha-to-Enter: 0.15 Alpha-to-Remove: 0.15

Step	1	2	3
Constant	-0.009094	0.006226	0.008714
Circ.[ton/min]	0.00696	0.00696	0.00696
T-Value	8.59	18.63	22.05
P-Value	0.000	0.000	0.000
Snorkel.sub[m]		-0.0196	-0.0162
T-Value		-6.17	-5.25
P-Value		0.000	0.001
Snorkel.desc[m]			-0.0066
T-Value			-2.15
P-Value			0.064
S	0.000561	0.000259	0.000219
R-Sq	88.06	97.72	98.55
R-Sq(adj)	86.86	97.21	98.01
C-p	50.7	5.2	3.1

Portanto,

$$\varepsilon[\text{m}^2/\text{s}^3] = 0,008714 + 0,00696 \frac{Q}{100} - 0,0162 S - 0,0066 D \quad (29)$$

Onde, Q é a vazão (ton/ min), S é o diâmetro do Snorkel de subida (m), e D o diâmetro do snorkel de descida (m).

Vale ressaltar, no entanto, que de acordo com a implementação numérica adotada para o CFX⁽²⁹⁾, estas variáveis foram tratadas como dados de entrada independentes. Sabe-se que mantida a geometria do sistema (diâmetro das pernas), a taxa de circulação aumenta com o aumento da vazão de gás desde que a fração volumétrica do mesmo na perna não exceda um valor crítico que impeça o bombeamento eficiente de líquido. Por outro lado para um dado diâmetro de perna de subida vazões insuficientes de gás podem implicar em baixa penetração do mesmo a partir do bico das ventaneiras, fluxo periférico de gás e até mesmo recirculação de líquido na região central, conforme exemplificado em SILVA et al. ⁽³⁰⁾. Por outro lado, como se pode notar em SESHADRI et al. ⁽³¹⁾, uma prática possível de ser adotada, para se obter aumentos na taxa de circulação, seria manter a vazão e o diâmetro da perna de subida e aumentar o diâmetro da perna de descida. Em experimentos específicos realizados com um modelo de desgaseificador da CST se determinou ganhos de até 10% na taxa de circulação, quando o diâmetro da perna de descida foi aumentado de 725 a 900 mm, a depender da faixa de vazão de gás.

VARGAS et al. ⁽³²⁾ determinou a influência da variação do diâmetro dos snorkels do RH, através de um modelo físico, na taxa de circulação do aço. O modelo reproduzia as condições típicas do desgaseificador da CST. Alguns resultados experimentais são apresentados na figura 4.26, e exemplificam como a taxa de circulação pode ser influenciada pelo aumento do diâmetro das pernas.

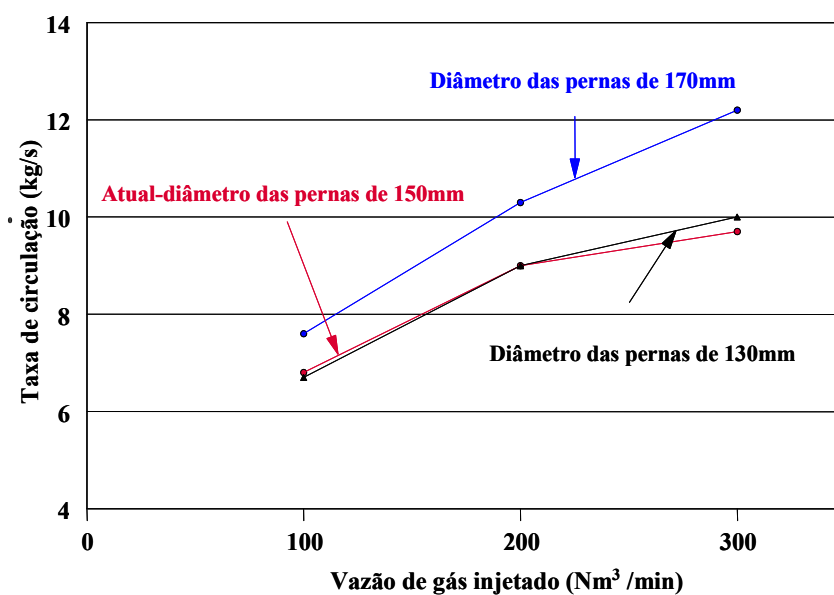


Figura 4.26 – Evolução da taxa de circulação com a vazão de gás injetado, VARGAS ⁽³²⁾.

Deste modo, determinar a influência do diâmetro das pernas na taxa de dissipação de energia implica também em avaliar o efeito deste parâmetro sobre a velocidade de circulação.

SZEKELY et al. ⁽³³⁾ realizaram modelamento matemático do sistema de desgaseificação RH com o intuito de estimar a velocidade de separação de inclusões, após choque e coalescimento das mesmas. Adotaram uma malha de integração bi-dimensional, desconsideraram a câmara de vácuo e a imersão dos snorkels, de modo a determinar a distribuição da taxa de dissipação de energia na panela. Os valores de taxa de dissipação foram gerados pelo modelo de turbulência $k - \varepsilon$ e alimentados ao modelo de choque e coalescimento de SAFFMAN&TURNER. Um procedimento padrão de diferença finita foi aplicado para calcular o campo de velocidade. Uma malha integração por diferenças finitas de 18 x 15 foi usada e um cálculo típico requereu 180 segundos, num computador digital IBM 370/168 do MIT (Massachusetts Institute of Technology).

Para o caso envolvendo uma panela de 2,5 x 2,5 m, snorkel com diâmetro igual 0,35 m, e taxa de circulação próxima 30 ton/min os autores encontraram valores de ε tais como os apresentados na Figura 4.27.

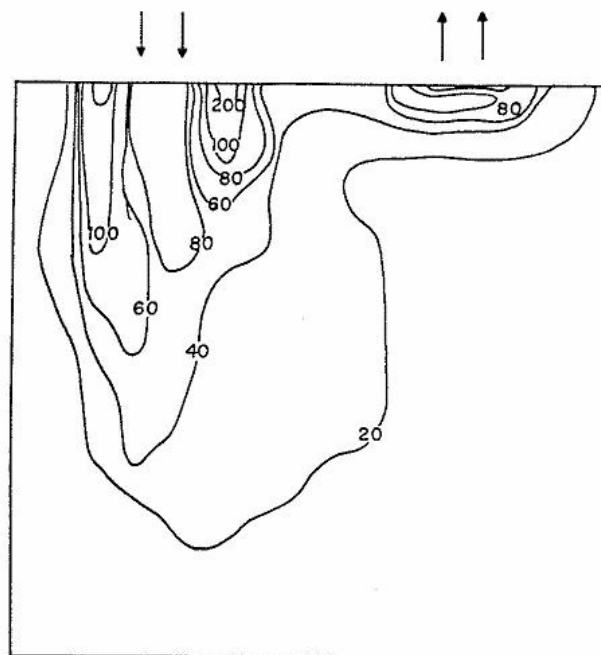


Figura 4.27 – Taxa de dissipação de energia em cm^2/s^3 , de acordo com SZEKELY ⁽³³⁾.

De acordo com THOMAS et al. ⁽¹⁶⁾ valores típicos de taxa de dissipação de energia, considerando uma panela de 250 ton e taxa de circulação de 200 ton/min, são da ordem de $0,01 \text{ m}^2/\text{s}^3$.

Como se pode notar os valores gerados pelo procedimento numérico, para as condições típicas da CST (e pequenas variações) são da mesma ordem de grandeza daqueles indicados na literatura.

4.6. MODELO MACROSCÓPICO PARA CHOQUE, COALESCIMENTO E FLOTAÇÃO DE INCLUSÕES NA PANELA DO DESGASEIFICADOR.

De modo descrever os resultados experimentais, evidenciados pela amostragem de oxigênio e análise ótica, foi construído um modelo para a contabilização do coalescimento e flotação de inclusões ao longo do processo. Este modelo leva em consideração os mecanismos de SAFFMAN&TURNER e de STOKES, de choque entre inclusões e emprega apenas variáveis macroscópicas do processo, como dimensões do reator, taxa de circulação, temperatura média. Módulos do programa escrito em FORTRAN, relativos a este modelo, são descritos a seguir.

4.6.1. ESTIMATIVA DO NÚMERO DE INCLUSÕES

Considerando uma massa de aço correspondente a $x_M[\text{kg}]$ e o resultado de TOS[%] (oxigênio total) como indicativo da quantidade total de Al_2O_3 (isto é, se pode desprezar o oxigênio dissolvido), comparativamente, se tem para massa de inclusões:

$$x_{MI} [\text{kg}] = x_M \cdot \frac{\text{TOS}}{100} [\text{kg oxigênio}] \cdot \frac{101,95 \text{ kg Al}_2\text{O}_3}{48,03 \text{ kg oxigênio}} \quad (30)$$

No caso em que o tamanho máximo de inclusões pode ser tomado como $x_{RMAX}[\text{m}]$, distribuídas em $NC[-]$ classes de igual amplitude, com frequência igual a $x_F(i)$ onde i representa a i -ésima classe, se pode estimar a amplitude de cada classe:

$$xAMPL[m] = \frac{xRMAX}{NC} \quad (31)$$

Bem como a dimensão média da inclusão na i -ésima classe,

$$xR(i)[m] = \frac{(i-1) + i}{2} xAMPL \quad 1 \leq i \leq NC \quad (32)$$

Então a massa total de inclusões, como expressão para o cálculo do número total de inclusões, $xNTI$, seria dada por:

$$xMI = \sum_{i=1}^{NC} xNTI xF(i) \frac{4}{3} \pi xR(i)^3 [m^3] xROAl2O3 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (33)$$

Onde,

$xROAl2O3$ representa a massa específica da inclusão.

Sendo, $xVACO[m^3]$ o volume de aço a concentração total de inclusões seria estimada como:

$$xNTIV = \frac{xNTI}{xVACO} \quad (34)$$

Enquanto a concentração de inclusões em cada classe.

$$xN(i) = xF(i) xNTIV . \quad (35)$$

4.6.2. TERMOS DO BALANÇO DE POPULAÇÃO

Ao contrário de um balanço populacional completo se considera, neste caso, que o número de inclusões em cada classe varia unicamente como função do choque e coalescimento, para um número limitado de mecanismos. Nada impede que o mesmo seja complementado.

Como idéia básica o número de choques entre inclusões de duas classes, por exemplo i e $i+n$, seria proporcional às concentrações de inclusões em cada classe, $xN(i) xN(i+n) W$, onde W representa uma constante de proporcionalidade dependente do mecanismo atuante.

Como sugere a Figura 4.28 o choque entre partículas da classe i com partículas da classe $i+n$ dá ensejo ao nascimento de partículas da classe k . Assumindo conservação de massa o raio resultante do coalescimento seria dado por:

$$xRAV = \{ xR(i)^3 + xR(i+n)^3 \}^{1/3} \quad (36)$$

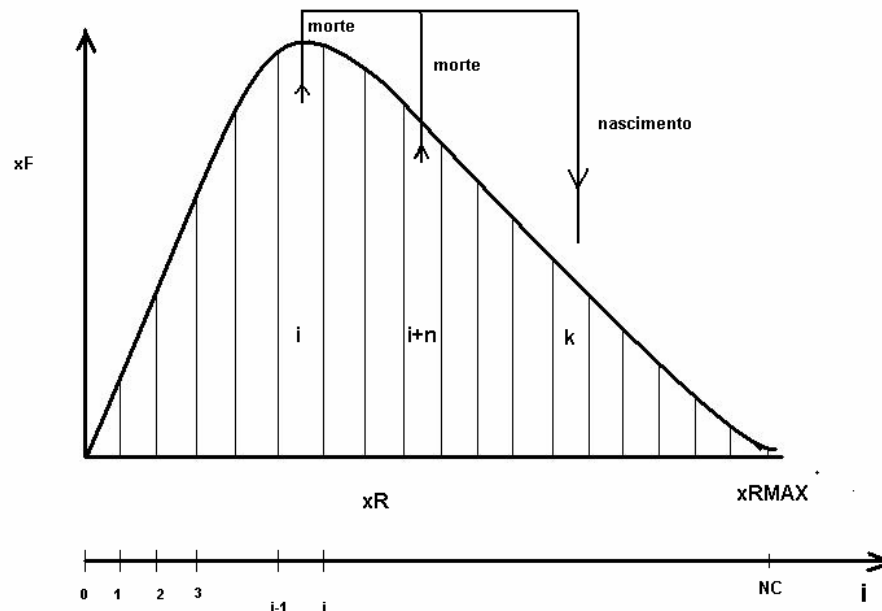


Figura 4. 28 – Esquemático de distribuição de tamanho de inclusões.

Mantidas as restrições $(i+n) \leq NC$ e $xRAV \leq xRMAX$. A classe beneficiada com tal nascimento pode ser identificada a partir do valor de $xRAV$. Deste modo o número de inclusões (por unidade de volume e de tempo) a ser acrescido à classe k , tal que $xR(k-1) \leq xRAV \leq xR(k)$, vale:

$$xDN(k) = xN(i) xN(i+n) \{1,3 \alpha [xR(i) + xR(i+n)]^3 \left(\frac{\varepsilon}{\mu} \right)^{0,5} \} \quad (37)$$

Caso apenas o mecanismo de SAFFMAN&TURNER (que prevê interação entre as inclusões como efeito da turbulência) esteja atuante. Observe-se que ε [m^2/s^3] e μ [m^2/s] representam, respectivamente, a taxa de dissipação de energia e a viscosidade cinemática do aço, o que confere, para o mecanismo de SAFFMAN&TURNER, unidades de [m^3/s] à constante de

proporcionalidade,

$$W_1 = \{1,3 \alpha [xR(i) + xR(i + n)]^3 \left(\frac{\varepsilon}{\mu} \right)^{0,5} \quad (38)$$

Outros mecanismos podem estar ativos, por exemplo choques devidos à diferença de velocidade de ascensão propiciada pelo empuxo que age sobre partículas de diferentes diâmetros. Propõe-se, para este mecanismo (normalmente denominado contribuição de Stokes):

$$W_2 = \frac{2\pi \Delta\rho g}{9\eta} \{xR(i) + xR(i + n)\}^3 |xR(i + n) - xR(i)| \quad (39)$$

Onde, $\Delta\rho$ representa a diferença entre as massas específicas do aço e inclusão, g a aceleração da gravidade e η a viscosidade dinâmica do aço.

Então $W = \Sigma W_i$

Estes cálculos implicam, como decorrência dos choques ocorrentes num intervalo de tempo $xDT[s]$, atualizar a concentração de inclusões da classe k a partir de:

$$xN(k) = xN(k) + xDT xDN(k) \quad (40)$$

Onde, $xDN(k) = xN(i) xN(i + n) \Sigma W$.

Naturalmente quando inclusões da classe i se chocam com inclusões da classe $i+n$ para formar inclusões da classe k as primeiras desaparecem. Portanto ao nascimento de inclusões de classe k corresponde a morte de igual número de inclusões da classe i e da classe $i+n$. Portanto o número de inclusões restantes pode ser estimado como:

$$xN(i) = xN(i) - xN(i) xN(i + n) \Sigma W \quad (41)$$

e

$$xN(i+n) = xN(i+n) - xN(i) xN(i+n) \sum W \quad (42)$$

Cumprida a restrição de que o número de inclusões de cada classe deve ser maior que zero.

4.6.3. SEPARAÇÃO DAS INCLUSÕES

A Figura 4.29 apresenta um corte evidenciando o campo de velocidades na panela durante a operação normal do reator RH. O campo de velocidade e os outros citados anteriormente foram obtidos via numérica, através do código CFXTM, cuja implementação foi detalhada na Seção 4.3. Em concordância com outros pesquisadores⁽³²⁾, se observa que um jato de aço é arremesado pela perna de descida na direção do fundo da panela, progressivamente interagindo com o aço à sua volta, isto é perdendo coerência e cedendo energia cinética, até ser defletido no fundo da panela. Após esta deflexão o líquido retorna no sentido ascendente, porção substancial sendo aspirada pela perna de subida.

Devido a este caráter circulatório regiões de recirculação podem ser identificadas.

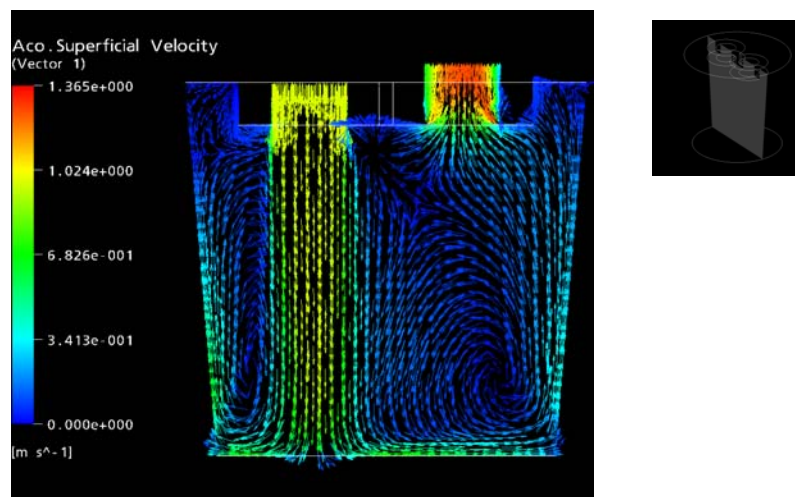


Figura 4. 29 – Campo de Velocidade na Panela de Aço.

Considerando o caso típico da CST, taxa de circulação da ordem de 180 ton/min (0,428 m³ de aço/s) e um diâmetro interno de perna igual a 0,75 m, se pode estimar a velocidade média no jato descendente como 0,97 m/s. Como o diâmetro interno da panela chega a 3,5 m no fundo e 4,2 m ao nível da interface metal escória, se pode adotar um valor médio de diâmetro igual a

4m e estimar para velocidade média de ascensão (assumindo distribuição uniforme, desprezando a área da seção reta da perna de descida, isto é considerando 12,12 m² de área para o fluxo ascendente) 0,035 m/s.

Por outro lado, considerando uma partícula esférica de inclusão, se pode estimar a velocidade terminal da mesma como:

$$V = \sqrt{\frac{8 R g \Delta\rho}{3 f \rho}} \quad (43)$$

Onde, R representa o raio da inclusão; g a aceleração da gravidade; $\Delta\rho$ a diferença entre massas específicas de aço e inclusão; f o fator de fricção e ρ a massa específica do aço. O valor de f pode ser encontrado, de acordo com a faixa de número de Reynolds.

$$Re = \frac{2R \rho V}{\eta} \quad (44)$$

$$f = 24/Re \quad Re < 1 \quad (45)$$

$$f = \frac{18,5}{Re^{0,6}} \quad 1 < Re < 1000 \quad (46)$$

$$f = 0,44 \quad Re > 1000 \quad (47)$$

Então, se $\rho_{\text{aço}} = 7000 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{inclusão}} = 3990 \text{ kg/m}^3$, se encontra (assumindo fluxo turbulento) os valores listados na Tabela XIII.

Tabela XIII – Velocidade terminal de inclusões de alumina, em função do raio.

R [μm]	10	50	100
V [m/s]	0,0053	0,018	0,0168

Portanto o divórcio entre velocidade do fluido e velocidade da partícula (isto é, a velocidade terminal), só se torna significativo para tamanhos superiores a 50 microns; abaixo deste tamanho se pode supor que a inclusão, na prática, acompanha o fluxo de aço. Estes cálculos também sugerem que a desaceleração relativa do fluxo ascendente, devido à maior área de fluxo, é o que permite a separação de inclusões.

De modo a contabilizar a separação das inclusões na interface metal/escória vai ser admitido que a panela pode ser sub-dividida em dois reatores (Figura 4.30); 1- o reator inferior, de mistura perfeita, onde ocorre o choque e coalescimento de inclusões de acordo com o modelo já descrito; 2- um reator superior, de volume restrito à proximidade da interface metal-escória, que perde todas as inclusões nele contido num dado intervalo de tempo de processamento.

Como primeira aproximação se admite portanto eficiência completa de captura de inclusões na interface. Além do mais, o volume deste reator virtual, e logo a quantidade de inclusões efluentes, depende do tamanho de inclusão a ser considerado. Por exemplo inclusões maiores flutam mais rápido o que implica em reator mais profundo.

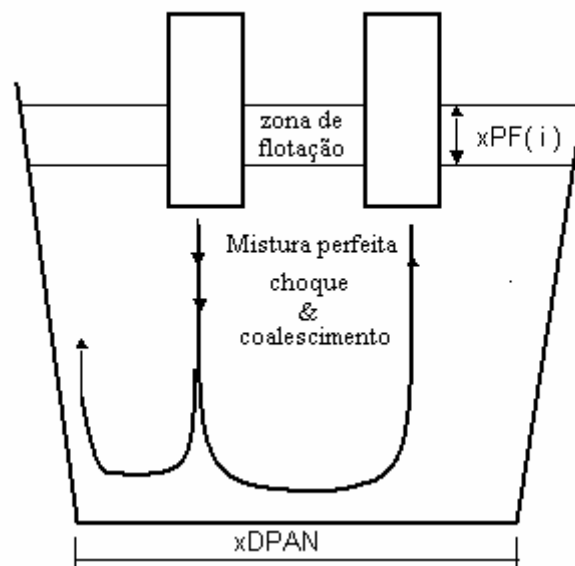


Figura 4. 30 – Divisão esquemática da panela em reator de coalescimento e de flotação.

Parece razoável assumir que no reator de flotação as velocidades sejam significativamente menores, caracterizando um fluxo laminar, o que permitiria estimar a velocidade de flotação a partir da equação de Stokes. Deste modo, para cada classe de inclusões se calcula a velocidade terminal

$$x_{FST(i)} = \frac{2 x_{R(i)}^2 g \Delta\rho}{9 \eta} \text{ [m/s]} \quad (48)$$

Enquanto que a profundidade deste reator virtual, para esta classe, seria:

$$x_{PF(i)} = x_{DT} x_{FST(i)} \text{ [m]} \quad (49)$$

Portanto a fração de volume do reator que perde suas inclusões à camada de escória se calcula como:

$$x_{Vflot(i)} = \frac{x_{PF(i)} \frac{\pi x_{DPAN}^2}{4}}{x_{VACO}} \quad (50)$$

Onde , como indicado, x_{DPAN} representa o diâmetro da panela.

Finalmente a fração de inclusões em cada classe pode ser reestimada decontando-se a captura de parte delas, contidas no reator virtual de flotação, isto é:

$$x_{N(i)} = (1 - x_{Vflot(i)}) x_{N(i)} \quad (51)$$

A Tabela XIV apresenta valores de velocidade de flotação, profundidade do reator virtual, bem como sua fração volumétrica, para uma série de classes arbitrariamente definida.

Tabela XIV - Fração volumétrica do reator de flotação, para intervalo de integração de 0,5 s

classe	xRM[μm]	xFTS[m/s]	xPF[m]	xVflot[-]
1	1.250	0.0000020	0.0000010	0.0000003
2	3.750	0.0000176	0.0000088	0.0000024
3	6.250	0.0000489	0.0000244	0.0000068
4	8.750	0.0000958	0.0000479	0.0000133
5	11.250	0.0001584	0.0000792	0.0000219
6	13.750	0.0002366	0.0001183	0.0000328
7	16.250	0.0003304	0.0001652	0.0000457
8	18.750	0.0004399	0.0002199	0.0000609
9	21.250	0.0005650	0.0002825	0.0000782
10	23.750	0.0007058	0.0003529	0.0000977
11	26.250	0.0008622	0.0004311	0.0001194
12	28.750	0.0010343	0.0005171	0.0001432
13	31.250	0.0012219	0.0006110	0.0001692
14	33.750	0.0014253	0.0007126	0.0001973
15	36.250	0.0016442	0.0008221	0.0002276
16	38.750	0.0018789	0.0009394	0.0002601
17	41.250	0.0021291	0.0010646	0.0002948
18	43.750	0.0023950	0.0011975	0.0003316
19	46.250	0.0026765	0.0013383	0.0003706
20	48.750	0.0029737	0.0014869	0.0004117

Como se nota o reator virtual de flotação, de acordo com a definição proposta, representa uma fração mínima do sistema, para um passo de integração $xDT= 0,5$ s.

4.6.4. DISTRIBUIÇÃO INICIAL DE INCLUSÕES

O modelo se propõe a calcular a evolução das inclusões, tanto quanto ao número como em relação à distribuição de tamanhos, ao longo do processo de recirculação. Os valores de oxigênio total mostrados na Figura 4.31 foram determinados nas condições operacionais típicas da CST, através do amostrador TOS, e de acordo com procedimento descrito na seção 4.2. Como indica a Figura 4.31 o decaimento do valor de oxigênio total na amostra, pressupostamente na forma de alumina, por ser pequeno o valor de alumínio dissolvido em equilíbrio, é brusco nos primeiros instantes após adição. Após 1 minuto os valores decaem, porém lentamente. Portanto a distribuição de tamanhos logo após a adição do desoxidante se torna a condição inicial óbvia e necessária. Entretanto esta avaliação é difícil, senão

impraticável. Somente algum modo de amostragem contínua poderia lançar luz a este problema.

Havendo a impossibilidade de se conhecer por certo a distribuição inicial de inclusões, na seção seguinte se avalia a influência, de acordo com o modelo proposto, da distribuição inicial de inclusões sobre a evolução do oxigênio total ao longo do tempo.

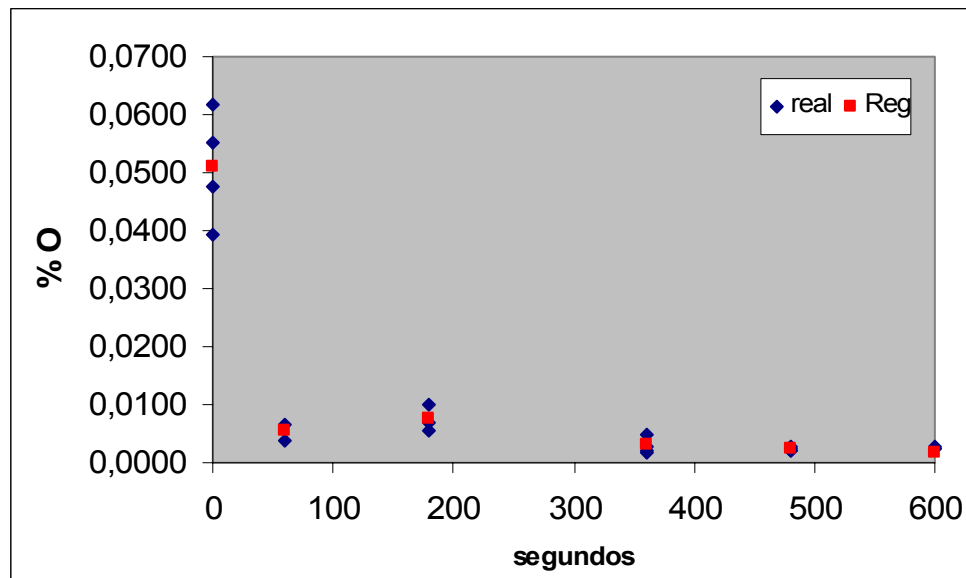


Figura 4.31 – Oxigênio total em função do tempo de circulação, amostragem via TOS.

4.6.5. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

Para efeito de cálculos preliminares, de determinação da sensibilidade do modelo, foram consideradas inclusões de raio máximo igual a $50\mu\text{m}$, distribuídas em 20 classes de igual amplitude.

Considerou-se 315 toneladas de aço e oxigênio inicial, capaz de gerar alumina na reação de desoxidação, ao nível de 500 ppm. A massa inicial de inclusões, como descrito anteriormente, pode então ser calculada.

Para a distribuição inicial admitiu-se

Valor médio igual a 10% do raio máximo

Desvio padrão igual a 35% da média

Distribuição normal.

Deste modo se estimou a distribuição mostrada na tabela XV.

Tabela XV – Distribuição inicial do tamanho das inclusões

Raio (μm)	1,25	3,75	6,25	8,75	11,25	13,75
Frequencia	0,207407	0,575414	0,207407	0,009713	0,000059	0,000000

Que corresponde a $6,011 \times 10^{13}$ inclusões/m³ e 401,177 kg

Adotou-se, para taxa de dissipação de energia, o valor de 0,001, e obteve-se o comportamento descrito na fig 4.32. Como se observa a influência do tempo de circulação é forte mas se restringe aos primeiros 3 minutos de circulação, período após o qual as diferenças se tornam irrisórias, sob as condições de simulação definidas anteriormente. Embora a forma prevista seja a mesma observada experimentalmente, Figura 4.31, o modelo requer ajustes para descrever a mais forte redução nos primeiros minutos. Como se irá perceber estes valores mudam significativamente quando se faz o ajuste dos dados de Ototal medidos experimentalmente com aqueles previstos pelo modelo, através da mudança de valores da constante da equação do modelo de Saffman&Turner.

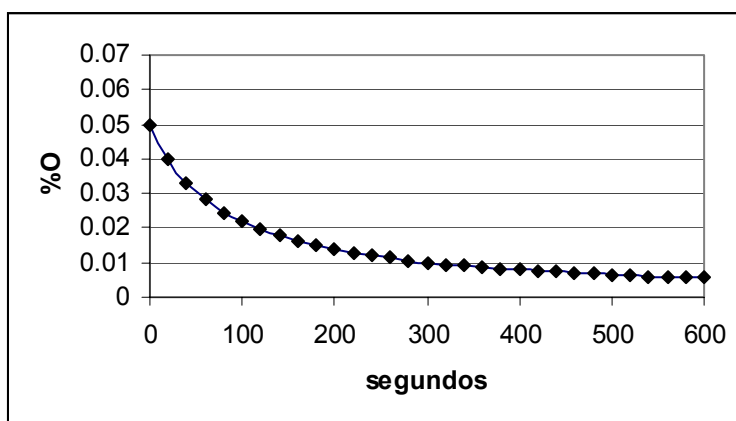


Figura 4. 32 – Evolução do oxigênio total de acordo com o modelo proposto.

Analisou-se também a influência da distribuição inicial de inclusões sobre a evolução dos teores de Ototal, visto que a verdadeira distribuição inicial não é conhecida. Para estas simulações se empregou um valor de taxa de dissipação de energia igual $0,004 \text{ m}^2/\text{s}^3$ e constante do modelo de SAFFMAN&TURNER igual a 0,45. Este valor de taxa de dissipação

é o típico das condições operacionais da CST; o valor escolhido de constante permite reproduzir a curva experimental exposta na Figura 4.31.

A Figura 4.33 ilustra a evolução do teor total de oxigênio, calculado a partir do conteúdo de inclusões remanescentes no metal, a partir de 06 distribuições iniciais diferentes, apresentadas na Tabela XVI.

Como se nota a maior incidência de separação de inclusões se daria, tal como indicado pelas amostragens realizadas, nos primeiros 2 minutos. Após este intervalo os ganhos em limpidez seriam incrementais.

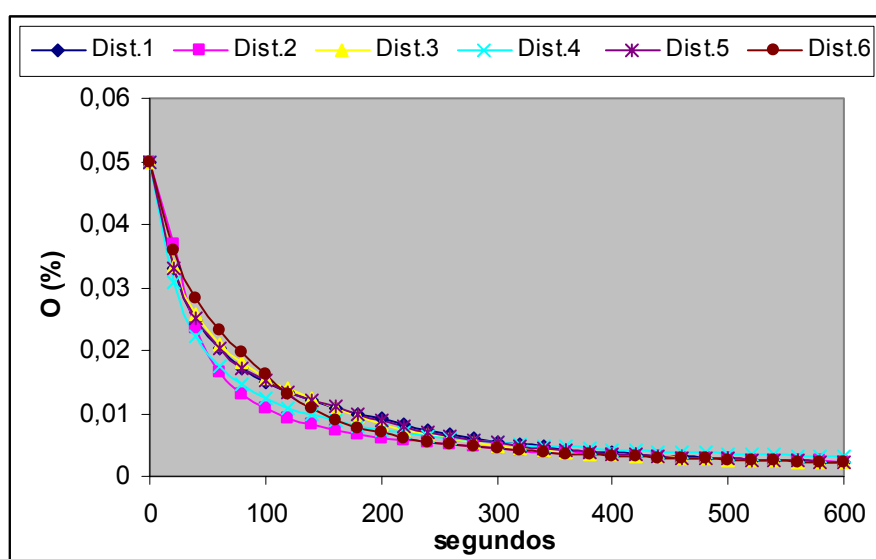


Figura 4.33 – Evolução do Oxigênio Total para 06 condições iniciais distintas.

Como se nota não existe influência significativa da distribuição inicial assumida após 300 segundos de circulação. Entretanto, ao redor de 100 segundos os teores de oxigênio podem variar de 100 a 150 ppm. Deste modo a diferença reside nos instantes iniciais.

Tabela XVI – Distribuição inicial do tamanho das inclusões – 6 casos diferentes.

Amostras	Raio (μm)	0,27	0,80	1,33	1,86	2,39	2,92	3,45	3,98	4,51	5,04	> 5,57
1	Frequencia	0,0076	0,0360	0,1095	0,2132	0,2663	0,2132	0,1095	0,0360	0,0076	0,0010	0,0001
2		0,0121	0,0160	0,0207	0,0260	0,0320	0,0382	0,0446	0,0507	0,0561	0,0606	0,6430
3		0,5000	0,1500	0,1200	0,0900	0,0600	0,0300	0,0200	0,0150	0,0100	0,0050	0,0000
4		0,1000	0,2000	0,2500	0,3000	0,1500	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5		0,0500	0,1000	0,1500	0,1600	0,2500	0,1500	0,0900	0,0300	0,0150	0,0050	0,0000
6		0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,0000

5. SIMULAÇÕES COM O MODELO E DISCUSSÃO FINAL

Como mostrado nas seções precedentes a distribuição inicial (assumida), de inclusões influencia os valores de oxigênio total previstos pelo modelo, mas principalmente nos primeiros minutos. Nenhuma influência significativa é prevista para tempos maiores que 300 segundos. Por outro lado esta distribuição inicial não é conhecida de fato. Por estes motivos optou-se por escolher o valor da constante de SAFFMAN&TURNER igual a 0,45, o qual faz com que a curva prevista pelo modelo aqui desenvolvido reproduza os dados de O_{total} medidos pela sonda TOS, nos instantes finais de circulação, como se nota na Figura 5.1. Para tanto se adotou um valor final médio, considerando todas as corridas amostradas, de cerca de 25 ppm. O valor da taxa de dissipação de energia ($\varepsilon = 0,0040 \text{ m}^2/\text{s}^3$), foi assim escolhido por refletir a situação típica da CST, vide tabela XII.

Pode-se notar que os resultados da curva prevista pelo modelo mostram um grau de acerto bastante significativo, principalmente para os tempos maiores que 2 minutos.

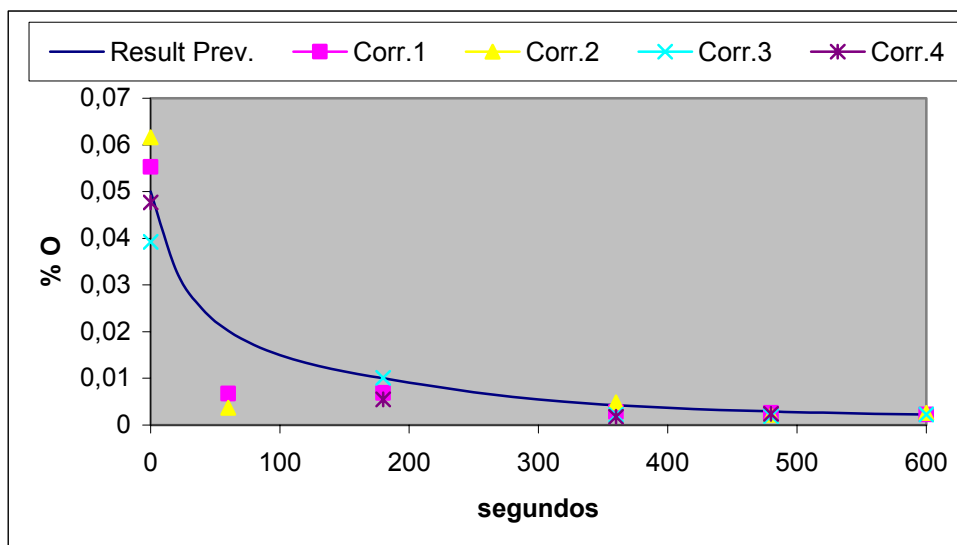


Figura 5.1 – Comparação Modelo x Medições realizadas.

Portanto as evoluções previstas pelo modelo proposto, sugerindo fortes variações nos instantes iniciais, seguidas por uma relativa estabilidade dos teores de oxigênio total encontram resguardo nos resultados apresentados na literatura.

Utilizando as informações da tabela XII, foram realizadas simulações no modelo desenvolvido, para avaliar a influência de cada condição, diâmetro do snorkel, taxa de dissipação de energia (ε) e taxa de circulação na limpeza do aço, representada aqui pelo O_{total} .

Como pode ser visto na figura 5.2 os resultados não mostram diferença significativa após uma circulação (após a adição de Al), de 10 minutos. A figura 5.2 a representa os casos em que os diâmetros dos snorkels são 0,75 m, a figura 5.2 b representa os casos em que os diâmetros dos snorkels são 0,80 m e a figura 5.2 c representa os casos em que o diâmetro do snorkel de subida é 0,75 m e o de descida é 0,80 m.

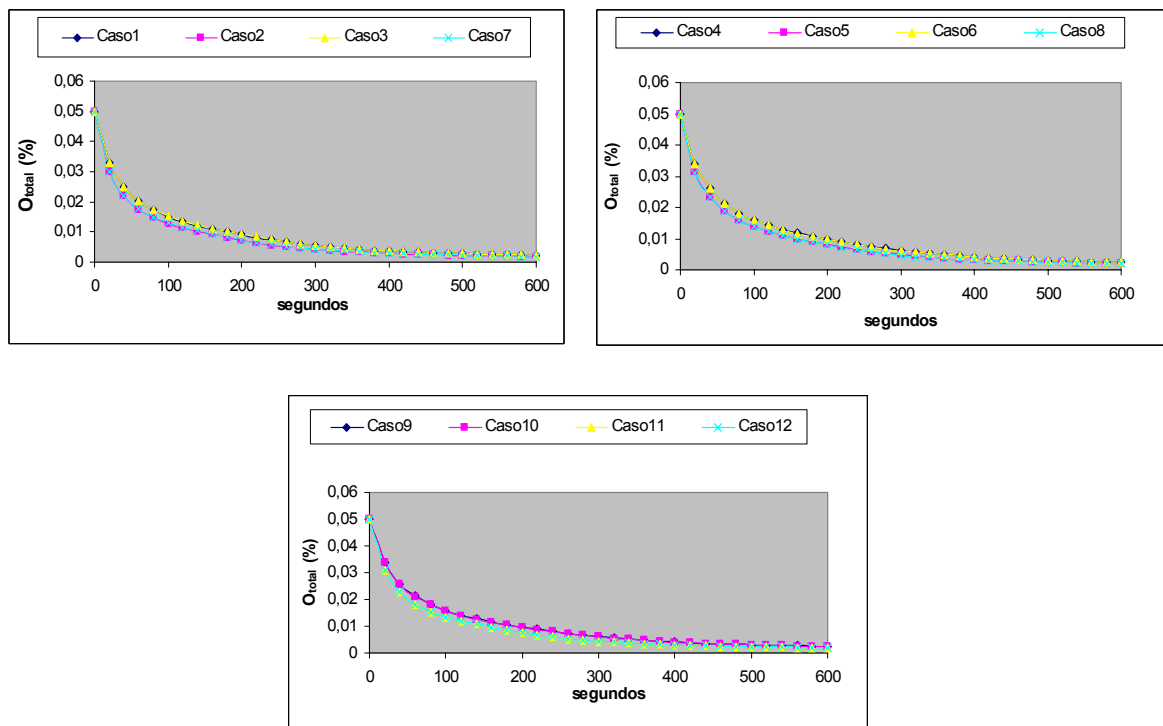


Figura 5.2 – Variação do O_{total} em função do tempo de homogeneização para diferentes condições, de acordo com dados da Tabela XII e modelo proposto.

As principais diferenças previstas parecem ocorrer nos primeiros 120 segundos de homogeneização. Entretanto não são diferenças significativas que possam garantir que uma configuração seja muito superior às outras condições no aspecto de se atingir uma maior limpeza, notadamente porque os tempos típicos de circulação são tipicamente muito superiores a estes.

Outro fator importante apresentado, é que a maior queda do O_{total} ocorre nos primeiros 100 segundos do tempo de mistura na panela.

As condições típicas da CST são retratadas na Tabela XII, caso 1, correspondendo a snorkels com 750 mm de diâmetro, taxa de circulação de 180 ton/min e taxa de dissipação de energia de $0,00395 \text{ m}^2/\text{s}^3$. Na eventual hipótese de se aumentar o diâmetro da perna de descida para 800 mm se poderia esperar, de acordo com SESHADRI et al. ⁽⁴¹⁾, um aumento de taxa de circulação de até 3%, valor estimado com base no aumento de área de seção reta do snorkel. Então a taxa de circulação sob estas condições seria de 185 ton/min, resultando em taxa de dissipação de energia igual a:

$$\varepsilon[\text{m}^2/\text{s}^3] = 0,008714 + 0,00696 \frac{185}{100} - 0,0162 \cdot 0,75 - 0,0066 \cdot 0,8 = 0,00416 \quad (51)$$

O que representa um ligeiro incremento em relação à condição padrão. Como sugere a Figura 5.3 os benefícios, em termos de velocidade de remoção de inclusões, seriam mínimos.

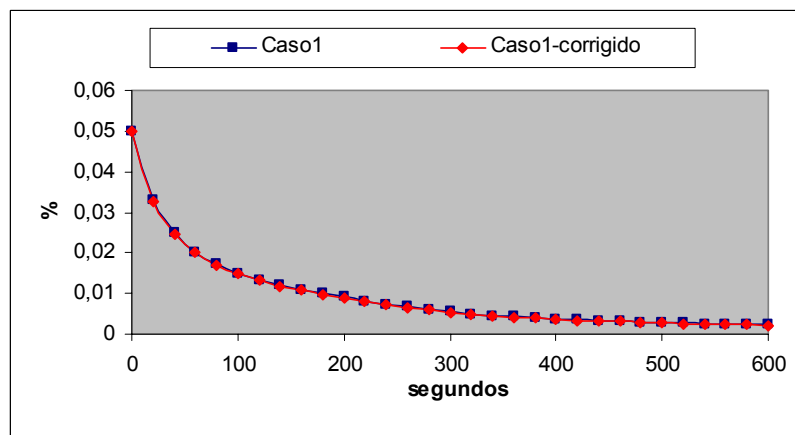


Figura 5.3 - Efeito do Aumento do Diâmetro da Perna de Descida Sobre a Remoção de Inclusões.

A Tabela XVII resume, de acordo com o modelo proposto, a variação do teor de oxigênio total ao longo do tempo, para várias situações. Não se mostram resultados de limpidez (O_{total}), significativamente diferentes ao final do tratamento.

Tabela XVII – Resultados de Ototal para 12 configurações diferentes.

Tempo (s)	Oxigênio Total (%)					
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
0	0,0500	0,0500	0,0500	0,0500	0,0500	0,0500
60	0,0202	0,0175	0,0203	0,0213	0,0187	0,0213
180	0,0100	0,0081	0,0101	0,0107	0,0090	0,0107
300	0,0055	0,0041	0,0055	0,0061	0,0047	0,0061
480	0,0029	0,0023	0,0029	0,0032	0,0026	0,0032
600	0,0022	0,0018	0,0023	0,0024	0,0020	0,0024

Tempo (s)	Oxigênio Total (%)					
	Caso 7	Caso 8	Caso 9	Caso 10	Caso 11	Caso 12
0	0,0500	0,0500	0,0500	0,0500	0,0500	0,0500
60	0,0178	0,0186	0,0212	0,0210	0,0182	0,0182
180	0,0083	0,0089	0,0106	0,0105	0,0087	0,0087
300	0,0042	0,0047	0,0061	0,0060	0,0045	0,0045
480	0,0024	0,0025	0,0032	0,0031	0,0025	0,0025
600	0,0018	0,0020	0,0024	0,0024	0,0019	0,0019

6. CONCLUSÕES

A cinética do processo de coalescimento-flotação de inclusões na panela do desgaseificador RH foi avaliada a partir de um modelo macroscópico tendo como variável de entrada a taxa de dissipação de energia. Esta taxa de dissipação foi avaliada em função de alguns parâmetros operacionais, utilizando-se para tal o software comercial CFX.

A evolução do conteúdo de inclusões foi seguida através de amostragens de algumas corridas, o que permitiu determinar o conteúdo total de inclusões com o auxílio do amostrador TOS e estimar a distribuição de tamanhos por meio do analisador de imagens IMAGO. Estas duas técnicas serviram para validar o modelo macroscópico e as conclusões são como se seguem.

A variável macroscópica de maior influência sobre a taxa de remoção de inclusões é a taxa de dissipação de energia, que apresentou distribuição praticamente uniforme ao longo do volume da panela.

O fator que tem maior influência na taxa de dissipação de energia, é a velocidade de circulação do aço (t/min).

Uma diferença de 50 °C na temperatura de processamento do aço (1600 °C => 1650 °C), não apresenta influência significativa na taxa de dissipação de energia do reator RH, e, por conseguinte não influencia significativamente o grau de limpidez do aço.

Do mesmo modo o aumento das dimensões dos snorkels, de 750 a 800 mm, induz a um aumento discreto da taxa de dissipação de energia e, por conseguinte da velocidade de remoção de inclusões.

A maior taxa de decaimento do O_{total} ocorre nos primeiros três minutos após a adição de alumínio, seja ele para desoxidação ou para aquecimento aluminotérmico. Após 360 segundos da adição de alumínio a curva de decaimento do O_{total} parece se tornar assintótica, o que nos leva a concluir que tempos de homogeneização superiores a 480 segundos levam a ganhos incrementais, que podem ser reavaliados quando se procura aumentar a produtividade da aciaria. Modelo e resultados experimentais concordam neste aspecto.

Os resultados previstos pelo modelo são significativamente afetados pela distribuição inicial assumida apenas se forem considerados os primeiros 2~3 minutos de homogeneização.

A determinação do conteúdo de inclusões por método ótico seguindo a metodologia YAWATA, neste trabalho instrumentalizada via software comercial IMAGO, parece subestimar o conteúdo de inclusões, talvez por desprezar aquelas menores que $10 \mu\text{m}^2$. As análises providas por esta técnica também mostram a estabilização do conteúdo de inclusões após curto período de circulação.

7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados deste trabalho são bastante significativos no que se refere ao fenômeno de remoção de inclusões em uma panela processada num desgaseificador RH, porém simulações adicionais podem acrescentar a este modelo os fenômenos que contribuem para a limpidez e que ocorrem dentro do reator a vácuo, bem como a remoção das inclusões que ocorre pelas bolhas de Ar no snorkel de subida.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) – Costa, S. L. S. e Barbosa, A. H. A. - Apostila treinamento USIMINAS – Refino secundário do Aço pag5.
- (2) – Sichen, D., Beskow, K., Nagendra, T. – Formation and Chemical development of non-metallic inclusions in steel ladle treatment, Metal Separation Technologies III, Proceedings of the symposium in Honour of Professor Lauri E. Holappa, R.E Aune, M. Kekkonen (editors), Coppre Mountain, Colorado, June 20-24, 2004.
- (3) – Zhang L., Thomas B. G., – State of art en Evaluation and Control of Steel Cleanliness, ISIJ, **43** (2003), nº 3, 273 - 278.
- (4) – Zhang, L., Pluschkell, W., Thomas, B. G., - Nucleation and Growth of Alumina Inclusions During Steel Deoxidation, 2002 Steelmaking Conf. Proc, 463-475.
- (5) – Tozawa, H., Kato, Y., Sorimachi, K., Nakanishi, T., - Agglomeration and Flotation of Alumina Clusters in Molten Steel - Trans. ISIJ, vol. 39 (1999), nº 5, 426-434.
- (6) – Dekkers, R. – Chapter 2 – Non Metallic Inclusions in Steel: A literature Review - Ph.D Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium (2002), 9.
- (7) – Thomas, B.G., Denissov, A., Miki, Y., Shimada, Y., - Model of inclusion removal during RH degassing of Steel, ISS 80th Steelmaking conference, 1997, pag 31-38.
- (8) – Beskow, K., Jia, J., Lupis, C., Sichen, D. – Chemical Characteristics of inclusions formed at various stages during the ladle treatment of Steel – Ironmaking and Steelmaking, 2002, vol. 29, nº 6, 427.
- (9) – Sasai, K., Mizukami, Y. – Reoxidation Behavior of Molten Steel in Tundish - ISIJ Int., Vol. 40 (2000), nº 1, 40.
- (10) – Dekkers, R. – Chapter 10 – Improvement of Steel Cleanliness - Ph.D Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium (2002), 133.
- (11) – Dekkers, R. - Chapter 10 – Improvement of Steel Cleanliness - Ph.D Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium (2002), 134.
- (12) – Wang, L., Lee, H.G, Hayes, P. - Prediction of the Optimum Bubble Size for Inclusion Removal from Molten Steel by Flotation - ISIJ Int, Vol.36 (1996) nº1, 7-16 e 17-24.
- (13) – Cho, J.S, Lee, H.G. - Cold Model Study on Inclusion Removal from Liquid Steel Using Fine Gas Bubbles - ISIJ Int, Vol. 41 (2001) nº 2, 151-157.
- (14) – Dekkers, R. - Chapter 10 – Improvement of Steel Cleanliness - Ph.D Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium (2002), 136.

- (15) – Tozawa, K., Kato, Y., Sorimachi, K., Nakanishi, T. K. – Agglomeration and Flotation of Alumina Clusters in Molten Steel - ISIJ Int, Vol. 39 (1999) nº 5, pag 426-434.
- (16) Método de contagem de inclusões – Técnica desenvolvida na década de 70, por profissionais da usina de YAWATA, Japão.
- (17) – IMAGO® – Software de análise de imagens ESSS - (48) 3334-8922, ramal 2112.
- (18) Engineering Simulation and Scientific Software (ESSS) - Florianópolis, Sta Catarina – Brasil – (48) 3334-8922.
- (19) – Ajmani S.K., Dash S.K., Chandra, S., Bhanu, C. - Mixing Evaluation in the RH Process Using Mathematical Modelling, ISIJ International, 2004, vol 44, p 82-90.
- (20) CFX – Software Ansys de computação fluido dinâmica, representado no Brasil pela ESSS -contato (48) 3334-8922, ramal 2206.
- (21) – Silva C.A., Silva I.A., Martins, E.M.C., Seshadri V., Perim C.A., Vargas Filho, G.A., Fluid flow and mixing characteristics in RH degasser of Companhia Siderurgica de Tubarao, and influence of bottom gas injection and blockage through physical modeling study; Ironmaking and Steelmaking, 2004, vol 31, no 1, 37-42).
- (22) – Seshadri, V., da Silva, C.A., da Silva, I.A., Vargas, G.A., Lascosqui, P.S.B., Decarburisation rates in RH-KTB degasser of CST steel plant through physical modelling study ; Ironmaking and Steelmaking , v 33 , no 1 , february 2006, p 34-38).
- (23) – Vargas Filho, G.A. – Modelagem Matemática e física do desgaseificador à vácuo RH da Companhia Siderúrgica de Tubarão – CST – Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.
- (24) – Szekely, J., Shirabe, K. - A Mathematical model of fluid Flow and Inclusion Coalescence in the RH Vacuum Degassing System, Transactions ISIJ, 1983, vol 33.
- (25) – Dekkers, R. - Ph.D Thesis - Chapter 04 – Non-Metallic Inclusion During Industrial Practice, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium (2002), 25-40.
- (26) – Söder, M. – Growth and Removal of inclusions during Ladle Refining – Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2004, 36-37.
- (27) – Aoki, J., Zhang, L., Thomas, B.G., Modeling of Inclusion Removal in Ladle Refining – ICS Proceedings – 2005 – pp. 319-331.