



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia da UFMG



Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica, Materiais e de Minas – Mestrado Profissional

Dissertação de Mestrado

**Avaliação da limpidez das placas de aço ultrabaixo carbono no início
de operação do distribuidor do lingotamento contínuo**

Autor: Sérgio Roberto Lopes Moreira
Orientador: Leandro Rocha Lemos
Coorientador: Leonardo José Silva de Oliveira

Agosto/2019

Sérgio Roberto Lopes Moreira

Avaliação da limpidez das placas de aço ultrabaixo carbono no início de operação do distribuidor do lingotamento contínuo

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas - Mestrado Profissional, da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de concentração: Metalurgia Extrativa.

Orientador: Prof. Leandro Rocha Lemos.

Coorientador: Leonardo José Silva de Oliveira.

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
2019

M838a	<p>Moreira, Sérgio Roberto Lopes. Avaliação da limpidez das placas de aço ultra baixo carbono no início de operação do distribuidor do lingotamento contínuo [recurso eletrônico] / Sérgio Roberto Lopes Moreira. – 2019. 1 recurso eletrônico (xii, 88 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Leandro Rocha Lemos. Coorientador: Leonardo José Silva de Oliveira.</p> <p>Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos: f. 77-88.</p> <p>Bibliografia: f. 72-76. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia metalúrgica - Teses. 2. Metalurgia extrativa - Teses. 3. Aço - Inclusões - Teses. 4. Fundição contínua - Teses. I. Lemos, Leandro Rocha. II. Oliveira, Leonardo José Silva de. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 669(043)</p>
-------	--



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA, MATERIAIS
E DE MINAS/MP

UFMG

ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO DO ALUNO SÉRGIO ROBERTO LOPES MOREIRA

Engenharia, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de dissertação, intitulada *Avaliação da limpidez das placas de aço ultra baixo carbono no início de operação do distribuidor do lingotamento contínuo*, apresentada por SÉRGIO ROBERTO LOPES MOREIRA, número de registro 2017720881, graduado no curso de ENGENHARIA METALURGICA, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em ENGENHARIA METALÚRGICA, MATERIAIS E DE MINAS, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Leandro Rocha Lemos - Orientador (UFMG), Prof(a). Roberto Parreiras Tavares (UFMG), Prof(a). Antônio Adel dos Santos (Usiminas).

A Comissão considerou a dissertação:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.
Belo Horizonte, 30 de agosto de 2019.

Prof(a). Leandro Rocha Lemos (Doutor)

Prof(a). Roberto Parreiras Tavares (Doutor)

Prof(a). Antônio Adel dos Santos (Doutor)

Ao Criador, Todo-Poderoso, que guia
nossas vidas em Justiça e Perfeição.

“E tudo quanto fizerdes, fazei-o de todo o coração,
como ao Senhor, e não aos homens”

Colossenses 3:23

AGRADECIMENTOS

Ao Criador, que em Sua perfeição e sabedoria sustenta nossas vidas.

À minha esposa Natália, pelo amor incondicional e compreensão, sendo um verdadeiro porto seguro e companhia durante todo esse trabalho.

Aos meus pais Joaquim e Luzinete, pelo amor e educação e também aos meus irmãos e sobrinhos pelo apoio.

Ao professor e orientador Leandro Rocha Lemos pela orientação.

Ao engenheiro pesquisador Leonardo José Silva de Oliveira pela coorientação.

Ao engenheiro pesquisador Antônio Adel dos Santos pelas recomendações.

Aos engenheiros: Rodrigo Madrona Dias, pelas sugestões iniciais do trabalho; Rodrigo Seara Martins, Alexandre de Freitas Gomes de Mendonça e Omar de Siqueira Júnior pelo auxílio durante os experimentos.

À USIMINAS pelo apoio institucional, reconhecimento e investimento no trabalho.

À VESUVIUS nas pessoas de Fabiano Abrahão Moreira e Moisés Miranda pelo apoio e informações.

Ao Alberto Cesar Soares Rodrigues pela gestão dos experimentos, Everton Paço Cunha e Cáiser Antônio Cunha dos Reis pelo apoio da área de operação.

À Gerência Técnica de Aciaria pela oportunidade e Gerência Técnica de Laminação a Frio pelo apoio e compreensão.

Ao programa de Mestrado Profissional da CPGEM – UFMG.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	x
RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xii
1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	12
2.1 GERAL.....	12
2.2 ESPECÍFICOS	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 INCLUSÕES NÃO METÁLICAS EM AÇOS.....	16
3.2 INFLUÊNCIA DAS INCLUSÕES NAS PROPRIEDADES DO AÇO	18
3.3 DESOXIDAÇÃO	20
3.4 CLASSIFICAÇÃO DAS INCLUSÕES QUANTO À COMPOSIÇÃO QUÍMICA	22
3.4.1 Alumina.....	24
3.4.2 Aluminatos de cálcio	26
3.4.3 Espinélios.....	32
3.4.4 Sulfetos.....	35
3.5 ASPECTOS TÉCNICOS E OPERACIONAIS DA PARTIDA DE DISTRIBUIDOR	36
3.6 REOXIDAÇÃO NO DISTRIBUIDOR.....	39
3.7 LIMPIDEZ DOS AÇOS	40
3.8 MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DA LIMPIDEZ DOS AÇOS.....	43
3.8.1 Métodos diretos	43
3.8.2 Métodos indiretos	45
4 METODOLOGIA	49
4.1 MATERIAIS	49
4.2 ACOMPANHAMENTO INDUSTRIAL.....	49
4.3 DIMENSÕES DO DISTRIBUIDOR E VÁLVULA LONGA ESTENDIDA E RETIRADA DE AMOSTRAS.....	54
5 RESULTADOS.....	56
5.1 ADIÇÃO DO PÓ DE COBERTURA	56
5.2 ANÁLISE DE AMOSTRAS E TEOR DE OXIGÊNIO	56

5.3 ACOMPANHAMENTO DE QUALIDADE SUPERFICIAL NA INSPEÇÃO FINAL NA PRIMEIRA FASE.....	61
5.4 RESULTADOS DE QUALIDADE SUPERFICIAL NA SEGUNDA FASE DE TESTES.....	66
6 CONCLUSÃO	70
7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	701
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	722
APÊNDICE.....	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Conjunto de reatores e equipamentos utilizados no processo de lingotamento contínuo (HUANG e THOMAS apud LIU, 2014).....	13
Figura 3.2 - Distribuidor de lingotamento contínuo com controladores e modificadores de fluxo (SCHADE et al., 2003).....	14
Figura 3.3 - Representação do comportamento das inclusões antes e depois da laminação (SIMENSEN, 1992)	19
Figura 3.4 - Efeito causado por inclusões de alumina em bobina de aço.....	20
Figura 3.5 - Categorias de desoxidação de aços (TURKDOGAN, 1996).....	21
Figura 3.6 - Diagrama de fases do sistema ternário Al_2O_3 -MnO-SiO (SLAG ATLAS, 1981) ..	22
Figura 3.7 - Aparência interna de uma válvula submersa que apresentou obstrução	25
Figura 3.8 -Morfologia, composição e tamanhos típicos de inclusões de alumina (ZHANG e THOMAS, 2003)	25
Figura 3.9 - Diagrama ternário de fase do sistema CaO - SiO_2 - Al_2O_3 (MAPELLI, 2008), mostrando os cinco principais tipos de composições de cálcio aluminato (FACO, 2005) ..	27
Figura 3.10 - Diagrama binário CaO - Al_2O_3 , mostrando eutético formado após a adição cálcio no aço (OTOTANI, 1986).	28
Figura 3.11 - Lingotabilidade do aço dependendo da composição das inclusões (PIRES e GARCIA, 2004).....	29
Figura 3.12 - Inclusões líquidas de óxido indicadas em um diagrama ternário CaO - Al_2O_3 -S (STORY et al., 2004)	29
Figura 3.13 - Composição das inclusões para os comportamentos de erosão (STORY et al., 2004)	30
Figura 3.14 - Composição das inclusões para os comportamentos de lingotamento estável (STORY et al., 2004)	31
Figura 3.15 - Composição das inclusões para os comportamentos de <i>clogging</i> (STORY et al., 2004)	31
Figura 3.16 - Mudança na composição das inclusões com a adição de Ca (DAVIES e MORGAN, 1985).....	32
Figura 3.17 - Corte isotérmico a 1600°C no ternário CaO - Al_2O_3 -Mgo. (DEKKERS et al., 2004)	33
Figura 3.18 - Relação entre a quantidade de Ca adicionado e a composição das inclusões líquidas (YANG et al., 2011).....	35
Figura 3.19 - Exemplo de extensor de válvula longa utilizado no distribuidor (WÜNNENBERG e CAPPEL, 2009).....	38
Figura 3.20 - Relação da altura do jato e da vazão de aço no enchimento do distribuidor em função da absorção de oxigênio pelo jato de aço (SUZUKI et al., 1983).....	39
Figura 3.21 - Representação de distribuidor destacando os sistemas de conexão vulneráveis à reoxidação (FACO, 2005)	40

Figura 3.22 - Distribuição de tamanho de inclusão de Al_2O_3 em panela e distribuidor (ZHANG e THOMAS (2002).....	43
Figura 3.23 - Seção com aumento original de 225x, apresentando inclusões de sulfeto de Manganês (COLPAERT, 1983).....	44
Figura 3.24 - Equilíbrio entre o alumínio e o oxigênio no aço (1873 K) (ZHANG e THOMAS, 2003)	46
Figura 3.25 - Relação entre o Oxigênio Total no distribuidor e índice de defeitos no produto (ZHANG e THOMAS, 2003)	47
Figura 3.26 - Relação entre oxigênio total, pick-up de nitrogênio (ZHANG e THOMAS, 2003)	47
Figura 3.27 - Relação entre pick-up de nitrogênio e qualidade do aço (ZHANG e THOMAS, 2003)	48
Figura 4.1 - Fluxograma das etapas para execução dos trabalhos na primeira fase.....	50
Figura 4.2- Peso de aço líquido visado no distribuidor no momento da adição de pó de cobertura para cada um dos testes.	51
Figura 4.3- Inspeção em produto final laminado a frio – Usiminas.....	52
Figura 4.4- Equipamento MEV - Usiminas.....	53
Figura 4.5- Especificações dimensionais e técnicas do distribuidor (MIRANDA, 2017).....	54
Figura 4.6- Esquema da retirada de amostras no molde da máquina de lingotamento contínuo (HERAEUS ELECTRO-NITE INTERNATIONAL, 2006).....	54
Figura 4.7- Equipamento Leco TC 600 – Usiminas.	55
Figura 5.1 - Resultado da avaliação do teor de oxigênio da Referência.	57
Figura 5.2 - Resultado da avaliação do teor de oxigênio do Teste 1.....	57
Figura 5.3 - Resultado da avaliação do teor de oxigênio do Teste 2.....	58
Figura 5.4 - Resultado da avaliação do teor de oxigênio do Teste 3.....	58
Figura 5.5 - Avaliação do teor de oxigênio do aço UBC nos testes.....	60
Figura 5.6- Amostra com o defeito na bobina laminada a frio da Referência.	61
Figura 5.7 - Caracterização via MEV da amostra da bobina laminada a frio da Referência.....	61
Figura 5.8 - Espectro via EDS da inclusão da amostra da bobina laminada a frio da Referência.	62
Figura 5.9 - Amostra com o defeito da bobina laminada a frio do Teste 1.	62
Figura 5.10 - Caracterização via MEV da amostra da bobina laminada a frio do Teste 1.	63
Figura 5.11 - Espectro via EDS da inclusão da amostra da bobina laminada a frio do Teste 1 – Região 1.....	63
Figura 5.12- Espectro via EDS da inclusão da amostra da bobina laminada a frio do Teste 1- Região 2.....	64
Figura 5.13 - Amostra com o defeito da bobina laminada a frio do Teste 2.	64
Figura 5.14 - Caracterização via MEV da amostra da bobina laminada a frio do Teste 2.	65
Figura 5.15 - Espectro via EDS da inclusão da amostra da bobina laminada a frio do Teste 2.	65

- Figura 5.16 - Registro do aparecimento de recusa em material da 3ª placa do distribuidor para os testes do estudo, considerando material laminado a frio inspecionado.66
- Figura 5.17 - Resultados de qualidade superficial da 3ª placa de distribuidor no 1º mês de acompanhamento, considerando material laminado a frio inspecionado em tonelada.67
- Figura 5.18 - Resultados de qualidade superficial da 3ª placa de distribuidor no 2º mês de acompanhamento, considerando material laminado a frio inspecionado em tonelada.67
- Figura 5.19 - Resultados de qualidade superficial da 3ª placa de distribuidor para todos os experimentos, considerando material laminado a frio inspecionado em tonelada.68

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Típico condicionamento de limpeza do aço para atender às várias aplicações na indústria (ZHANG e THOMAS, 2002).....	16
Tabela 3.2 - Influência das impurezas mais comuns nas propriedades mecânicas do aço (ZHANG e THOMAS, 2002)	19
Tabela 3.3 - Classificação química dos tipos de inclusões presentes em aços (NUSPL, 2004)	23
Tabela 3.4 - Principais tipos de inclusão em aços UBC contendo Ti (STORY et al., 2000).....	37
Tabela 3.5 - Requisitos de limpidez para vários tipos de aço (ZHANG e THOMAS, 2002)....	42
Tabela 5.1 - Peso de aço líquido obtido no distribuidor no momento da adição de pó de cobertura.	56

RESUMO

O nível de inclusões presentes no aço líquido interfere na qualidade das placas produzidas por lingotamento contínuo, e são determinantes na formação de defeitos superficiais em produtos laminados a frio. A reoxidação do aço, bem como a passagem de escória do distribuidor para o molde, a interação do aço com o pó de cobertura do distribuidor e com o pó fluxante, têm forte influência na limpeza das placas originadas no processo de solidificação no molde. No presente trabalho, avaliaram-se as inclusões formadas durante o início do processo de lingotamento contínuo para aços de ultra baixo teor de carbono, sob três diferentes condições de adição do pó de cobertura do distribuidor: Teste 1; Teste 2 e Teste 3, além da própria condição denominada Referência. O objetivo do estudo foi reduzir a quantidade das inclusões presentes e, conseqüentemente, os defeitos superficiais em placas iniciais, por meio da relação com o teor de oxigênio no veio da máquina de lingotamento contínuo. Tal investigação visou fornecer informações para alterações nas condições do processo para melhoria da qualidade do produto final. No Teste 1, o pó de cobertura foi adicionado próximo à 17 t de aço, sem um extensor na válvula longa, favorecendo a reoxidação e emulsificação. No Teste 2, pó de cobertura foi adicionado com 22 t de aço líquido no distribuidor, houve a presença de inclusões à base de Al_2O_3 , embora com valores menores se comparados aos momentos de 28 t e 17 t (sem a válvula estendida). No Teste 3, o pó de cobertura foi adicionado próximo à 17 t de aço com um extensor de 200 mm na válvula longa, no momento em que o banho já está estabilizado. Não foi verificado para esse caso também alguma ocorrência de defeito superficial causado pela reoxidação do aço.

Palavras-chave: Distribuidor; Esfoliamento; Reoxidação; Inclusões.

ABSTRACT

The inclusions level present in the liquid steel interferes directly in the slabs quality produced by continuous casting, and are determinant in surface defects formation in cold rolled products. The steel reoxidation, as well as the slag carried from the tundish to the mold, the interaction of the steel with tundish covering powder and mold flux powder, have a strong influence on the slabs cleanliness originated in solidification process in the mold. In the present work, the inclusions formed during the beginning of the continuous casting process for ultra-low carbon steels were evaluated under three different tundish cover powder addition conditions: Test 1; Test 2 and Test 3, in addition to the condition called Reference. The objective of the study was to reduce the amount of inclusions present and, consequently, the surface defects in the initial slabs, through the relation between itself and the oxygen content in the continuous casting machine. Such research will information for changes in the process conditions to improve the quality of the final product. In Test 1, the cover powder was added close to 17 t of molten steel in tundish, without an extended shroud, favoring reoxidation and emulsification. In Test 2, the cover powder was added with 22 t of molten steel in tundish, there were Al_2O_3 -based inclusions, although with lower values compared to the 28 to 17 t moments (without extended shroud). In Test 3, the cover powder was added in tundish close to 17 t, with a 200 mm extension on the shroud, by the moment the molten steel is already stabilized. Not detected by this case, some surface defect caused by reoxidation.

Keywords: Tundish; Slivers; Reoxidation; Inclusions.

1 INTRODUÇÃO

Um dos fatores determinantes para a qualidade das placas produzidas no processo de lingotamento contínuo é o nível de inclusões presentes no aço líquido. As inclusões contribuem para a formação de defeitos superficiais nos produtos laminados, podendo gerar recusas ou retrabalho onerando os custos de processo.

As inclusões têm as mais diversas origens relacionadas ao processo de lingotamento contínuo (ZHANG; THOMAS, 2003), dentre elas destaca-se: a reoxidação do aço líquido, que ocorre em decorrência da exposição ao ar atmosférico; arraste de escória; pós de cobertura do distribuidor, e de fluxantes no molde pelo fluxo de aço. Assim, o entendimento do tipo de inclusão auxilia na determinação de sua origem no processo e na proposição de contramedidas para evitá-las.

Para evitar as inclusões por arraste de escória, há a presença de mecanismos como diques e barragens, com os quais se consegue modificar a direção do fluxo de forma a conduzir as inclusões para a superfície. Em geral, esses modificadores são estruturas sólidas que atuam como obstáculos físicos e alteram o padrão de escoamento, agregando ao aço melhor resultado de qualidade.

Do ponto de vista do processo de lingotamento contínuo, as placas provenientes do fluxo inicial (partida do distribuidor) podem ter um nível maior de inclusões em relação às demais, pois o tempo de exposição do aço à atmosfera é maior (STORY et al., 2004). Além disso, pode ocorrer o arraste de materiais presentes no distribuidor, como resíduos de refratários e outros gerados na sua preparação, transporte e secagem. Neste caso, estas placas iniciais ficam vulneráveis ao aparecimento de defeitos que podem prejudicar a aplicação do produto, após laminadas.

Dessa forma, visando ao entendimento das condições de partida de distribuidor da usina siderúrgica Usiminas, a qual é integrada à coque, caracterizou-se a quantidade de inclusões presentes no aço até os primeiros vinte metros no veio da máquina de lingotamento contínuo para aços ultrabaixo teor de carbono. Tal caracterização visou determinar os tipos de inclusões presentes e após a caracterização, poderão ser propostos métodos de processo que visem a redução de inclusões no fluxo inicial de aço.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Caracterizar e quantificar as inclusões presentes no aço durante a partida de uma máquina de lingotamento contínuo, nos primeiros vinte metros lingotados, e propor métodos de processo que vise a redução de inclusões no fluxo inicial de aço para o veio.

2.2 Específicos

- Avaliar a eficiência da adição antecipada de pó de cobertura na presença de inclusões no aço.
- Avaliar o efeito da posição da válvula longa, com prolongamento, no momento da partida, na presença de inclusões no aço.

As avaliações acima foram realizadas com base em acompanhamento de resultados industriais onde foi observado o teor de oxigênio total e a caracterização de inclusões formadas nos testes.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Buscando-se a excelência da qualidade superficial e interna do produto, desenvolveu-se o lingotamento contínuo do aço em detrimento ao lingotamento convencional. As vantagens vão além da qualidade: o processo garante alta produtividade e grande rendimento. Isso explica porque é um dos principais meios de obtenção de produtos siderúrgicos. A versatilidade do lingotamento contínuo lhe confere também a capacidade para produzir uma gama imensa de categorias de aço (KIMURA et al., 1994).

A Figura 3.1 mostra uma máquina de lingotamento contínuo de dois veios, destacando os principais componentes e equipamentos utilizados no processo.

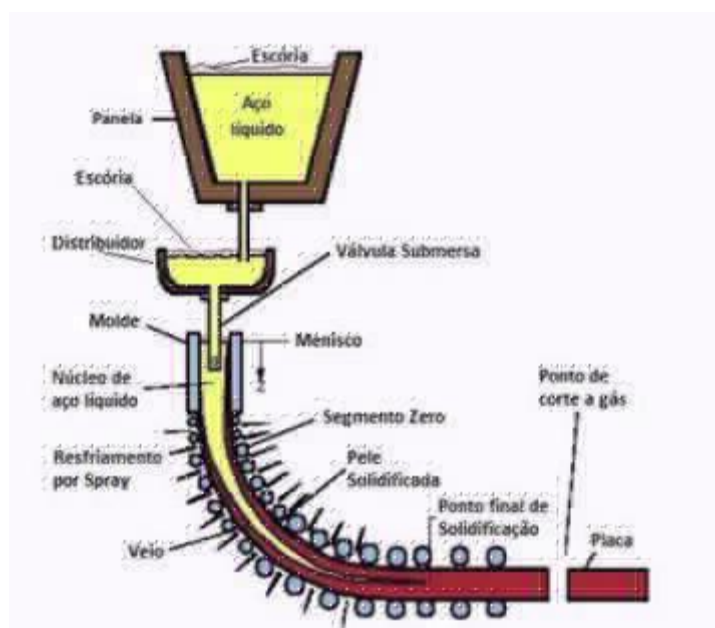


Figura 3.1 - Conjunto de reatores e equipamentos utilizados no processo de lingotamento contínuo (HUANG e THOMAS apud LIU, 2014).

No processo de lingotamento contínuo, a panela é depositada na torre giratória, e então ocorre a abertura da panela fazendo com que o fluxo de aço escoe pela válvula longa, transferindo o aço líquido para o distribuidor, que posteriormente alimenta os moldes, a partir da válvula submersa.

A solidificação se inicia no molde, onde há a formação de uma fina camada sólida, contudo espessa o suficiente para sustentar o núcleo ainda líquido na saída do molde.

Na etapa seguinte, o aço é resfriado por *sprays* de água enquanto é extraído do veio a uma velocidade determinada. A etapa de lingotamento é finalizada no momento em que o aço encontra-se completamente solidificado, quando o produto é cortado no comprimento apropriado (ZHANG; THOMAS, 2003).

Cabe ao distribuidor a função de alimentar os moldes durante as trocas de panela, garantindo um nível de aço de trabalho suficientemente elevado. No decorrer dos anos, as utilidades do distribuidor aumentaram desde sua criação, permitindo a conciliação do processo de refino com o processo de solidificação do aço. Atualmente o equipamento é usado também para flotação de inclusões não metálicas, ajuste da composição química e controle de temperatura do banho (BRAGA et al., 2015). A utilização de modificadores de fluxo e da válvula submersa trouxe grande evolução ao processo. Estes dispositivos, aliados às técnicas do emprego do argônio, propiciam a obtenção de aços com baixa quantidade de inclusões (MENDONÇA, 2016).

Na Figura 3.2 é mostrado esquematicamente o distribuidor.

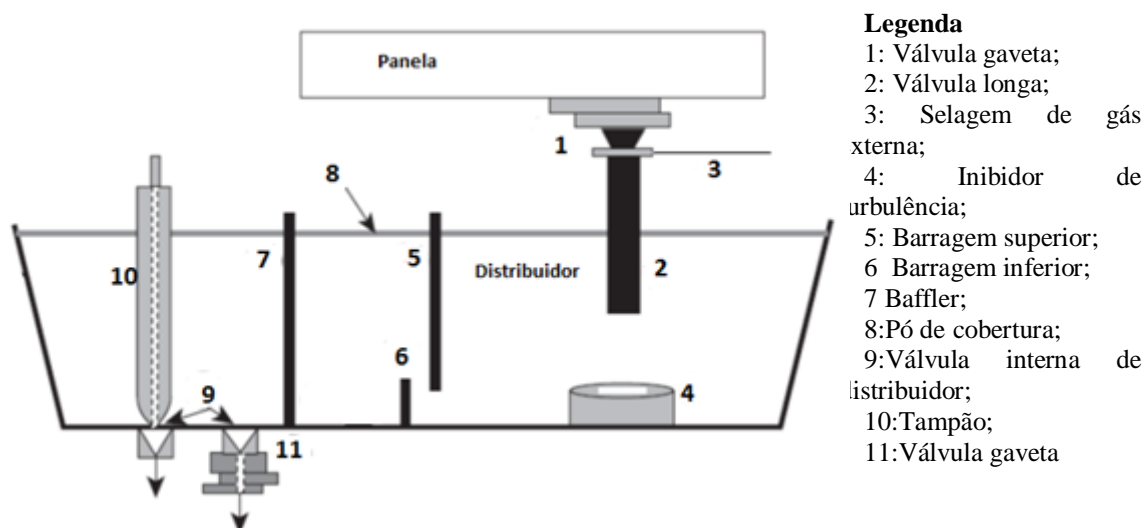


Figura 3.2 - Distribuidor de lingotamento contínuo com controladores e modificadores de fluxo (SCHADE et al., 2003).

Cada modificador de fluxo possui funções específicas. O Inibidor de Turbulência é responsável por concentrar a dissipação de energia do fluxo de aço, oriundo da panela, acarretando em aglomeração de inclusões e redução da perturbação da superfície do aço, evitando reoxidação ou emulsificação de escória. A barragem superior proporciona

que o fluxo de aço dentro do distribuidor passe somente por sua parte inferior para evitar a passagem de escória para próximo da válvula de saída, durante todo lingotamento, bem como durante a redução do nível de aço na troca de panela. A barragem inferior consiste em uma placa, normalmente de concreto refratário, instalada em um plano transversal do distribuidor, evitando a passagem direta do aço que sai da panela pela válvula de saída. A altura do dique pode chegar até 30% do nível de trabalho no distribuidor (MENDONÇA et al., 2016).

Os modificadores de fluxo são dimensionados para obter máximo grau de eficiência nas condições estacionárias do processo. Durante a partida, ocorrem o enchimento do distribuidor e posterior vazamento para o molde. No momento de enchimento, ocorre uma emulsificação do aço e um contato com a atmosfera. E durante o vazamento para o molde se estabelece um fluxo em conjunto com o enchimento do reator. Esta condição é tipicamente transiente e os modificadores de fluxo nem sempre serão efetivos para se evitar o surgimento de inclusões.

Além disso, é necessário entender se as inclusões presentes no aço nestes estágios iniciais do processo são provenientes dos processos de refino antecessores, ou devido à interação do aço com a atmosfera, ou são fruto da contaminação de resíduos remanescentes no distribuidor antes da partida, ou dessas combinações. Neste sentido, entender os tipos de inclusão e suas origens no processo é importante para o desenvolvimento das estratégias adequadas ao início do processo.

Neste contexto, serão discutidas as condições durante a partida que devem ser levadas em consideração para a avaliação da incorporação de inclusões, bem como sua distribuição nas primeiras placas. Assim, nesta etapa de revisão bibliográfica pretende-se abordar os aspectos relacionados às inclusões presentes no aço, e os métodos para sua identificação e caracterização química e física, além daqueles que relacionam a limpidez do aço com práticas operacionais, especialmente nas etapas iniciais do processo.

3.1 Inclusões não metálicas em aços

Inclusões não-metálicas são fases vítreo-cerâmicas (óxidos, sulfetos e nitretos) incorporadas à matriz metálica do aço (MAPELLI, 2008). As inclusões causam a interrupção da continuidade dessa matriz metálica, o que provoca danos às propriedades mecânicas do aço, dentre elas: redução na resistência ao impacto, na tenacidade à fratura, na resistência à fadiga e também à corrosão (ALVES, 2014).

As inclusões não metálicas costumam ser divididas pelo seu tamanho em micro e macro inclusões. A presença de micro inclusões pode ser tolerada, pois não necessariamente elas têm efeito nocivo nas propriedades do aço (MORAIS, 2006). Problemas podem surgir nos produtos quando quantidades significativas de grandes inclusões (entre 20 e 150 μm) surgem no produto (FACO, 2005). Como referência, na Tabela 3.1 são mostradas as restrições de tamanho de inclusões para diferentes tipos de aços, com base em aplicações específicas.

Tabela 3.1 - Típico condicionamento de limpeza do aço para atender às várias aplicações na indústria (ZHANG e THOMAS, 2002).

Tipo de produto	Fração Máxima de Impureza	Tamanho máximo de inclusão
Aço automotivo e para estampagem extra profunda	[C] \leq 30ppm. [N] \leq 30ppm.	100 μm
Aço para latas e estampagem	[C] \leq 30ppm; [N] \leq 30ppm. [O] \leq_{Total} 20ppm.	20 μm
Tubo para petróleo	[S] \leq 30ppm; [N] \leq 35ppm. [O] \leq_{Total} 30ppm.	100 μm
Aço para rolamento	[O] \leq_{Total} 10ppm.	15 μm
Fio para Pneus (Tire cord)	[H] \leq 2ppm; [N] \leq 40ppm. [O] \leq_{Total} 15ppm.	10 μm 20 μm
Aço Chapas Grossas.	[H] \leq 2ppm; [N] \leq 30-40ppm. [O] \leq_{Total} 20ppm.	Inclusões simples de 13 μm e <i>Cluster</i> de 20 μm
Fio máquina	[N] \leq 30ppm. [O] \leq_{Total} 30ppm.	20 μm

Além do tamanho, a forma com que as inclusões não metálicas estão distribuídas no produto laminado é fundamental para a falha deste produto em uso. Pequenas inclusões causam pouco efeito, se estiverem bem distribuídas ao longo da matriz metálica. Todavia, se estiverem concentradas em uma região ou aglomeradas na forma de “nuvens”, mesmo as inclusões pequenas podem trazer problemas para determinadas

aplicações do aço. O danoso efeito das inclusões na propriedade final dos produtos tem levado os aciaristas a buscarem o entendimento da origem das inclusões no processo. As inclusões são classificadas como endógenas e exógenas. As inclusões endógenas são aquelas formadas como produtos da desoxidação do aço durante seu processo de fabricação. Inclusões exógenas são aquelas originadas a partir de indesejadas interações químicas ou mecânicas entre o metal líquido e refratários, escória ou ainda com a atmosfera (FINARDI, 1989).

As inclusões não-metálicas apresentam as seguintes origens (NAKASHIMA; TOH, 2013):

- a) Produtos da desoxidação do aço que são formados a partir de reações químicas podendo ser óxidos ou sulfetos;
- b) O resfriamento e solidificação do aço podem dar origem à precipitados classificados como inclusões;
- c) Reações químicas durante a adição de ligas utilizadas no processo;
- d) Produtos da reoxidação do aço quando em virtude da interação pelo contato com ar, escória e refratário;
- e) Entrada de escória na panela, distribuidor ou molde;
- f) Entrada de material no aço advindo da erosão de refratários da panela e distribuidor.

As inclusões endógenas formadas pelo produto da desoxidação ou na solidificação são inevitáveis e intrínsecas do processo de fabricação do aço e, normalmente, não podem ser completamente eliminadas. Sendo assim, busca-se o controle adequado de sua fração volumétrica e tamanho médio de forma a evitar problemas no produto final (MAPELLI, 2008).

As inclusões das demais origens, denominadas exógenas, podem ser prevenidas com controles de processo adequados como, por exemplo, a inertização de distribuidor (BRAGA, 2015). Como características principais as inclusões exógenas apresentam grande tamanho, pequeno número e estão distribuídas de maneira não uniforme no aço (ZHANG; TOMAS, 2002).

Do ponto de vista do presente trabalho a maior preocupação está associada às inclusões exógenas, principalmente aquelas geradas pela reoxidação do aço, devido ao contato com o ar atmosférico no início do processo de lingotamento.

3.2 Influência das inclusões nas propriedades do aço

O efeito nocivo das inclusões, que prejudicam a aplicação do aço em determinadas situações, se deve ao fato de que elas possuem propriedades divergentes da matriz de aço, como plasticidade e coeficiente de expansão térmica, o que resulta em um comportamento próprio em termos de tensões mecânicas e térmicas, em comparação com a matriz de aço (VAN ENDE, 2010). Óxidos e sulfetos se enquadram como as principais inclusões que afetam as propriedades mecânicas.

De fato, quando o aço é produzido nas aciarias e solidificado nos processos de lingotamento contínuo, as inclusões irão apresentar aspecto distinto daquele no produto final. Os produtos são processados mecanicamente, o que transforma o aspecto final das inclusões de acordo com sua resistência e plasticidade.

A Figura 3.3 mostra o comportamento de diversos tipos de inclusões em dois casos, antes e depois do processo de laminação. Em cada caso é observado que a matriz apresenta forte tendência a deformar-se em torno da inclusão durante o processo de deformação, criando cavidades oriundas de tensões mecânicas (SIMENSEN, 1992). A Tabela 3.2 mostra a influência das impurezas mais comuns nas propriedades mecânicas do aço.

Tipo de inclusão	Forma característica no produto lingotado	Forma característica no produto laminado
Sulfetos MnS		
Alumina Al ₂ O ₃		
Aluminato de cálcio C ₁₂ A ₇ ou 12CaO·7Al ₂ O ₃		
Aluminato de cálcio CA ₂ ou CaO·2Al ₂ O ₃		
Aluminato de cálcio C ₁₂ A ₇ com anel de sulfeto		
Silica SiO ₂		

Figura 3.3 - Representação do comportamento das inclusões antes e depois da laminação (SIMENSEN, 1992)

A ocorrência de defeitos superficiais ou internos, que causam a desqualificação de produtos ainda no processo produtivo, é uma preocupação para os aciaristas, pois tais ocorrências levam a quedas de produção e aumento dos custos de produção, sendo necessária a reposição de novos lotes de produtos para repor os produtos recusados. A preocupação principal é a deterioração das propriedades do aço, do ponto de vista de aplicação dos produtos.

Tabela 3.2 - Influência das impurezas mais comuns nas propriedades mecânicas do aço (ZHANG e THOMAS, 2002)

Elemento	Forma	Propriedades mecânicas afetadas
S, O	Inclusões de óxidos e sulfetos	Ductilidade, Tenacidade ao impacto e Anisotropia; Plasticidade (alongamento, redução de área e dobramento); Forjabilidade a frio, estampabilidade; Tenacidade a baixas temperaturas; Resistência à fadiga.
C, N	Solução sólida	Temperabilidade.
	Perlita e Cementita	Dispersão (reforçada), ductilidade e tenacidade (diminuída).
	Precipitados de nitretos e carbonetos	Precipitação, refino de grão e tenacidade (reforçados); Fragilização por precipitação intergranular.
P	Solução sólida	Endurecimento da liga intensificada pela formação de martensita; Fragilização.

A Figura 3.4 mostra o efeito causado por inclusões de alumina em bobina de aço processado em linha de laminação a frio, sendo que o defeito somente é observado após a laminação do produto.



Figura 3.4 - Efeito causado por inclusões de alumina em bobina de aço (NASCIMENTO, 2008)

3.3 Desoxidação

O controle da desoxidação é importante para garantir a limpidez adequada ao aço, característica essa ligada diretamente ao conceito de qualidade do aço (NUSPL, 2004). O processo de desoxidação se dá através da adição de um elemento com alta afinidade pelo oxigênio com finalidade de reduzir o seu teor dissolvido no aço, podendo originar mais inclusões nesse processo.

O processo de desoxidação é dividido em simples ou complexo. Quando se usa um desoxidante apenas, o processo é denominado simples, obtendo um óxido puro como produto de sua desoxidação. Quando mais de um desoxidante é empregado, a desoxidação é chamada complexa, sendo que o produto de desoxidação nesse caso é uma solução de óxidos, em que a atividade de cada componente óxido é menor do que 1 (CHOUDHARY, 2002).

As três categorias de desoxidação de aços são mostradas na Figura 3.5.

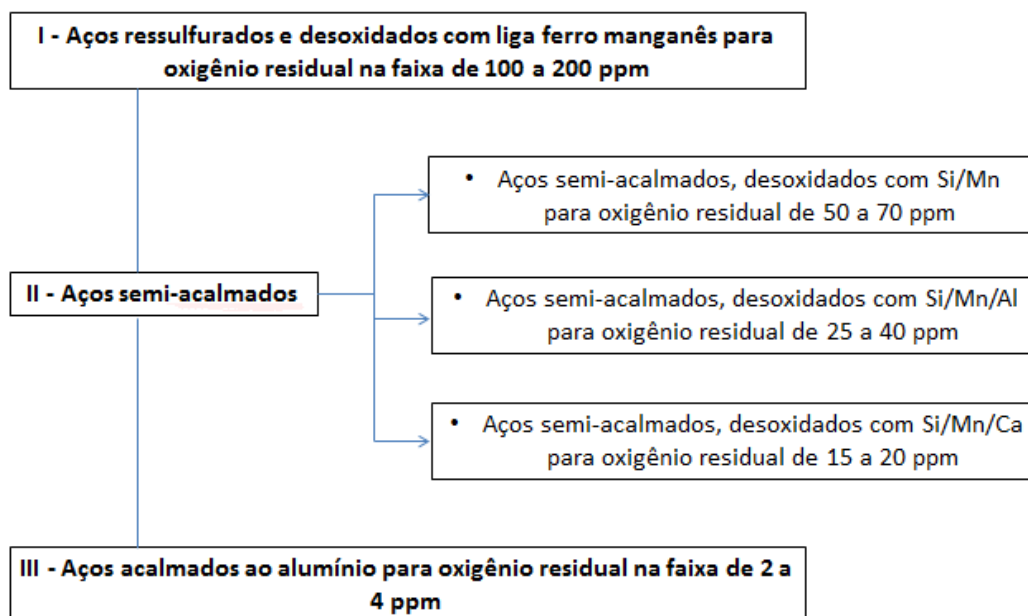
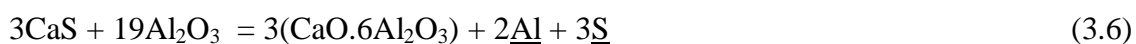


Figura 3.5 - Categorias de desoxidação de aços (TURKDOGAN, 1996)

Na sequência, estão as principais reações de desoxidação e os valores de variação de energia livre de Gibbs padrão (kJ/mol) conforme mostrado nas equações (3.1) a (3.5) (XIAOBING, 2004).



Quando a injeção de Ca é realizada com o intuito de se modificar Al_2O_3 em $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$, a seguinte reação é utilizada, conforme equação (3.6) (LARSEN; FRUEHAN, 1990).



3.4 Classificação das inclusões quanto à composição química

As inclusões não metálicas podem ser agrupadas em óxidos, sulfetos, silicatos, nitretos e fosfatos. As inclusões ligadas ao oxigênio são divididas em óxidos livres, espinélios e silicatos (MAPELLI, 2008).

Uma ferramenta fundamental para descrever a composição química das inclusões não metálicas formadas por óxidos é o diagrama ternário de fase. Na Figura 3.6 é mostrado o diagrama ternário do sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MnO-SiO}_2$.

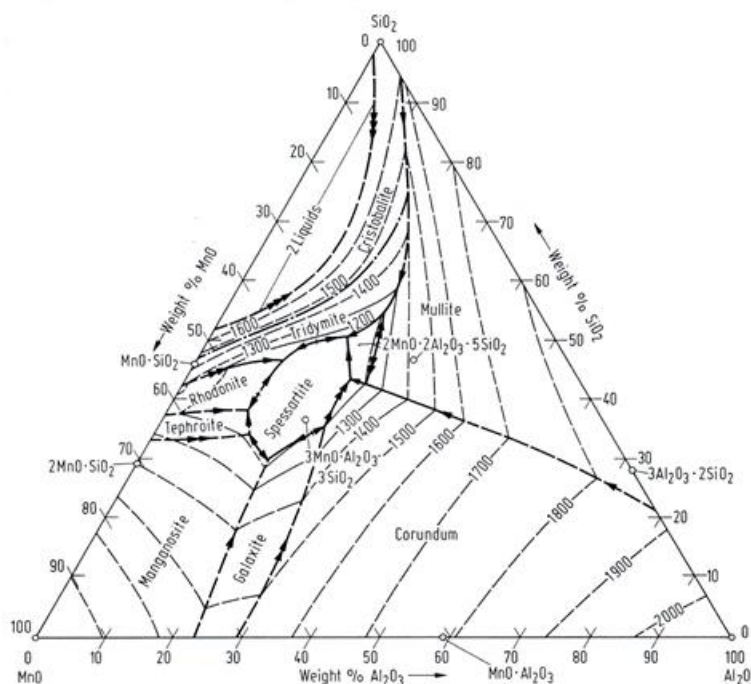


Figura 3.6 - Diagrama de fases do sistema ternário $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MnO-SiO}_2$ (SLAG ATLAS, 1981)

Para facilitar a identificação, as inclusões podem ser agrupadas com base em três características ópticas predominantes: cor, refletividade e reação à luz polarizada, se enquadrando nas seguintes categorias gerais, sendo que algumas inclusões podem pertencer à múltiplas categorias (HERRING, 2009).

- $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$;
- $\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{O-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$;
- $\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{O-SiO}_2\text{-CryAl}_2\text{-yO}_3$;
- Fe_xO_y (óxidos);
- Fe_xO_y (óxidos) + Metais de transição (lantanídeos, Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta);
- $\text{MgO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$;

- MnO-SiO₂-Al₂O₃;
- MnS (sulfetos);
- Se + Te.

As inclusões de nitretos são em sua maioria formadas por TiN, que possuem formato prismático, cujas bordas agem agravando as tensões que são desenvolvidas na interface entre a inclusão não metálica e a matriz metálica. Por fim, os sulfetos são frequentemente a consequência do tratamento com cálcio aplicado para modificar as inclusões de óxido, mas as pequenas e dispersas inclusões de CaS formadas podem ser prejudiciais para o processo de lingotamento (entupimento de válvula submersa). Por sua vez, as inclusões não metálicas de MnS (modificadas pela combinação com CaS) são utilizadas para melhorar a performance da ferramenta de corte. NUSPL (2004) apresenta uma classificação que engloba quase todos os tipos de inclusões em aços, exceto óxidos de ferro e fosfetos (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 - Classificação química dos tipos de inclusões presentes em aços (NUSPL, 2004)

Classe	Tipo de inclusão	Descrição
1	Al ₂ O ₃	Inclusão de alumina
2	CA	Aluminato de cálcio
3	CA-CaS	Aluminato de cálcio com sulfeto de cálcio
4	CA-(Ca,Mn)S	Aluminato de cálcio com sulfeto de cálcio-manganês
5	MgO.Al ₂ O ₃	Espinélio de magnésio
6	MnO.Al ₂ O ₃	Espinélio de manganês (galaxita)
Classe	Tipo de inclusão	Descrição
7	Mn-Silicato	Silicato de manganês
8	Al-Silicato	Silicato de alumínio ¹
9	Mn-Al-Silicato	Silicato de manganês e alumínio
10	CaO-CaS	Óxido de cálcio ou óxido de cálcio com sulfeto de cálcio
11	(Mn,Fe)S	Sulfeto de manganês e ferro
12	TiS	Sulfeto de titânio
13	(Mn, Fe, Ti)S	Sulfeto de manganês-ferro-titânio
14	CaS	Sulfeto de cálcio
15	(Mn, Fe, Ca, Ti, Mg) S	Sulfeto de manganês-ferro-cálcio-titânio-magnésio
16	OS	Oxissulfeto (óxido endógeno com sulfeto)
17	OCN	Oxicarbonitreto
18	OCN-S	Oxicarbonitreto com sulfeto
19	CN	Carbonitreto
20	CN-S	Carbonitreto com sulfeto
21	Exógena+Na	Inclusão exógena contendo sódio
22	Exógena	Inclusão exógena
23	Desconhecida	Partícula não classificada

3.4.1 Alumina

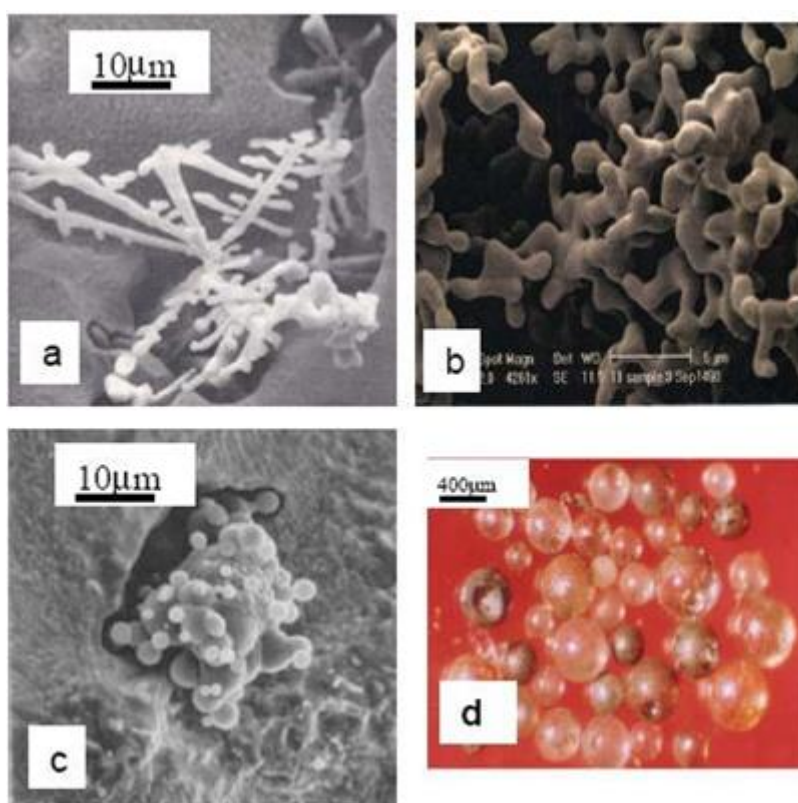
Do ponto de vista do processo de lingotamento contínuo e dos principais problemas associados a presença de inclusões, a alumina apresenta especial destaque. Esta é encontrada no aço onde o alumínio é adicionado tipicamente para controlar o tamanho do grão ou como um desoxidante. Também pode ser transportado para aços a partir de refratários, caso em que as inclusões tendem a ser maiores e isoladas. Ela se origina durante o vazamento da corrida e da transferência do aço líquido do conversor para a panela, na etapa de desoxidação, onde são utilizados desoxidantes como alumínio.

Ela também pode surgir durante a exposição do aço líquido à atmosfera, onde o aumento de oxigênio no banho se dá através de grande agitação de aço na panela, ou através do arraste de ar por entre as conexões do sistema de válvula longa e válvula submersa (MILLMAN, 2004), sendo que sua formação também causa a obstrução desta. A obstrução é evidenciada pela elevação da posição do tampão em relação à válvula para permitir uma maior passagem de aço compensando a redução do diâmetro disponível na mesma. A obstrução então envolverá duas etapas: na primeira etapa, forma-se uma camada compacta de óxidos devido à interação entre alguns elementos presentes no aço com o material refratário; na segunda, as inclusões são depositadas e acumuladas sobre esta camada de óxidos, contribuindo para a formação de inclusões não metálicas ($\text{Al}_2\text{O}_{3(s)}$) por reação entre o metal líquido e o material refratário da válvula submersa. O aspecto de uma válvula obstruída é mostrado na Figura 3.7.

Na Figura 3.8 é mostrada a morfologia, a composição e as dimensões típicas de inclusões de alumina. As Figuras 3.8(b) e 3.8(c) mostram inclusões dendríticas formadas durante a desoxidação do aço líquido, que cresceram por colisões e aglomeração de *clusters*. A Figura 3.8(d) mostra inclusões globulares formadas durante o aprisionamento e o arraste de escória para o banho, no momento da transferência do aço líquido da panela para o distribuidor (MENDONÇA, 2016).



Figura 3.7 - Aparência interna de uma válvula submersa que apresentou obstrução (YANG et al., 2011)



Legenda:

- (a) estrutura dendrítica;
- (b) estrutura em forma de coral;
- (c) aglomerados partículas;
- (d) grandes óxidos complexos

Figura 3.8 -Morfologia, composição e tamanhos típicos de inclusões de alumina (ZHANG e THOMAS, 2003)

3.4.2 Aluminatos de cálcio

A adição de cálcio no aço é realizada com o intuito de controlar a composição, morfologia e tamanho das inclusões. A obstrução de válvula causada pode ser contida adicionando cálcio para transformar as inclusões de alumina presentes em aluminatos de cálcio líquidos na temperatura de lingotamento (KAY, 1985). As reações no processo de refino devido à adição de Ca-Si, são mostradas nas equações 3.8 e 3.9 (PIELET; BHATTACHARYA, 1986).



Sua origem está relacionada ao tratamento do aço com cálcio, onde a alumina é convertida para aluminato de cálcio, ou como resultado da interação da alumina no aço líquido com escória da panela e/ou distribuidor. A partir da reação (3.9), outras reações surgem dando origem a inclusões de cálcio aluminato com diferentes concentrações dos compostos. Na Figura 3.9 é mostrado o diagrama do sistema CaO-SiO₂-Al₂O₃, que representa cinco principais tipos de composições de cálcio aluminato formadas no processo de fabricação do aço: 3CaO.Al₂O₃, 12CaO.7Al₂O₃, CaO.Al₂O₃, CaO.2Al₂O₃, CaO.6Al₂O₃ (FACO, 2005).

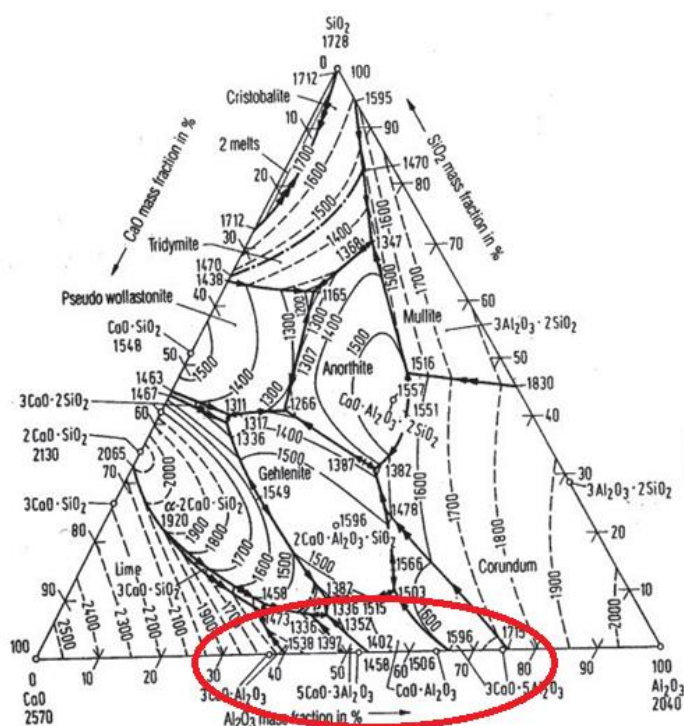


Figura 3.9 - Diagrama ternário de fase do sistema CaO-SiO₂-Al₂O₃ (MAPELLI, 2008), mostrando os cinco principais tipos de composições de cálcio aluminato (FACO, 2005).

Outra finalidade da adição de Ca-Si no processo é a formação do eutético com baixo ponto de fusão, para evitar a deposição de alumina nas válvulas, facilitando escoamento do mesmo, conforme é mostrado na Figura 3.10.

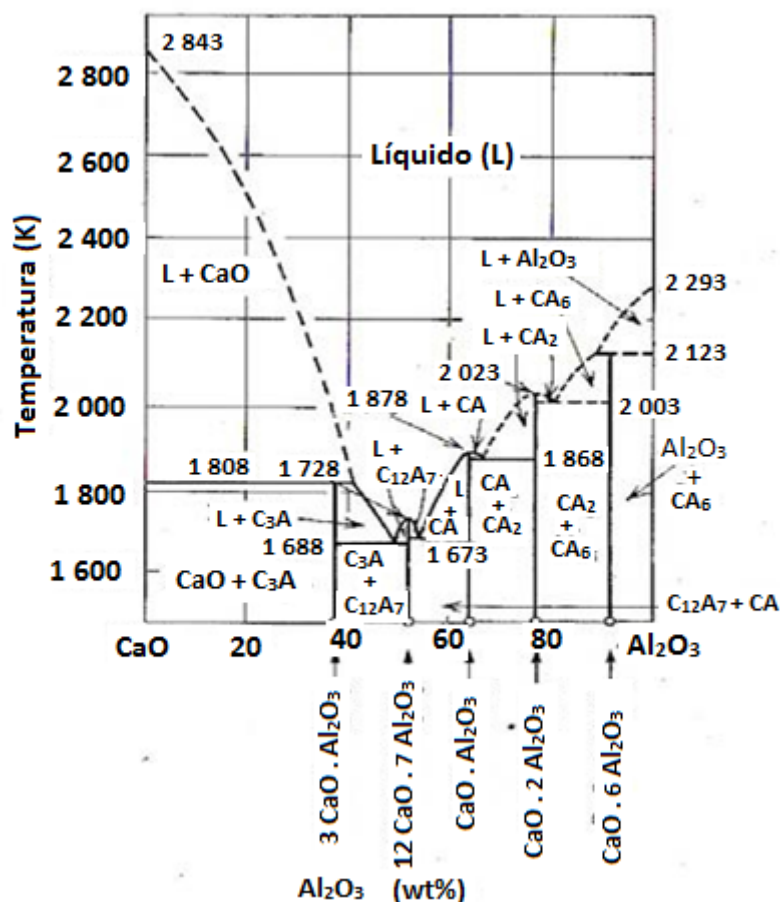


Figura 3.10 - Diagrama binário CaO-Al₂O₃, mostrando eutético formado após a adição de cálcio no aço (OTOTANI, 1986).

A adição de cálcio está relacionada com a lingotabilidade, que diz respeito às características de fluidez e resfriamento do aço bem como o grau de obstrução das válvulas do distribuidor. BIELEFELDT (2005) definiu que esta facilidade para o aço percolar a válvula refratária com adequada vazão se dá o nome de lingotabilidade.

De acordo com a Figura 3.11, no intervalo entre 0,6 e 1,0 tem-se a melhor lingotabilidade possível. A lingotabilidade piora consideravelmente quando há baixos teores de Ca na composição das inclusões e só começa a melhorar quando há a presença da primeira fase líquida, momento que a relação $\text{Ca}/\text{O}_{\text{total}}$ atinge aproximadamente 0,4 (PIRES; GARCIA, 2004).

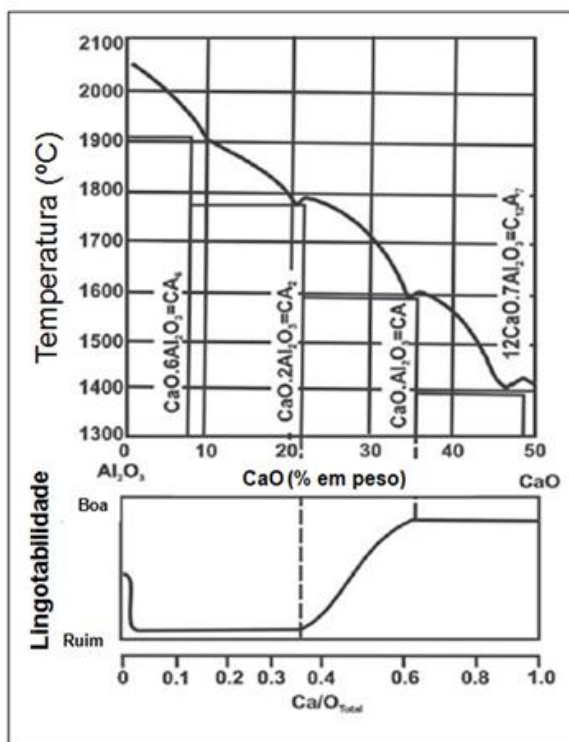


Figura 3.11 - Lingotabilidade do aço dependendo da composição das inclusões (PIRES e GARCIA, 2004)

Clogging é o acúmulo de impurezas na válvula submersa. Esse acúmulo é causado principalmente por inclusões de alumina. O comportamento associado ao *clogging*, erosão ou lingotamento estável em função da composição das inclusões, foram dispostas em um ternário Ca-Al-S, como pode ser observado na Figura 3.12.

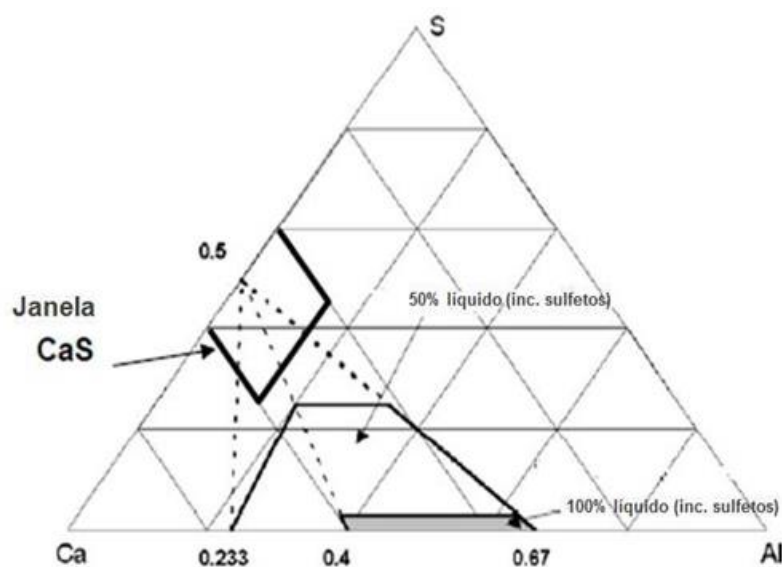


Figura 3.12 - Inclusões líquidas de óxido indicadas em um diagrama ternário CaO-Al₂O₃-S (STORY *et al.*, 2004)

Conforme a Figura 3.12, o campo para 100% de inclusões líquidas situa-se entre 0,4 e 0,67 de fração molar de Al, no eixo Ca-Al. Para 50% de inclusões líquidas, a fração molar de Al compreendida é de 0,233 a 0,67. Ambas as faixas descritas acima são conectadas à fração molar de 0,5 de S, no eixo Ca-S, correspondendo à composição estequiométrica de CaS. A região que contém uma grande quantidade de inclusões de CaS é denominada janela de CaS. O lingotamento possui um comportamento estável em uma região triangular com composição de Al de 0,233 e 0,67, e S de 0,5. O *clogging* da válvula da panela ocorre à direita dessa região, sendo que à esquerda o comportamento esperado é de erosão do refratário (STORY *et al.*, 2004).

Nas Figuras 3.13 a 3.15 são mostradas as análises de três corridas, onde se observa os comportamentos de erosão, lingotamento estável e *clogging*, respectivamente, em função da posição das inclusões no diagrama ternário. Óxidos como FeO, MnO e SiO₂ presentes na escória da panela, promovem uma reoxidação após a adição de CaSi, o que leva a um enriquecimento de Al₂O₃ nas inclusões ao longo do tempo, reduzindo a estabilidade do CaS e dos aluminatos ricos em Ca (STORY *et al.*, 2004).

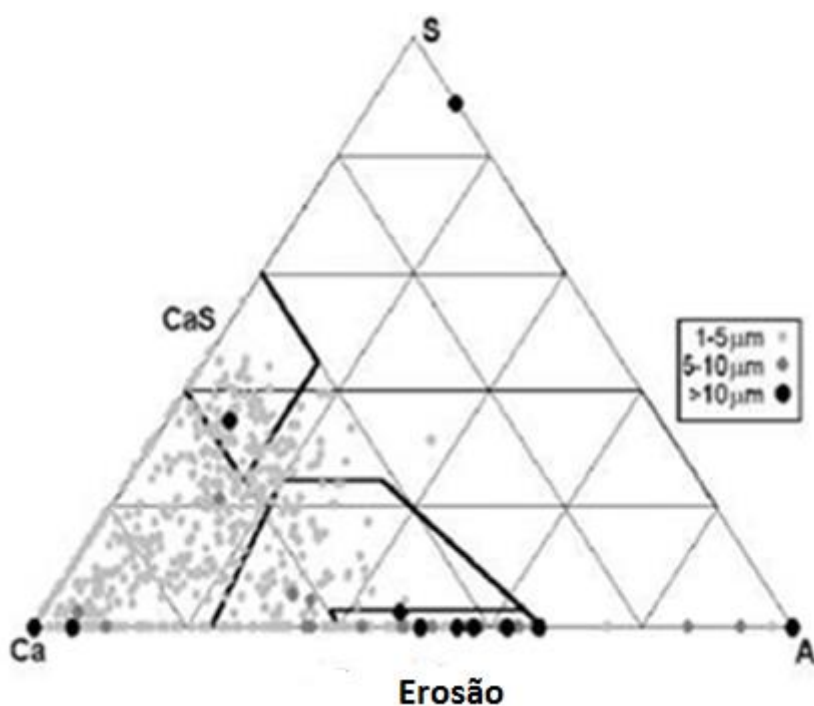


Figura 3.13 - Composição das inclusões para os comportamentos de erosão (STORY *et al.*, 2004)

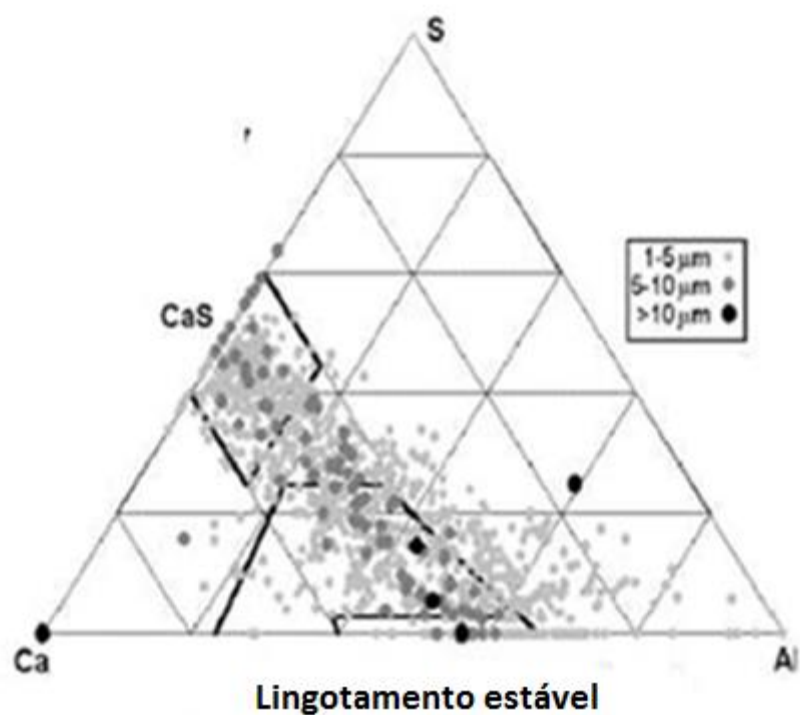


Figura 3.14 - Composição das inclusões para os comportamentos de lingotamento estável (STORY et al., 2004)

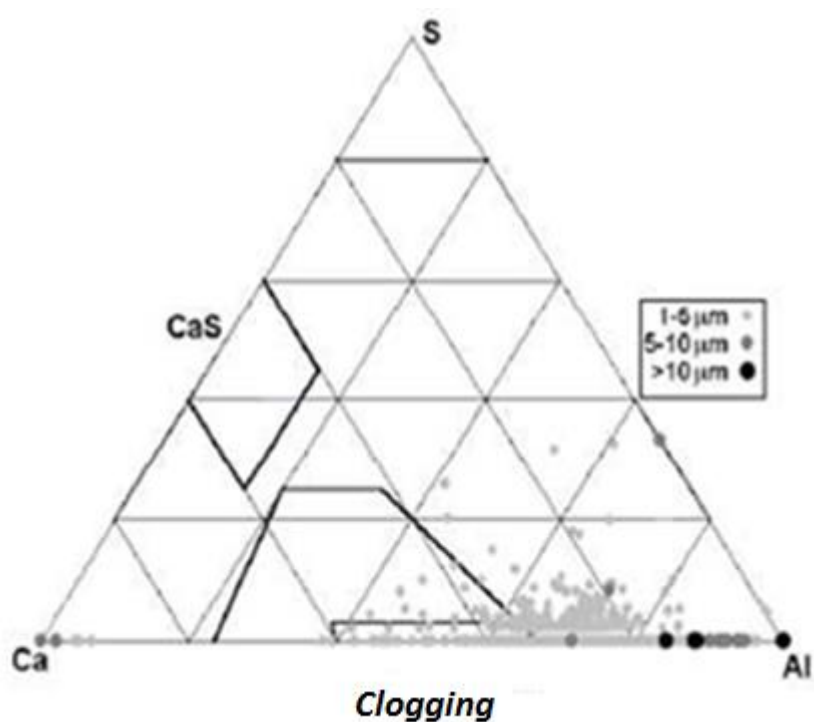


Figura 3.15 - Composição das inclusões para os comportamentos de *clogging* (STORY et al., 2004)

O campo onde se atingem inclusões líquidas é chamado de janelas de lingotabilidade (KIRSCH-RACINE et al., 2007). A Figura 3.16 apresenta um esquema de uma janela de lingotabilidade, onde a janela é composta de inclusões totalmente líquidas na temperatura de 1600°C. À esquerda da janela estão as inclusões sólidas de aluminato, pobres em CaO, e à direita tem-se a formação de inclusões sólidas de CaS. Os fatores principais que alteram o tamanho da janela líquida são os teores de Al, S e a temperatura do aço (DAVIES; MORGAN, 1985).

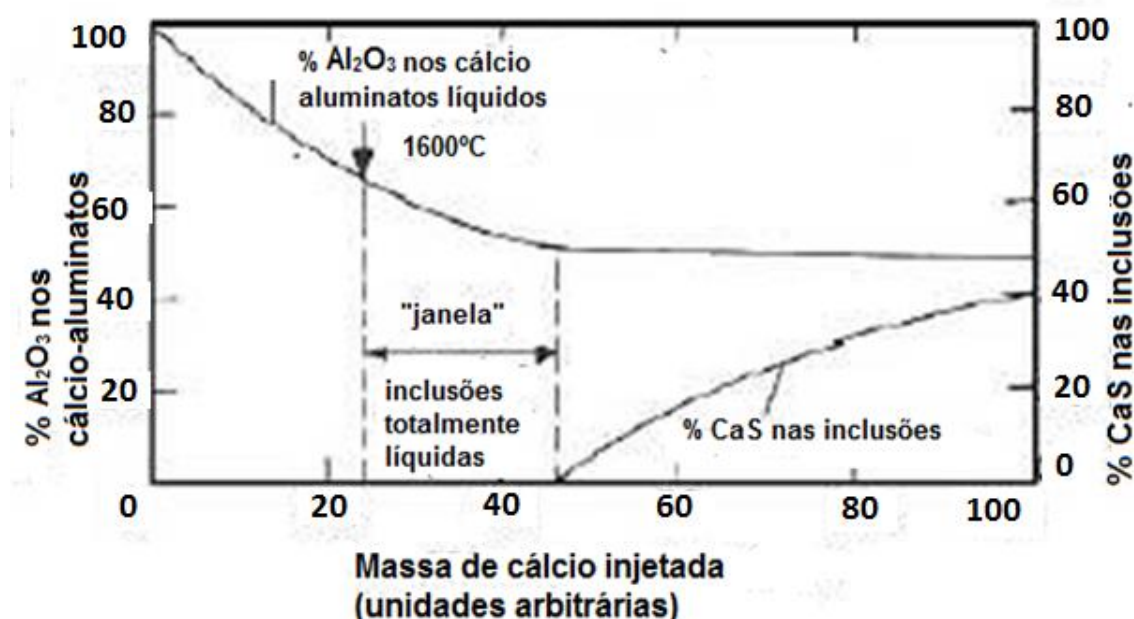
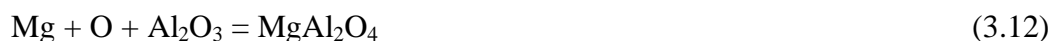


Figura 3.16 - Mudança na composição das inclusões com a adição de Ca (DAVIES e MORGAN, 1985)

3.4.3 Espinélios

São complexas inclusões do sistema MgO-SiO₂-Al₂O₃ que usualmente são de MgO e Al₂O₃ sendo formadas a partir de refratários (tijolos de convertedor ou panela, e massas utilizadas em reparos na aciaria), sendo inclusões caracterizadas como de origem exógena, podendo causar obstrução durante o lingotamento contínuo.

Logo, a decomposição de refratários à base de MgO pode resultar na formação de inclusões de espinélio, que é frequentemente observado em válvulas obstruídas de aços tratados ao cálcio. A decomposição do MgO dos refratários é auxiliada pela baixa atividade do oxigênio, conforme equações 3.10 a 3.12 (DEKKERS et al., 2004).



As inclusões contendo MgO e Al_2O_3 são encontradas nas seguintes formas (SICHEN et al., 2004).

- MgO puro – gerado a partir de fragmentos de revestimento de panela;
- $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ – gerado a partir da escória de panela;
- Espinélio + óxido sólido – gerado a partir da reação de $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ com o metal;
- MgO + solução sólida – gerado a partir da escória de panela.

A Figura 3.17(a) mostra que uma quantidade significativa de MgO pode ser dissolvida em aluminatos de cálcio líquidos. Para aluminatos líquidos existirem a 1600°C , o teor de Al_2O_3 deve estar entre 39 e 67% em massa. Aplicando a regra da alavanca para as linhas entre o ponto de composição do espinélio (MA, onde M=MgO e A= Al_2O_3) e os limites dos aluminatos líquidos, concluiu-se que de 19 a 49% de MA se dissolve em aluminatos líquidos a 1600°C . Na Figura 3.17 (b), observa-se que até 12,5% de MgO pode se dissolver em inclusões C12A7 a 1600°C estando ainda estas no campo de 100% líquido (DEKKERS et al., 2004).

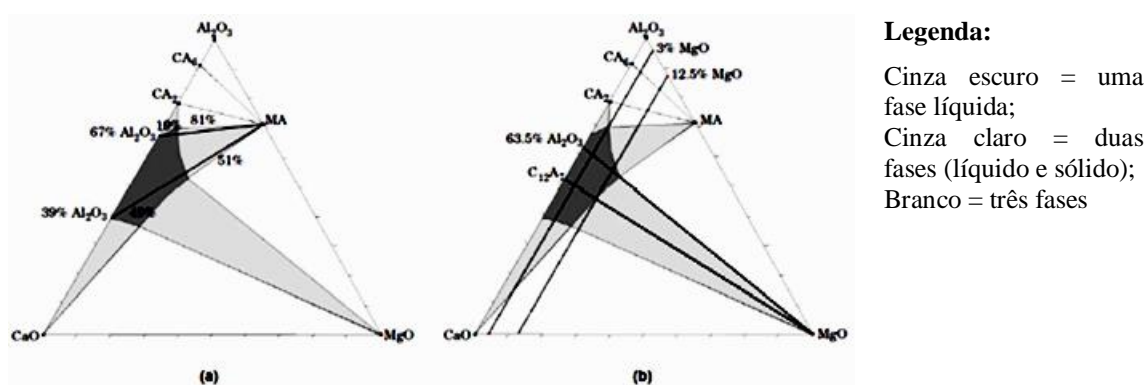
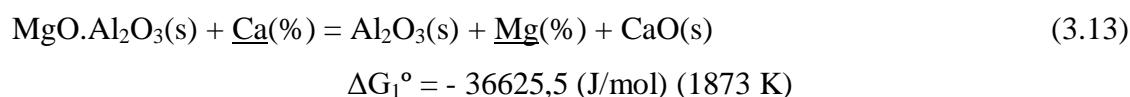


Figura 3.17 - Corte isotérmico a 1600°C no ternário $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}$. (DEKKERS et al., 2004)

Apenas as inclusões de $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ e de uma fase de espinélio envolvida por uma solução de Al_2O_3 - CaO - MgO são encontradas no banho após a desoxidação. Nesse estágio, a concentração de alumina presente no $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ aumenta, sendo o resultado natural do aumento da atividade de alumínio no banho durante a desoxidação. A equação (3.13) é uma evidência da existência da inclusão de espinélio + óxido sólido após a desoxidação, onde se o metal líquido não conter Ca, a fase $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ começaria a se decompor. Por outro lado, a presença de Ca dissolvido no banho levaria à redução da fase espinélio (SICHEN et al., 2004).



A cromita ($\text{MnO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ ou $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$) é um espinélio encontrado em aços cromo ou onde a liga de ferro-cromo foi adicionada. As partículas são angulares, com tendência a segregar. O aluminato de ferro ($\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) é um espinélio encontrado em aços desoxidados com alumínio. As inclusões são encontradas em aços como “ripas” ou cristais e normalmente são observadas com inclusões de óxido de ferro (FeO).

Na Figura 3.18, à medida que o cálcio é adicionado ao aço, há um decréscimo no teor de MgO e Al_2O_3 , onde o Mg é substituído pelo Ca adicionado para a modificação das inclusões (YANG et al., 2011).

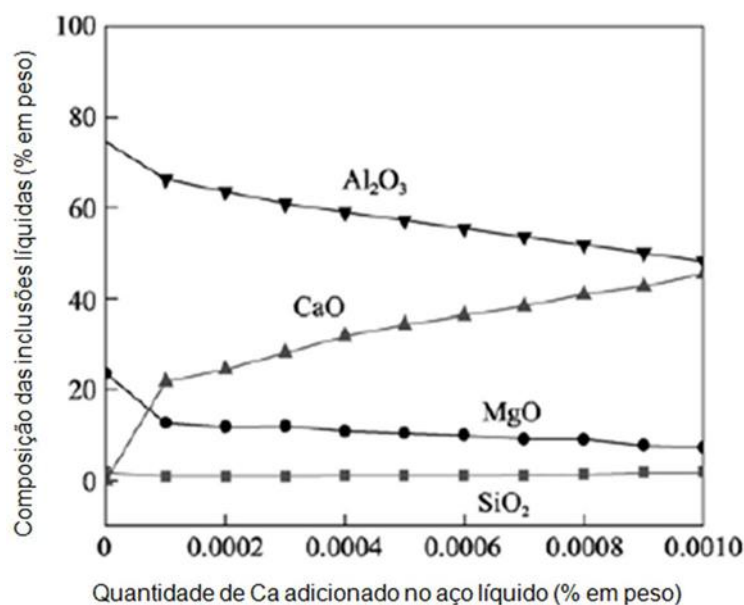


Figura 3.18 - Relação entre a quantidade de Ca adicionado e a composição das inclusões líquidas (YANG et al., 2011)

Apesar da redução do teor de MgO das inclusões, pequenas quantidades de MgO remanescentes nelas são suficientes para alterar fortemente o campo de inclusões líquidas no ternário CaO-MgO-Al₂O₃.

3.4.4 Sulfetos

O sulfeto de manganês é o tipo mais comum de inclusão encontrado. De acordo com a análise baseada em produtos de aço contendo 0,01-0,15% de enxofre, a morfologia pode ser classificada em três tipos (KIESSLING; LANGE, 1966):

Tipo I – ocorrem em aços acalmados por silício (ou aços acalmados incompletamente com alumínio, zircônio ou titânio). MnS são globulares com uma ampla gama de tamanhos.

Tipo II – ocorrem em aços acalmados por alumínio, possuindo uma estrutura dendrítica (o MnS é formado nos contornos de grãos).

Tipo III – ocorrem em quantidades excessivas de alumínio presentes ou se magnésio é usado como desoxidante. Elas são angulares e sempre se formam como inclusões monofásicas.

Inclusões esféricas maciças são encontradas em aços de alto teor de enxofre. Neste tipo de aço, os baixos teores de silício proporcionam inclusões com a melhor relação comprimento / largura para uma usinabilidade ideal.

Sulfeto de alumínio (Al_2S_3) é encontrado em aços desoxidados com grandes quantidades de alumínio. Essas inclusões são menos solúveis no aço em comparação com o sulfeto de manganês. O sulfeto de ferro é encontrado em aço com baixo teor de manganês e alto teor de enxofre (relação Mn:S <4). No material solidificado, é frequentemente observado nos limites dos grãos. O sulfeto de zircônio (ZnS_2) é encontrado em aços desoxidados com zircônio. No material laminado, as inclusões são globulares (HERRING, 2009).

3.5 Aspectos técnicos e operacionais da partida de distribuidor

O processo de lingotamento contínuo apresenta diversos pontos que são fontes de contaminação para o aço líquido, da sua saída na panela até sua chegada ao molde.

A seguir são enumeradas resumidamente as etapas dessa operação:

- 1) Abertura da válvula gaveta da panela;
- 2) Vazamento de aço líquido da panela para o distribuidor;
- 3) Elevação do nível de aço no distribuidor, pois a válvula submersa é mantida fechada;
- 4) Adição do pó de cobertura do distribuidor;
- 5) Abertura da válvula submersa, após o nível de aço atingir um valor determinado;
- 6) Enchimento do molde, onde a barra falsa fecha seu fundo;
- 7) Adição de pó fluxante no molde;
- 8) Extração da barra falsa que fechava o molde, iniciando assim o lingotamento.

Durante a partida da máquina de lingotamento, sob regime estacionário, o aço líquido fica propenso a diversas formas de contaminação (SASAI; MIZUKAMI, 2000).

A abertura instantânea da válvula gaveta da panela é facilitada pelo uso de areia, mas mesmo com essa técnica, pode ser que não ocorra a livre abertura da válvula. Nesse caso, é realizada a abertura manual com utilização de lança de oxigênio, onde em um primeiro momento, não há a utilização de válvula longa. O efeito nocivo dessa manobra

é a contaminação do aço líquido pela sua interação com o oxigênio da lança e do próprio ar atmosférico. A abertura manual da panela ainda causa risco aos trabalhadores devido ao *splash* de aço na operação, podendo ocorrer contaminação tanto pela areia de abertura quanto por passagem de escória da panela para o distribuidor (NAKASHIMA, 2007).

O pó de cobertura utilizado no distribuidor tem a função de proteger o aço contra o contato da atmosfera, evitando assim o aparecimento de inclusões formadas a partir da reoxidação (SASAI; MIZUKAMI, 2000). Pode ocorrer contaminação do aço enquanto o material de cobertura não o cobre completamente. Logo, o momento da adição deve ser realizado com cuidado, pois se for efetuado antes da estabilização da superfície do aço, poderá gerar emulsificação fazendo com que o pó de cobertura seja incorporado ao aço (RICHAUD, 2014).

Quanto mais se aumenta o tempo de espera para a adição de pó, maior será a concentração de inclusões, formadas principalmente por Al_2O_3 , conforme Tabela 3.4, especialmente nos primeiros 15 minutos de operação de lingotamento em aços ultra baixo carbono (UBC). Isso mostra que a geração dessas inclusões é em decorrência da reoxidação do aço durante o preenchimento inicial do distribuidor. As inclusões do tipo espinélio $Al_2O_3 \cdot xMgO$ geralmente aumentam em função do tempo de lingotamento para a primeira corrida no distribuidor. Acredita-se que seja devido ao aprisionamento de inclusões existentes de $Al_2O_3 \cdot xMgO$ pela reoxidação baseada na alumina recém-formada (STORY *et al.*, 2009).

Tabela 3.4 - Principais tipos de inclusão em aços UBC contendo Ti (STORY *et al.*, 2000)

Tipos de inclusão	% de Composição atômica
Al_2O_3	Al>50
$Al_2O_3 \cdot xMgO$ (espinélio)	Al>30, Mg>5 e Al+Mg+O>80
$Al_2O_3 \cdot xTiO_2$	Al>30, Ti>5 e Al+Ti+O>80 e Al>Ti
$TiO_2 \cdot xAl_2O_3$	Al>30, Ti>5 e Al+Ti+O>80 e Al<Ti
SiO_2	Si> 50 e O > 10
$SiO_2 \cdot xAl_2O_3$	Si>20 e Al<30 e Al<Si

A inertização é uma prática utilizada para evitar a interação com o ar atmosférico e, assim, reduzir a reoxidação durante o enchimento do aço no distribuidor (NADIF *et al.*, 2004). Dispositivos podem ser utilizados dentro do distribuidor para evitar essa

indesejável reoxidação. Um deles seria a utilização de uma válvula extensora, conforme mostrada na Figura 3.19.

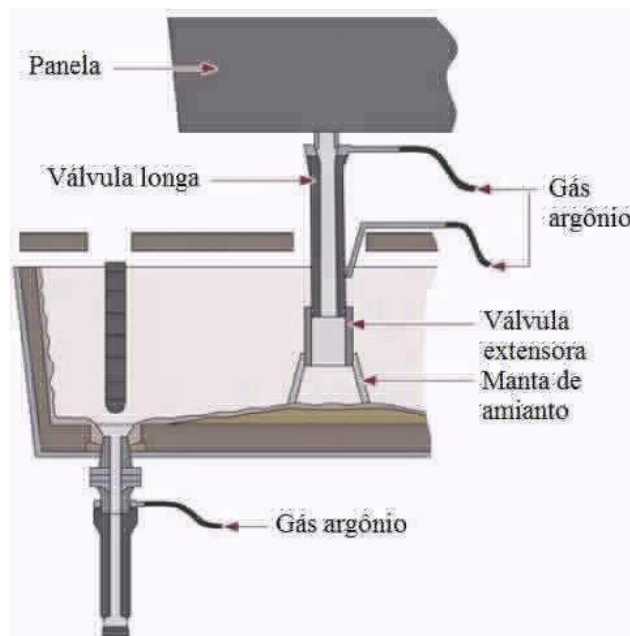


Figura 3.19 - Exemplo de extensor de válvula longa utilizado no distribuidor (WÜNNENBERG e CAPPEL, 2009)

Esses extensores são utilizados para reduzir a distância entre o jato de aço que escoia da válvula longa e o fundo do distribuidor, fazendo com que o pó de cobertura seja adicionado em um menor tempo após o início do lingotamento, evitando assim a reoxidação (WÜNNENBERG; CAPPEL, 2009). A diminuição da altura desse jato durante o enchimento, bem como o aumento da vazão de aço, diminui a quantidade de oxigênio absorvido pelo banho, como mostrado na Figura 3.20 (SUZUKI et al., 1983).

Entretanto, devido aos riscos com a possibilidade de formação de *splashes*, o uso de altas vazões é restringido (RICHAUD, 2014).

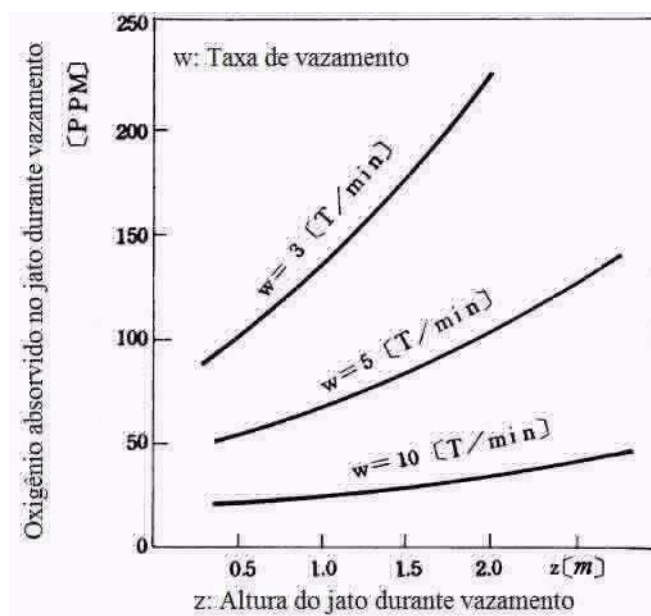


Figura 3.20 - Relação da altura do jato e da vazão de aço no enchimento do distribuidor em função da absorção de oxigênio pelo jato de aço (SUZUKI et al., 1983).

3.6 Reoxidação no Distribuidor

É possível enumerar, de maneira resumida, os seguintes fatores (SASAI; MIZUKAMI, 2000) que são considerados responsáveis pela reoxidação do aço no distribuidor devido ao contato com:

- ar na entrada do distribuidor;
- ar da superfície;
- pó de cobertura do distribuidor;
- escória residual do distribuidor;
- escória de panela;
- refratários do distribuidor;

Na fase inicial de escoamento do aço da panela para o distribuidor, a SiO_2 presente no pó de cobertura e o material de fechamento da panela reage com o Al presente no aço líquido de acordo com a Equação (3.14):



Na entrada do distribuidor e na superfície de aço líquido que está dentro dele, o O_2 presente no ar reage com o Al do aço líquido de acordo com a equação (3.15):



As reações acima aumentam o teor de Si (equação (1)) e diminuem o teor de Al (equação (2)) da fase inicial do escoamento na entrada para a fase final na saída do distribuidor. A Figura 3.21 mostra os pontos de conexões existentes no processo de lingotamento contínuo, com uso da válvula longa e tubo submerso, que são regiões em que há grande propensão à reoxidação do aço.

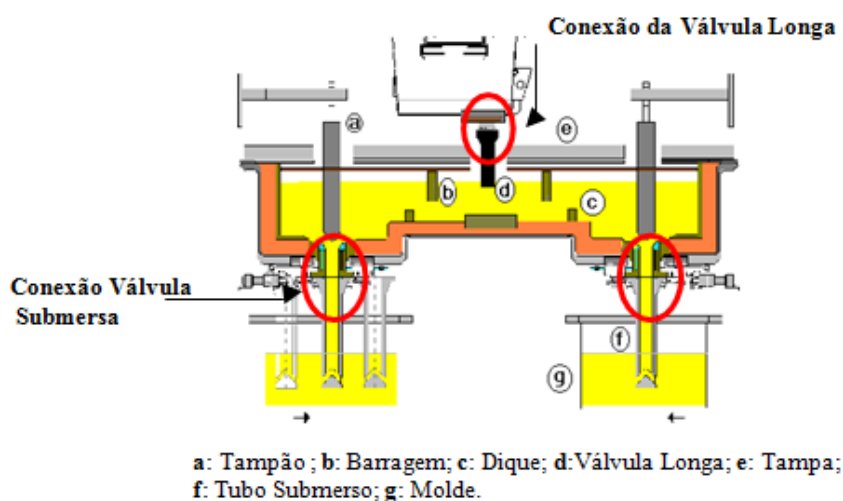


Figura 3.21 - Representação de distribuidor destacando os sistemas de conexão vulneráveis à reoxidação (FACO, 2005)

3.7 Limpidez dos aços

A demanda por aços mais limpos requer a redução de inclusões de óxidos não metálicos e também o controle de sua morfologia, composição e distribuição de tamanho. Devido ao custo, tempo e dificuldades de amostragem, a limpidez do aço é amplamente inferida usando oxigênio total, coleta de nitrogênio e outros métodos indiretos (ZHANG; THOMAS, 2002).

Além da quantidade de inclusões, a limpeza do aço depende muito da distribuição de tamanho, morfologia e composição das inclusões não metálicas no aço. A distribuição do tamanho da inclusão é particularmente importante, porque grandes macroinclusões são as mais prejudiciais às propriedades mecânicas. Um quilo de aço baixo carbono acalmado ao alumínio contém entre 10^7 a 10^9 inclusões, incluindo apenas 400 inclusões

de 80 a 130 μm , dez inclusões de 130-200 μm e no máximo uma inclusão de tamanho de 200 a 270 μm (ZHANG; THOMAS, 2002).

Às vezes, um defeito catastrófico é causado por apenas uma única grande inclusão. Assim, a limpidez do aço envolve não apenas controlar o conteúdo médio de inclusão no aço, mas também evitar inclusões maiores que o tamanho crítico prejudicial ao produto. Para este fim, muitos produtos na Tabela 3.5 incluem restrições sobre o tamanho máximo de inclusão.

Tabela 3.5 - Requisitos de limpidez para vários tipos de aço (ZHANG e THOMAS, 2002)

Produto	Fração máxima de impurezas	Tamanho máximo da inclusão
Aço IF	[C] ≤ 30ppm, [N] ≤ 40ppm, [O] ≤ 40ppm (DEKKERS, 2002) [C] ≤ 10ppm (THOMAS et al., 1997), [N] ≤ 50ppm (BESKOW et al., 2002)	
Automotivo e Chapa estampagem profunda	[C] ≤ 30ppm, [N] ≤ 30ppm (SASAI; MIZUKAMI, 2000)	100µm (DEKKERS, 2002)
Latas	[C] ≤ 30ppm, [N] ≤ 30ppm, [O] ≤ 20ppm (DEKKERS, 2002)	20µm (DEKKERS, 2002)
Aços ligados para vasos de pressão	[P] ≤ 70ppm (DEKKERS, 2002)	
Barras de aço ligado	[H] ≤ 2ppm, [N] ≤ 10-20ppm, [O] ≤ 10ppm (WANG et al., 1996)	
Aço HIC (resistente à trinca induzida por hidrogênio)	[P] ≤ 50ppm, [S] ≤ 10ppm (DEKKERS, 2002)	
Aços para tubos	[S] ≤ 30ppm (FINARDI, 1989), [N] ≤ 35ppm, [O] ≤ 30ppm (WANG et al., 1996) [N] ≤ 35ppm (BESKOW et al., 2002)	100µm (DEKKERS, 2002)
Aço para recozimento contínuo	[N] ≤ 20ppm (DEKKERS, 2002)	
Chapa para soldagem	[H] ≤ 1,5ppm (DEKKERS, 2002)	
Esferas para rolamentos	[O] ≤ 10ppm (DEKKERS, 2002)	15µm (DEKKERS, 2002)
Produto	Fração máxima de impurezas	Tamanho máximo da inclusão
Aços para pneus (tire cord)	[H] ≤ 2ppm, [N] ≤ 40ppm, [O] ≤ 15ppm (WANG et al., 1996)	10µm (WANG et al., 1996) 20µm (SASAI; MIZUKAMI, 2000)
Magnético GNO	[N] ≤ 30ppm (WANG et al., 1996)	
Chapa grossa	[H] ≤ 2ppm, [N] ≤ 30-40ppm, [O] ≤ 20ppm (WANG et al., 1996)	Inclusão 13µm Cluster 200µm (DEKKERS, 2002)
Arame (fio)	[N] ≤ 60ppm, [O] ≤ 30ppm (WANG et al., 1996)	20µm

A importância da distribuição do tamanho de inclusão é mostrada na Fig. 3.22, onde é percebido que o aço do distribuidor é mais limpo, apesar de ter um teor de oxigênio total muito próximo.

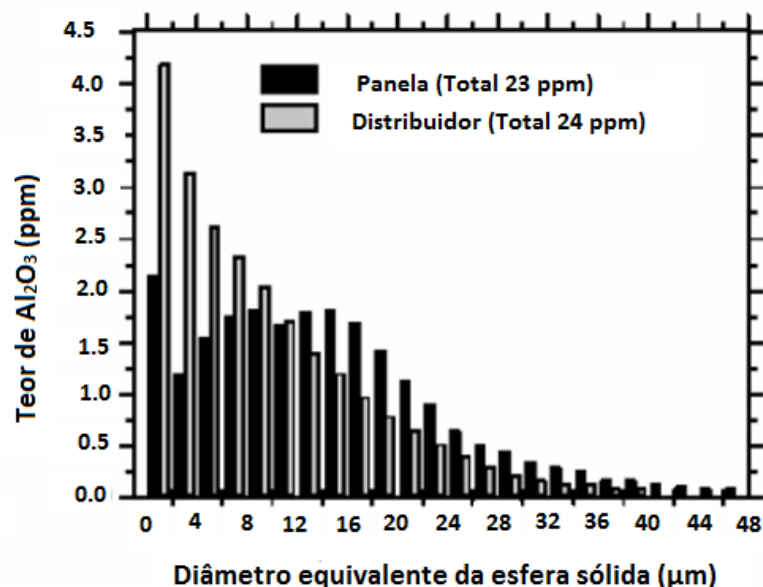


Figura 3.22 - Distribuição de tamanho de inclusão de Al₂O₃ em panela e distribuidor (ZHANG e THOMAS (2002))

3.8 Métodos para avaliação da limpeza dos aços

Métodos diversos têm sido desenvolvidos e aperfeiçoados para a caracterização química e física, e classificação das inclusões e da limpeza do aço. Estes métodos podem ser divididos em diretos e indiretos.

3.8.1 Métodos diretos

Existem muitos métodos diretos de avaliação da limpeza dos aços. Três métodos se destacam, sendo eles: a Observação Metalográfica por Microscopia (MMO), a Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM) e a Espectrometria Fotoeletrônica de Raios-X (XPS) (ZHANG; THOMAS, 2003).

- Observação Metalográfica por Microscópio (MMO) é um método tradicional onde as inclusões são quantificadas e qualificadas pela avaliação visual. As amostras de aço são examinadas através do microscópio ótico em duas dimensões. As vantagens são a quantidade de inclusões visualizadas, distribuição de tamanho (principalmente de 5 -

30 μ m). As desvantagens são o longo tempo de avaliação e o erro humano. Pode-se determinar a quantidade de inclusões encontradas em determinada área da amostra, sendo que para materiais acabados, existem normas tais como a ASTM E45-05 (ASTM, 2002).

A Figura 3.23 tem-se um exemplo de uma amostra de aço analisada pelo método MMO (COLPAERT, 1983).



Figura 3.23 - Seção com aumento original de 225x, apresentando inclusões de sulfeto de Manganês (COLPAERT, 1983)

A Análise de Imagens (IA) é um método aprimorado do MMO, na medida em que melhora a avaliação visual utilizando para isso a avaliação computacional rápida das imagens microscópicas, onde um programa distingue regiões claras das escuras com base em um corte de escala cinza. Como vantagem, o método permite avaliar mais facilmente maiores áreas e um número de inclusões maiores se comparado ao MMO. Como desvantagem, pode confundir inclusões não metálicas com arranhões, corrosões e manchas.

- Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM) é um método que avalia a composição de cada inclusão examinada revelando claramente a forma tridimensional, sendo mensurada através do micro analisador de sonda de elétron (EPMA). Há normas para a análise de inclusões via MEV/EDS, como a ASTM E1508-98 e ASTM E2142-01 (DEKKERS, 2002).
- Espectrometria Fotoeletrônica de Raios-X (XPS), este método faz medição da composição química da inclusão sendo aplicável apenas para inclusões maiores que

10 µm. Após ser laminada a frio, a tira é radiografada, onde se procuram detectar áreas contendo inclusões de cálcio aluminatos (McPHERSON; McEAN, 1995).

3.8.2 Métodos indiretos

Para avaliação da limpidez dos aços através dos métodos diretos é necessário tempo e um alto investimento, além de apresentar dificuldades da amostragem. Devido a esses fatores, as indústrias realizam a avaliação através de métodos indiretos como análise de “pick-up” de nitrogênio e medição de oxigênio total.

- Medição do Oxigênio Total (T.O.)

O oxigênio dissolvido no aço somado ao oxigênio combinado, na forma de inclusões não metálicas, corresponde ao oxigênio total no aço, que pode ser mensurado através de sensores próprios para sua medição de maneira relativamente fácil, sendo controlado pelo equilíbrio termodinâmico com elementos desoxidantes (por exemplo, o alumínio).

A Equação (3.16) representa o equilíbrio termodinâmico para pequenos teores de alumínio, bem como o efeito da temperatura.

$$\log K = \log([\%Al]^2[\%O]^3) = - 62780/T + 20,54 \quad (3.16)$$

Onde:

K: Constante de equilíbrio

Al: % de Alumínio em ppm

O: % de Oxigênio em ppm

T: Temperatura em Kelvin (K).

O oxigênio total é um método razoável para medição indireta da limpidez do aço, uma vez que a % de oxigênio livre não varia muito. O equilíbrio entre o alumínio e o oxigênio é mostrado na Figura 3.24.

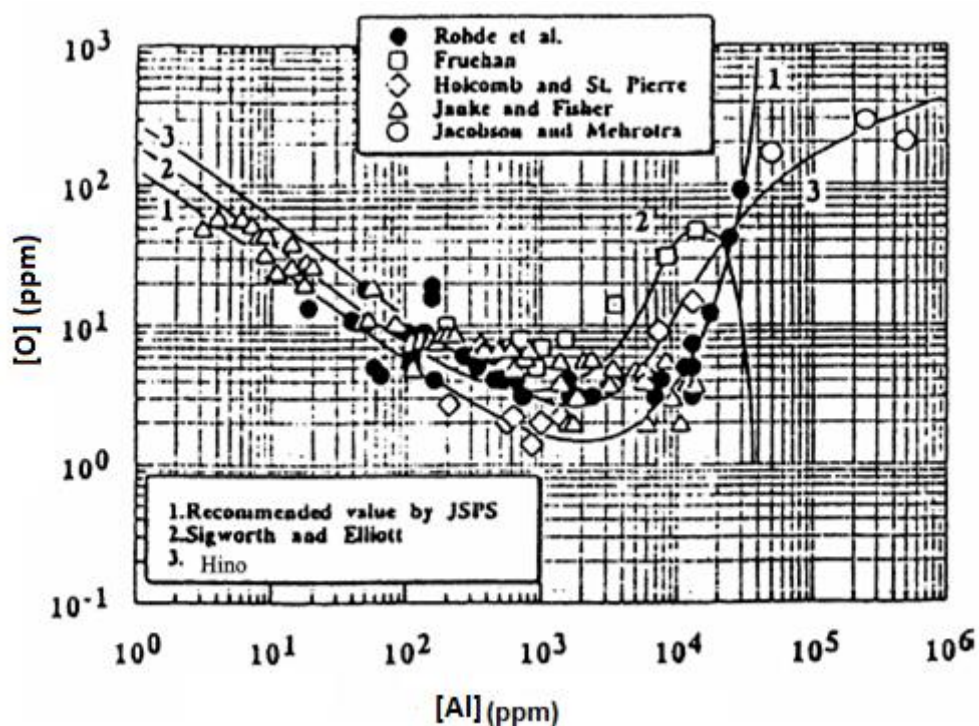


Figura 3.24 - Equilíbrio entre o alumínio e o oxigênio no aço (1873 K) (ZHANG e THOMAS, 2003)

Logo, de acordo com a Figura 3.24 e a equação (3.16), para $[\%Al] = 0,03$ a $0,06$; o oxigênio livre se encontra entre 3 a 5 ppm a $1600^{\circ}C$. Uma correlação direta entre a incidência de esfoliação e o teor de oxigênio total, que é medido através de amostras que são retiradas do aço líquido para indicar limpidez para disposição das placas, pode ser visto na Figura 3.25. Percebe-se que quanto maior o valor do oxigênio total, maior será o índice de esfoliação presente no produto final.

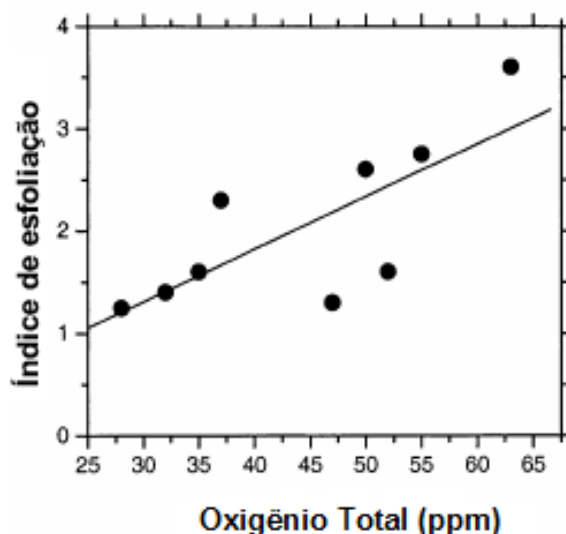


Figura 3.25 - Relação entre o Oxigênio Total no distribuidor e índice de defeitos no produto (ZHANG e THOMAS, 2003)

- “Pick-up” de Nitrogênio

O “pick-up” de nitrogênio é uma medição indireta do oxigênio total, da limpidez do aço e de problemas de qualidade, devido às inclusões formadas por reoxidação, conforme mostrado nas Figuras 3.26 e 3.27. Durante as operações de transferência, especialmente entre panela e distribuidor, pode ocorrer entrada de ar no processo. Como consequência, o produto pode apresentar diferenças no teor de nitrogênio, ou seja, após total desoxidação sofrida pelo aço, é baixo o teor de oxigênio presente, o que habilita o aço à rápida absorção de ar. Portanto, o nitrogênio passa a ser um indicador da limpidez do aço.

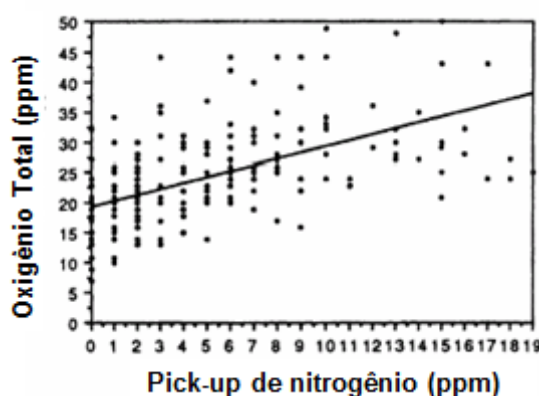


Figura 3.26 - Relação entre oxigênio total, pick-up de nitrogênio (ZHANG e THOMAS, 2003)

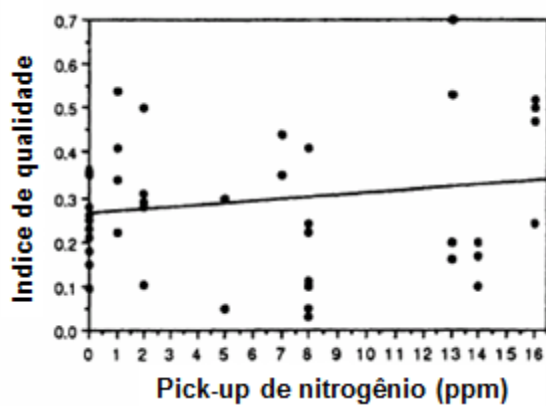


Figura 3.27 - Relação entre pick-up de nitrogênio e qualidade do aço (ZHANG e THOMAS, 2003)

De acordo com as Figuras, o “pick-up” de oxigênio é sempre maior que o pick-up de nitrogênio medido (ZHANG; THOMAS, 2003).

4 METODOLOGIA

4.1 Materiais

• Máquina de lingotamento

Todas as corridas avaliadas foram lingotadas em uma máquina de lingotamento contínuo de placas do tipo vertical-curva com características de projeto, conforme descrito:

- Torre de panela: Giratória
- Número de veios: 2
- Distribuidor: 41 t (capacidade máxima)
- Velocidade média de lingotamento: 1 m/min
- Dimensões de placas:
 - Espessura = 252 mm;
 - Largura = 910 – 2060 mm;
 - Comprimento médio = 6 000 mm.

• Composição do aço e pó de cobertura do distribuidor

O aço UBC utilizado apresenta 0,001% de teor de carbono e 0,030% de alumínio. Na composição química do pó de cobertura do distribuidor foram utilizados os óxidos: CaO (60%); Al₂O₃ (30%); MgO (5%); SiO₂ (2%) Fe₂O₃ (1%) e o restante de Na₂O e K₂O.

4.2 Acompanhamento industrial

Com base no que foi discutido na revisão bibliográfica e nos objetivos propostos, buscou-se, nesse trabalho, conhecimento a respeito das inclusões presentes no aço durante a partida de uma máquina de lingotamento contínuo, mais especificamente nos primeiros vinte metros lingotados, a fim de propor métodos de processo que visam a redução de inclusões no fluxo inicial de aço para o veio. Na Figura 4.1 é apresentado um fluxograma esquemático das etapas realizadas na primeira fase de experimentos.

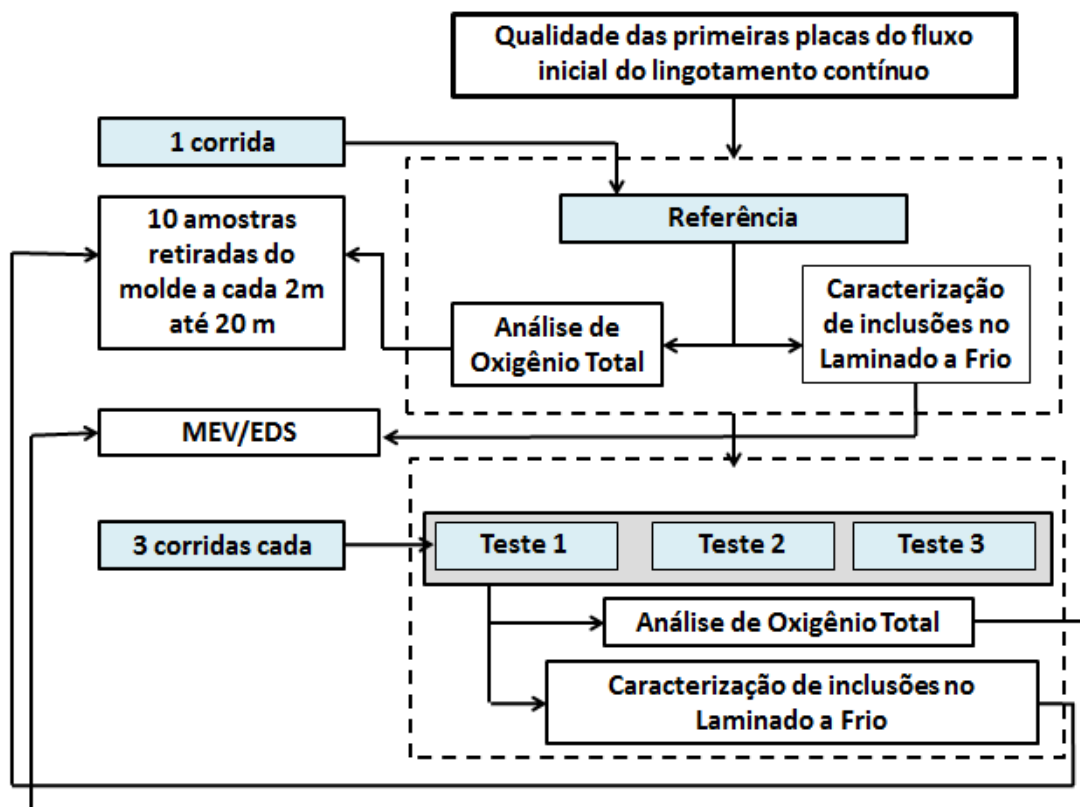


Figura 4.1 - Fluxograma das etapas para execução dos trabalhos na primeira fase.

Etapas 1º fase:

- Nessa etapa foi estabelecida uma corrida de início de partida da máquina de lingotamento contínuo denominada de Referência, para a observação da prática atual para adição de pó de cobertura no distribuidor que ocorre com aproximadamente 28 t de aço no distribuidor.
- Posteriormente foram realizadas 3 condições de teste para momentos distintos de adição de pó de cobertura do distribuidor, sendo denominadas de: Teste 1; Teste 2; Teste 3, onde foram observadas 3 corridas de início de partida do distribuidor para cada teste. Para o Teste 1, o pó de cobertura foi adicionado no distribuidor quando o peso de aço líquido atingiu entre 17 e 20 t. Para o Teste 2, o peso de aço líquido visado foi entre 22 e 23 t. No Teste 3, foi de 16 t o peso

visado. A razão para um menor peso visado nessa condição foi a utilização da válvula longa estendida com um prolongamento de 200 mm em sua extremidade, permitindo a adição de pó no distribuidor com menor peso de aço líquido. Na Figura 4.2 é mostrado esquematicamente o peso de aço líquido visado no distribuidor em cada teste.

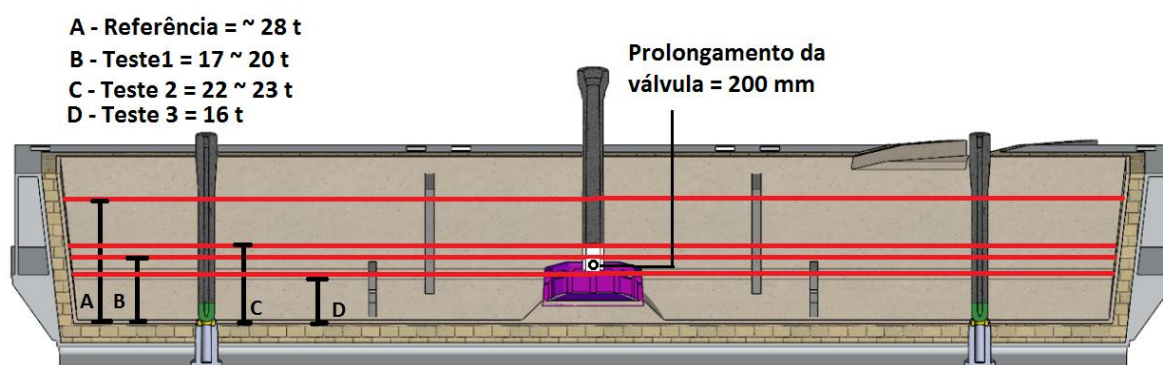


Figura 4.2- Peso de aço líquido visado no distribuidor no momento da adição de pó de cobertura para cada um dos testes.

- Foram retiradas no molde da máquina do lingotamento contínuo amostras do aço líquido para análise do teor do oxigênio total das primeiras placas das corridas realizadas na Referência; Teste 1; Teste 2 e Teste 3. A retirada de amostras no molde se deu a cada 2 metros lingotados, totalizando 10 amostras ao longo dos primeiros 20 metros do veio da máquina de lingotamento. Tal amostragem buscou garantir que a medição do teor de oxigênio atingisse até a 3ª placa inicial do distribuidor, pois cada placa tem o comprimento médio de 6 metros, logo, para 3 placas iniciais, o comprimento será 18 metros. Diante desse fato conclui-se que, 20 metros é o suficiente para a observação da limpidez das placas iniciais.
- Foi realizada a inspeção visual nos produtos laminados a frio provenientes das primeiras placas das corridas realizadas na Referência; Teste 1; Teste 2 e Teste 3. Foram retiradas amostras para caracterização de inclusões presentes em defeitos superficiais via MEV (GEMINI ULTRA55) / EDS (EVO-50) de produtos laminados a frio que apresentaram tais ocorrências.

Etapas 2º fase:

- Finalizada a 1º fase descrita acima, outras corridas das condições testadas Referência; Teste 1; Teste 2 e Teste 3, tiveram acompanhamento da inspeção final do produto laminado a frio oriundo da 3º placa do distribuidor, durante um certo período de tempo, a fim de verificar a qualidade superficial, conforme mostrado na Figura 4.3.

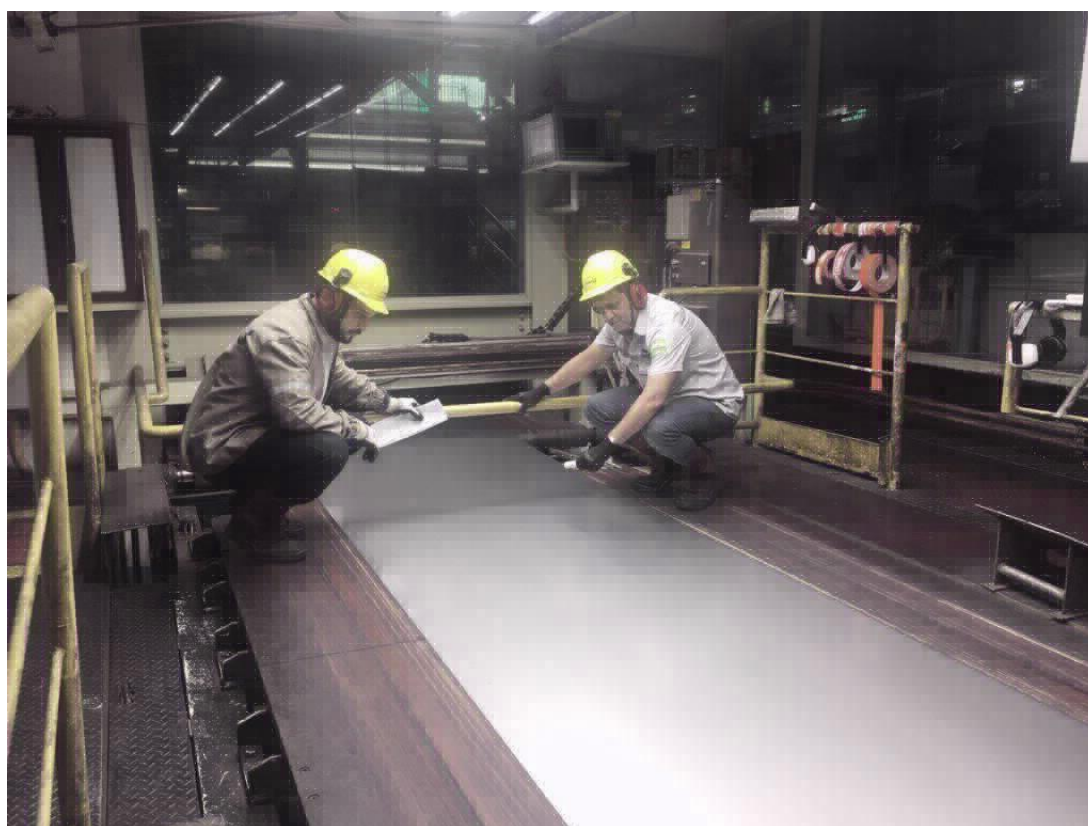


Figura 4.3- Inspeção em produto final laminado a frio – Usiminas.

- Houve os seguintes registros das inspeções realizadas para cada uma das condições testadas: quantidade de material inspecionado até o momento em que foi verificada a primeira ocorrência de defeitos superficiais presentes nas bobinas inspecionadas para a Referência, Teste 1 e Teste 2; índice de ocorrência de defeitos superficiais presentes no 1º mês de acompanhamento de inspeção para a Referência, Testes 1 e Teste 2; índice de ocorrência de defeitos superficiais presentes no 2º mês de acompanhamento de inspeção para a

Referência, Testes 1 e Teste 2; comparação do resultado de qualidade para o período de 6 meses para cada teste em área de produção, divididos entre: Referência e os Testes 1, 2 e 3.

- Foram retiradas 2 amostras 30 X 30 cm das bobinas laminadas a frio que apresentaram alguma ocorrência de defeito superficial para análise no Centro de Pesquisa da Usiminas. As amostras foram preparadas e analisadas ao MEV via EDS (Figura 4.4) visando identificar as inclusões presentes no aço.



Figura 4.4- Equipamento MEV - Usiminas.

- Foi efetuado um levantamento levando em consideração o índice de defeitos superficiais em relação ao número de placas inspecionadas. Os defeitos considerados no levantamento foram os defeitos superficiais com origem no lingotamento contínuo, relacionados à reoxidação do aço.

4.3 Dimensões do distribuidor e válvula longa estendida e retirada de amostras

Na Figura 4.5 são mostradas as especificações dimensionais e técnicas do distribuidor utilizado e da válvula estendida que foi utilizada somente no Teste 3.

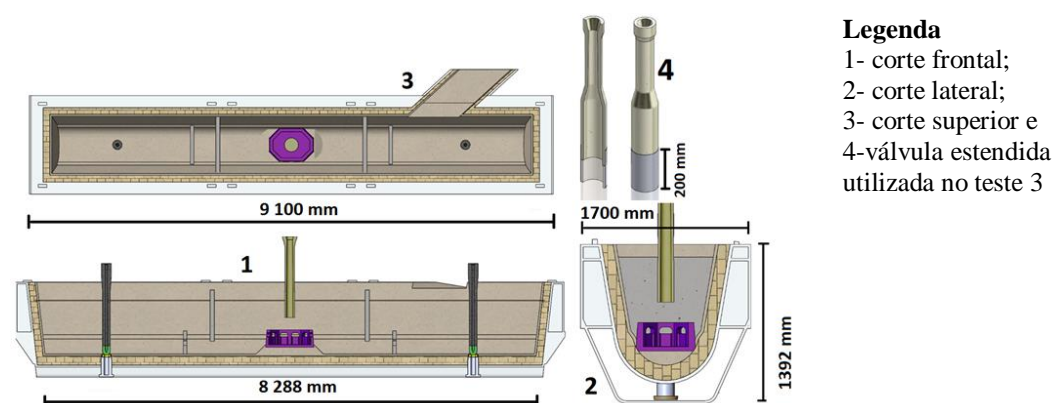


Figura 4.5- Especificações dimensionais e técnicas do distribuidor (MIRANDA, 2017).

A aquisição de amostras para análise da porcentagem de oxigênio total foi feita utilizando o amostrador tipo TOS “*Total Oxigen Sample*”, do fornecedor Heraeus Electro-Nite, de acordo com a Figura 4.6 (RIZZO, 2006). 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.

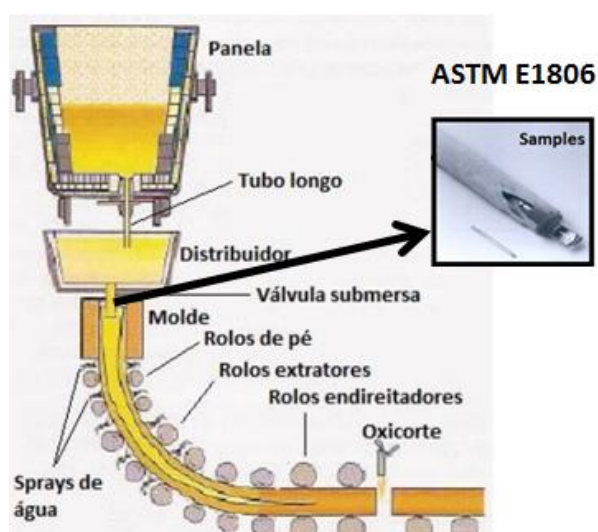


Figura 4.6- Esquema da retirada de amostras no molde da máquina de lingotamento contínuo (HERAEUS ELECTRO-NITE INTERNATIONAL, 2006).

As amostras foram confeccionadas seguindo a norma ASTM E1806 (ASTM, 2018a), sendo então enviadas ao laboratório do Centro de Pesquisas da Usiminas, onde foram preparadas para análise do oxigênio total. A análise do teor de oxigênio foi realizada no equipamento denominado Leco TC 600 (Precisão: 0,025 ppm), conforme norma ASTM E1019 (ASTM, 2018b) de acordo com a Figura 4.7.



Figura 4.7- Equipamento Leco TC 600 – Usiminas.

5 RESULTADOS

5.1 Adição do pó de cobertura

Foi efetuado o acompanhamento de 3 corridas para cada condição de teste na primeira fase do estudo, totalizando 9 corridas. Os valores obtidos para o peso de aço líquido no distribuidor, no momento da adição do pó de cobertura para cada uma delas, são descritos na Tabela 5.1. O maior valor médio foi o obtido no Teste 2. Os valores médios dos Testes 1 e 3 se assemelham. Para a referência foi observada apenas uma corrida com o valor de 28 t.

Tabela 5.1 - Peso de aço líquido obtido no distribuidor no momento da adição de pó de cobertura.

Teste	Aço líquido (t) no distribuidor		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
Teste 1	17	19	17
Teste 2	22	22	22
Teste 3	16	18	18
Referência	28		

5.2 Análise de amostras e teor de oxigênio

Nas Figuras 5.1 a 5.4 são mostrados os resultados obtidos para a Referência, Teste 1, Teste 2 e Teste 3 da medição do teor de oxigênio (em ppm) ao longo do tempo. A maior dispersão do teor de oxigênio, nos primeiros 2 minutos de lingotamento, é na Referência, chegando a um teor médio de 100 ppm. A menor dispersão, para o mesmo instante, foi para o Teste 3, obtendo um teor médio de oxigênio de 67 ppm. Para os Testes 1 e 2 se obteve, para o mesmo instante, respectivamente, os seguintes valores: 80 e 72 ppm.

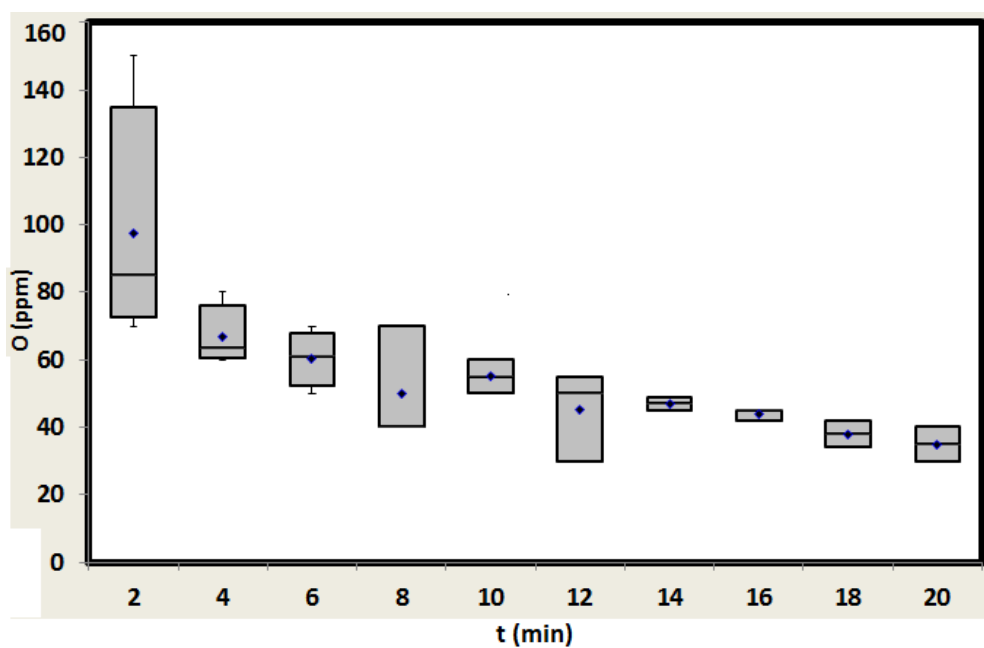


Figura 5.1 - Resultado da avaliação do teor de oxigênio da Referência.

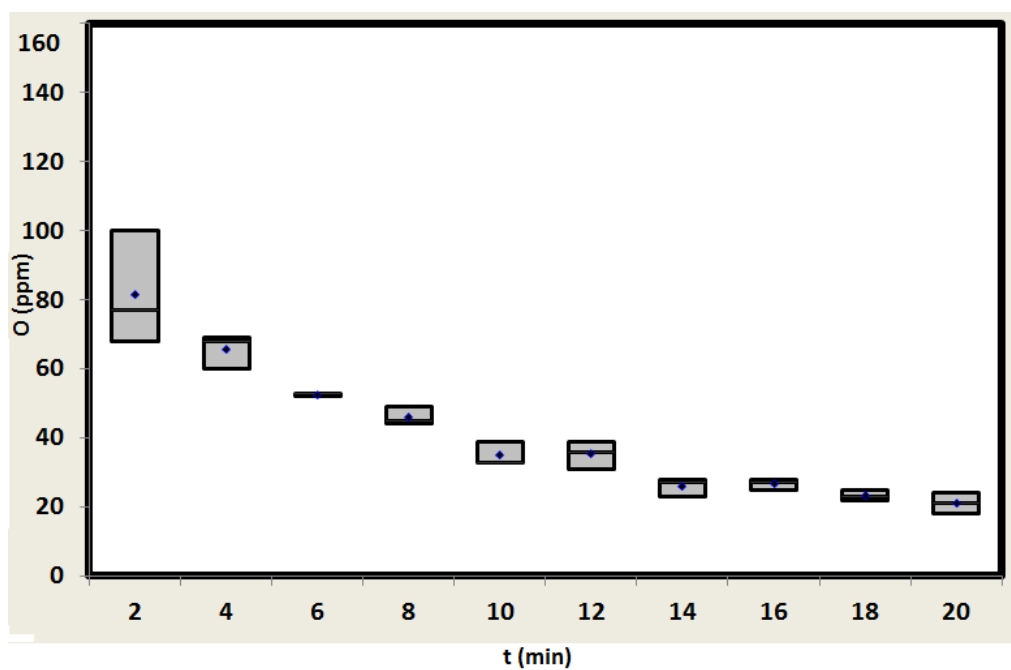


Figura 5.2 - Resultado da avaliação do teor de oxigênio do Teste 1.

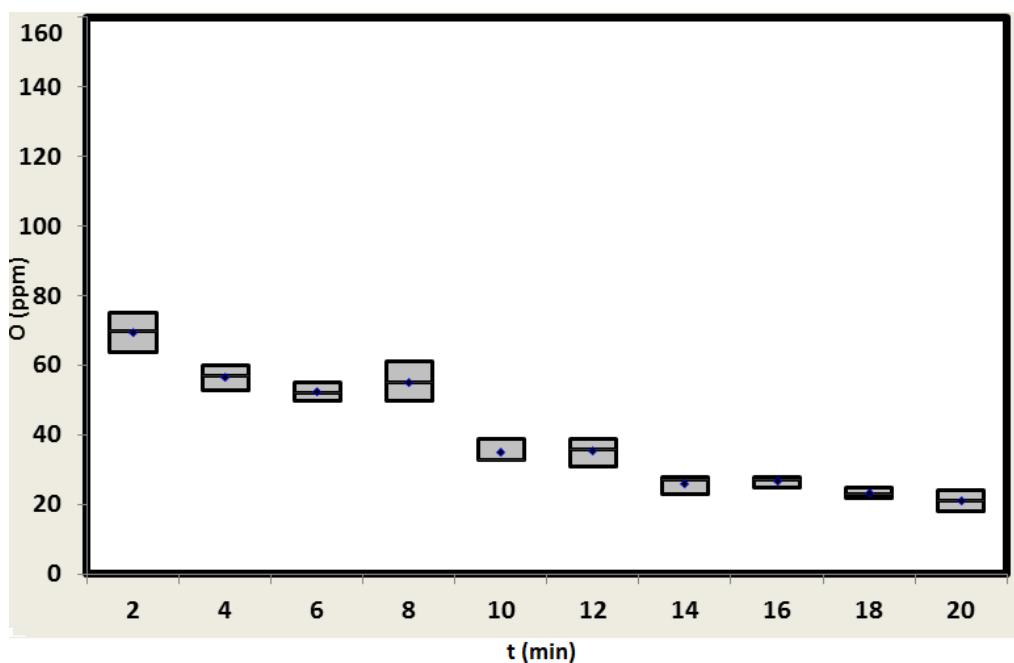


Figura 5.3 - Resultado da avaliação do teor de oxigênio do Teste 2.

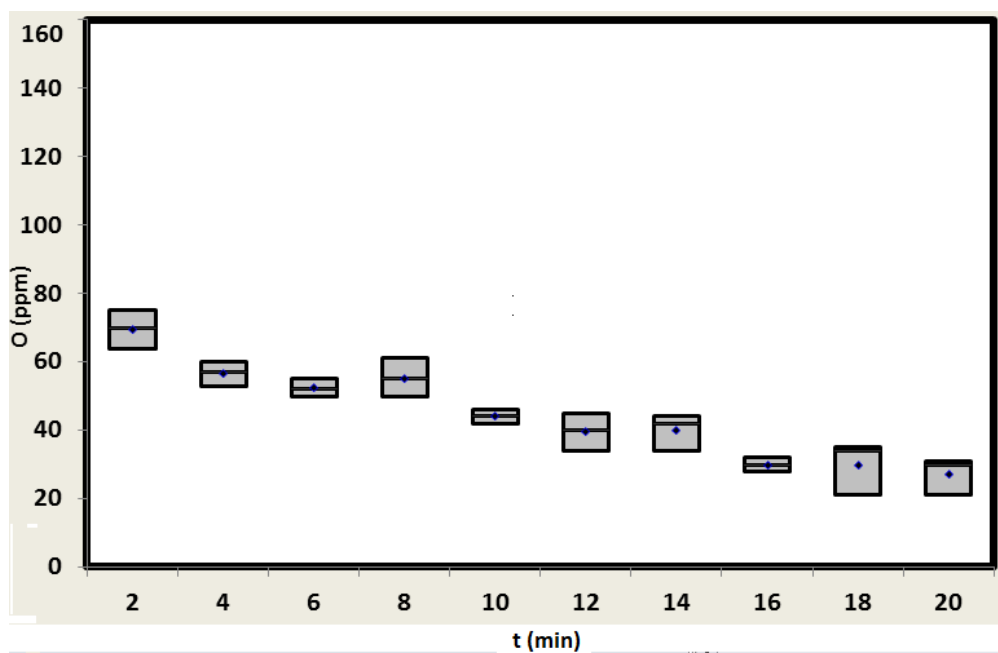


Figura 5.4 - Resultado da avaliação do teor de oxigênio do Teste 3.

Pode-se perceber pelos valores obtidos de teor de oxigênio no primeiro instante de retirada das amostras de aço líquido (2 min), que a reoxidação é favorecida nesse momento, uma vez que esse valor é o maior observado em relação aos valores do restante dos intervalos para todos os testes.

O experimento da adição de pó de cobertura no distribuidor corrobora o que STORY *et al* (2009) comprovaram em seu estudo: quanto maior o tempo de exposição do aço UBC à atmosfera, sem a camada protetora do pó de cobertura, maior será o teor de oxigênio presentes nos momentos iniciais do fluxo de lingotamento contínuo, ou seja, nas primeiras placas, contribuindo para o aparecimento de inclusões baseadas em Al_2O_3 , onde sua densidade de inclusões apresenta valores entre 400 a 1800 inclusões/ cm^2 , especialmente nos primeiros 15 minutos de lingotamento, para um aço UBC acalmado ao alumínio. Essas inclusões são formadas devido à reoxidação durante os estágios iniciais do vazamento de aço da panela para o distribuidor (ZHANG e THOMAS, 2003).

O teor de oxigênio obtido vai decrescendo para todos os testes realizados, inclusive para a Referência, até o intervalo final medido (20 min). A razão para o decaimento é que o pó de cobertura vai garantindo a total cobertura do aço líquido presente no distribuidor, protegendo-o contra a reoxidação ao passar do tempo (SASAI e MIZUKAMI (2000)).

A partir do instante igual a 12 min, todas as condições de testes apresentam valores médio próximos, ficando entre 20 e 40 ppm, o que leva à conclusão que, a partir disso, a turbulência no distribuidor próximo à válvula longa, começa a se estabilizar, permitindo uma diminuição da incorporação do pó de cobertura ao aço (RICHAUD, 2014).

Na Figura 5.5 é mostrado o teor médio de oxigênio total ao longo do tempo, desde a partida do veio da máquina de lingotamento contínuo, sendo separado por placa para uma melhor análise. Observa-se que a Referência apresentou os maiores valores, sendo mais propícia à formação de esfoliação nas primeiras placas.

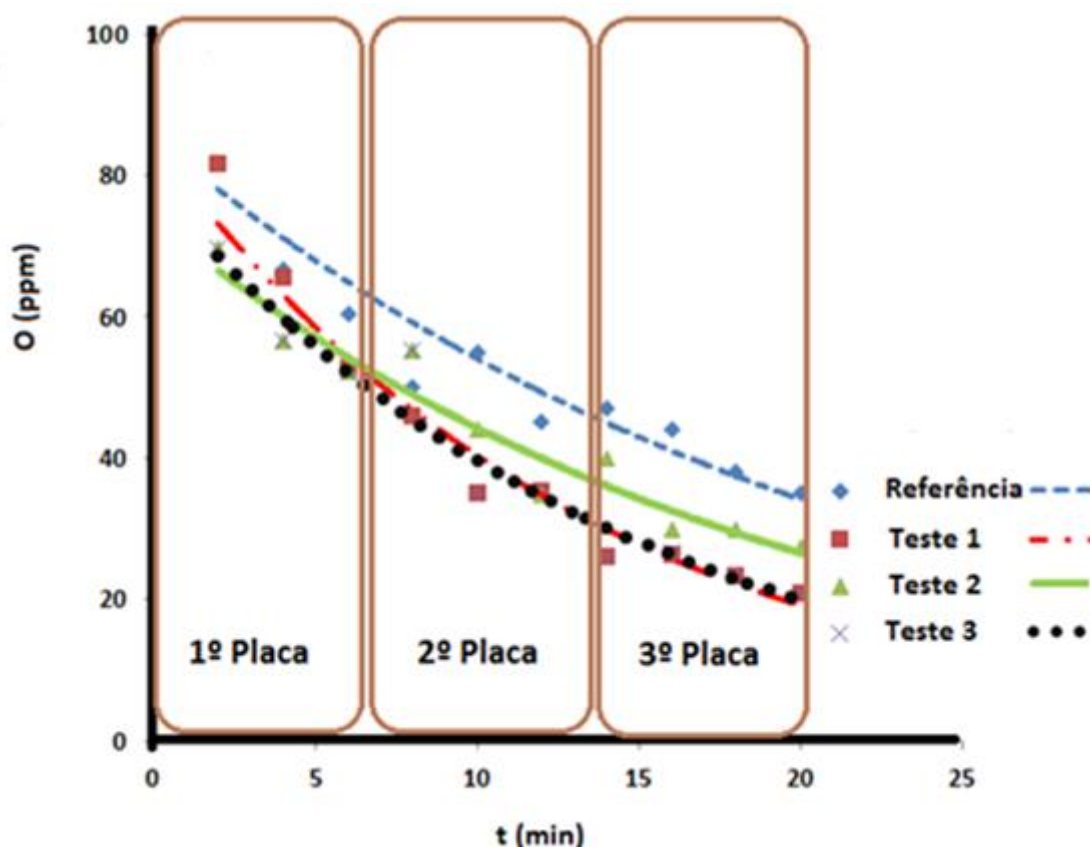


Figura 5.5 - Avaliação do teor de oxigênio do aço UBC nos testes.

O Teste 1 até o instante de 6 min apresenta o segundo maior valor de teor de oxigênio, pois a partir desse instante e até 20 min é o Teste 2 que ocupa o segundo lugar em maior teor. O Teste 3 é o que apresenta a menor dispersão dentre eles, sendo, portanto, o mais estável. Até o instante de 5 min, o Teste 3 se mantém próximo do Teste 2, pois a partir disso, os valores para a concentração de oxigênio para o Teste 3 são próximos dos valores do Teste 1.

A razão da proximidade de valores de oxigênio total para o Teste 1 e Teste 3, a partir do instante de 6 min (ou 2º placa do distribuidor), deve-se ao fato que ambos tiveram adição de pó de cobertura com peso de aço visado semelhante, conforme visto anteriormente na Tabela 5.1. A diferença entre os dois testes é que no Teste 3 foi utilizada a válvula longa estendida.

5.3 Acompanhamento de qualidade superficial na inspeção final na primeira fase

Todas as bobinas laminadas a frio oriundas das três primeiras placas das corridas testadas foram acompanhadas durante a inspeção final de produto. Foram retiradas amostras daquelas que tiveram eventos de qualidade para serem analisadas, conforme descrito no item 4.2. Na Figura 5.6 é mostrada a esfoliação de uma amostra retirada da segunda placa de partida do lingotamento para a Referência.

As caracterizações realizadas foram via MEV (Figura 5.7) e EDS (Figura 5.8), constatando a presença de alumina nesse caso, corroborando a constatação de STORY et al. (2009), de que o atraso na adição do pó de cobertura favorece a reoxidação do aço.

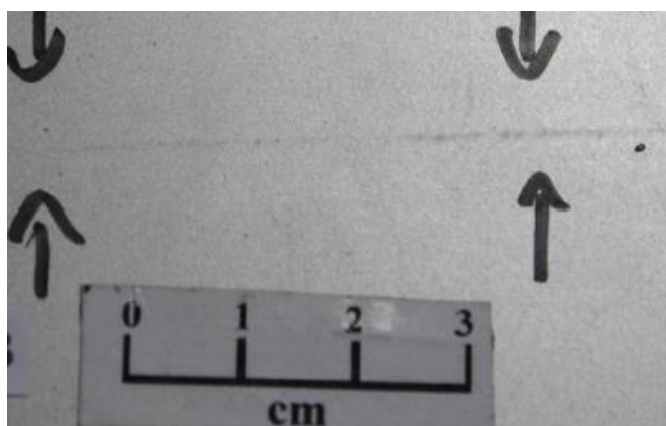


Figura 5.6- Amostra com o defeito na bobina laminada a frio da Referência.

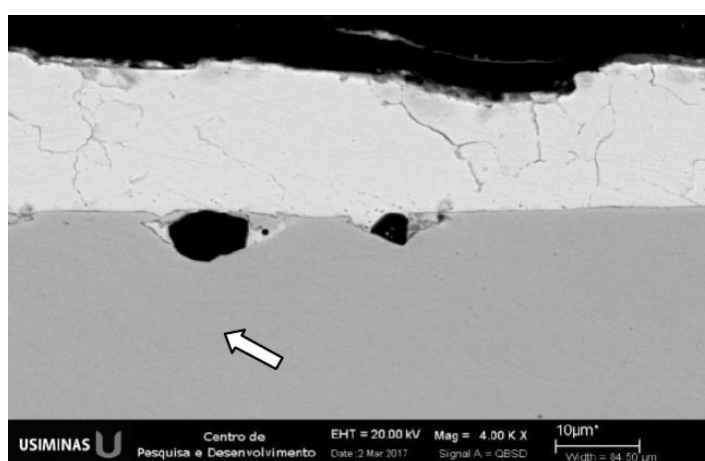


Figura 5.7 - Caracterização via MEV da amostra da bobina laminada a frio da Referência.

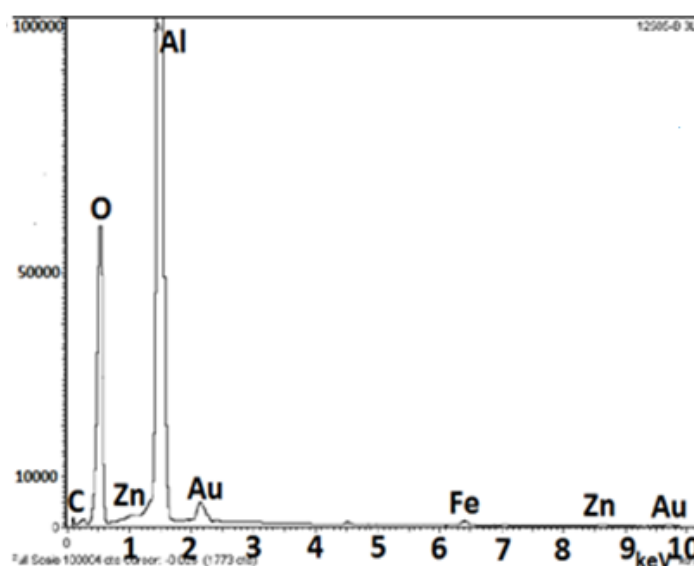


Figura 5.8 - Espectro via EDS da inclusão da amostra da bobina laminada a frio da Referência.

Na Figura 5.9 é mostrada a esfoliação de uma amostra retirada da terceira placa de partida do lingotamento de uma das corridas do Teste 1 que apresentou esse defeito superficial. A caracterização foi realizada via MEV, onde observam-se 2 regiões assinaladas (Figura 5.10), e EDS (Figura 5.11 e Figura 5.12).

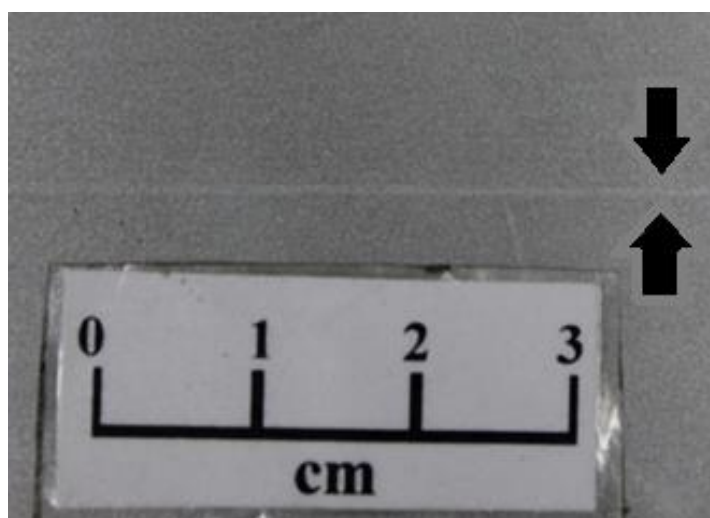


Figura 5.9 - Amostra com o defeito da bobina laminada a frio do Teste 1.

Conforme a Figura 5.10, há duas regiões que apresentaram os seguintes elementos via EDS: alumina e cálcio (Figura 5.11); alumina e magnésio (Figura 5.12).

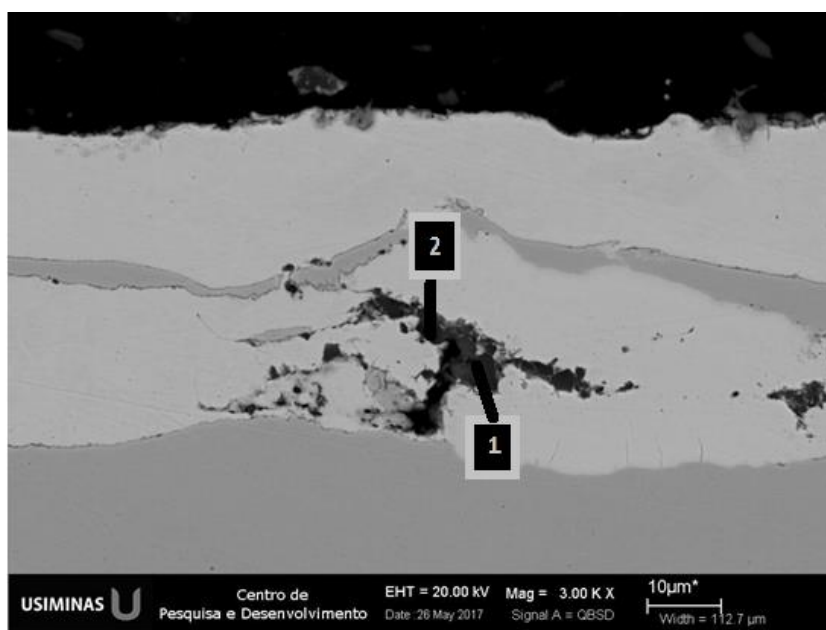


Figura 5.10 - Caracterização via MEV da amostra da bobina laminada a frio do Teste 1.

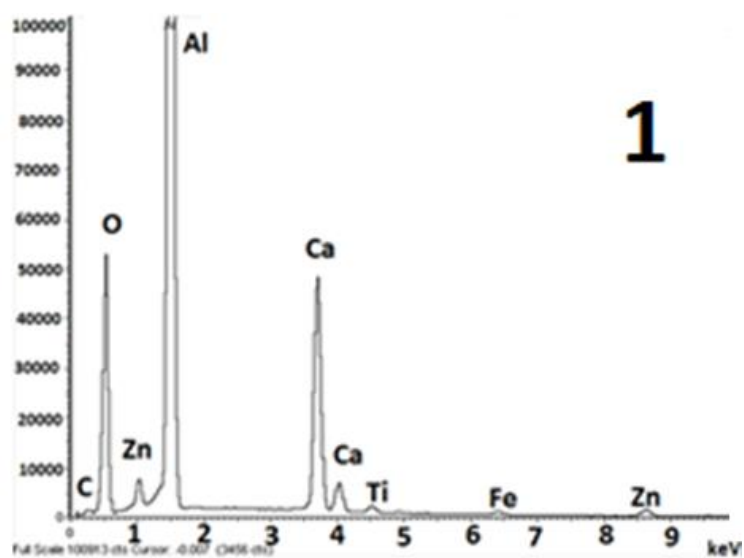


Figura 5.11 - Espectro via EDS da inclusão da amostra da bobina laminada a frio do Teste 1 – Região 1.

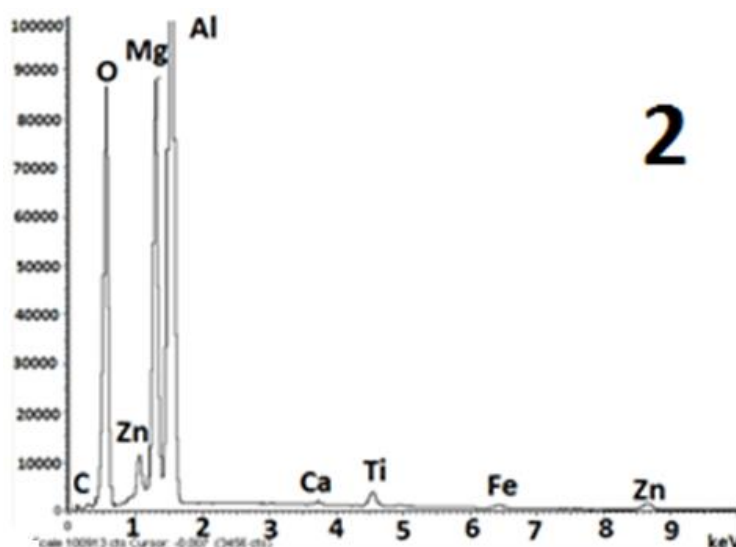


Figura 5.12- Espectro via EDS da inclusão da amostra da bobina laminada a frio do Teste 1- Região 2.

Os elementos encontrados na amostra além da alumina (cálcio e magnésio) sugerem a incorporação do pó de cobertura no aço. JACOBI e WUNNENBERG (2004) afirmam que o fenômeno ocorre devido aos seguintes mecanismos: agitação resultante do borbulhamento de gases na interface metal / pó; impacto do fluxo de vazamento na camada de pó; drenagem causada pelo efeito vórtice. Todos esses fatores contribuem para o aprisionamento de ar no aço (reoxidação), exercendo influência na formação de inclusões, dificultando a função do pó de cobertura.

Na Figura 5.13 é mostrada a esfoliação de uma amostra retirada da segunda placa de partida do lingotamento de uma das corridas do Teste 2. As caracterizações realizadas foram via MEV (Figura 5.14) e EDS (Figura 5.15), constatando somente a presença de alumina nesse caso.

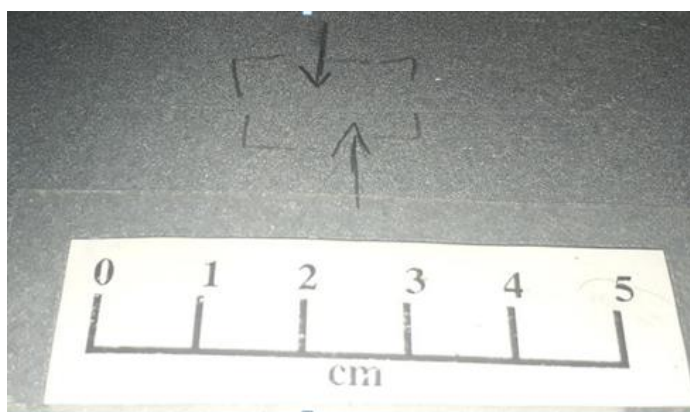


Figura 5.13 - Amostra com o defeito da bobina laminada a frio do Teste 2.

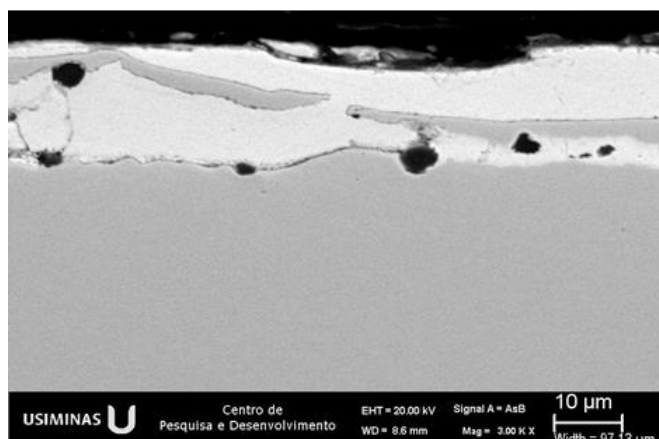


Figura 5.14 - Caracterização via MEV da amostra da bobina laminada a frio do Teste 2.

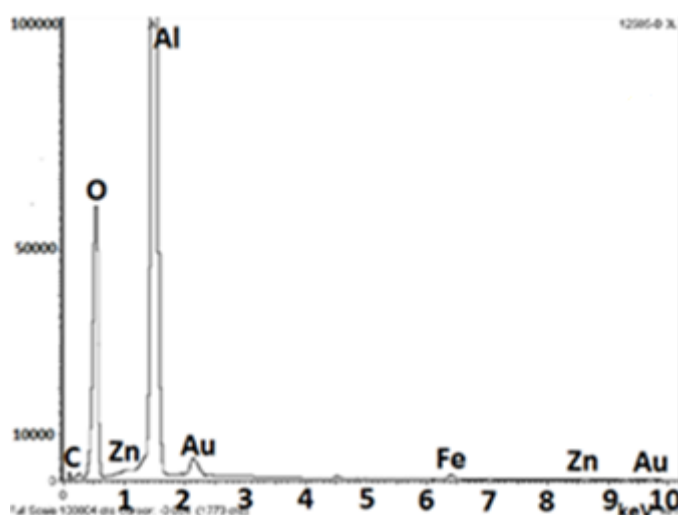


Figura 5.15 - Espectro via EDS da inclusão da amostra da bobina laminada a frio do Teste 2.

Nenhuma corrida do Teste 3 apresentou ocorrência do defeito na primeira fase, inferindo-se, portanto, que a válvula longa estendida proporciona uma maior estabilidade em torno dela, em relação aos demais testes, significando uma menor turbulência ao redor da válvula longa estendida, o que proporciona uma proteção adequada do banho pelo pó de cobertura, além de contribuir para a redução de formação de inclusões nas primeiras placas (WÜNNENBERG e CAPPEL, 2009).

5.4 Resultados de qualidade superficial na segunda fase de testes

O acompanhamento da inspeção se deu conforme os quesitos observados no item 4.2. A Figura 5.16 registra o índice de recusa e a qualidade de material até então inspecionada da 3º placa do distribuidor para a Referência, Teste 1 e Teste 2.

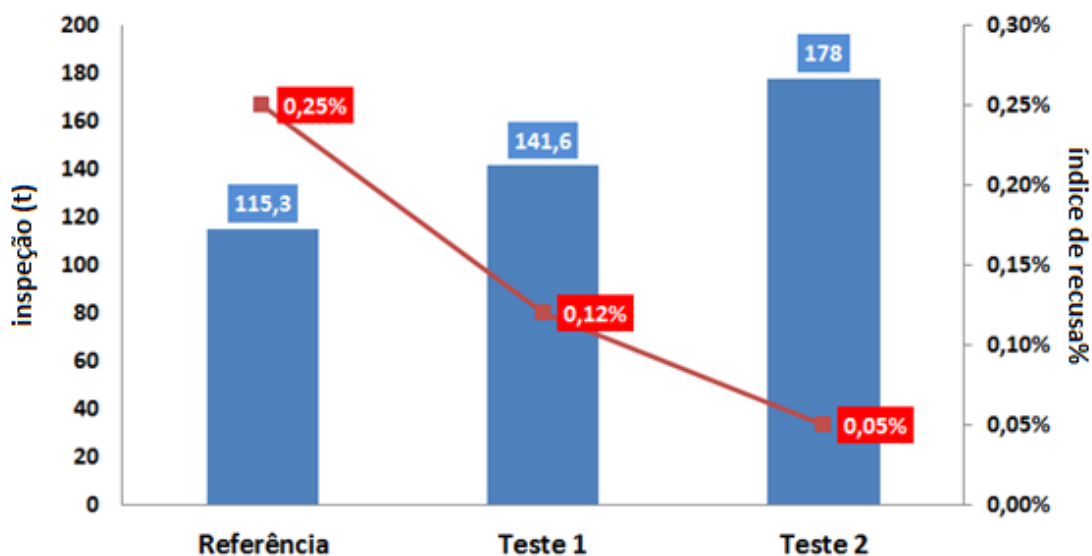


Figura 5.16 - Registro do aparecimento de recusa em material da 3º placa do distribuidor para os testes do estudo, considerando material laminado a frio inspecionado.

O motivo de escolha da 3º placa se deve ao fato de que, de acordo com a Figura 5.5, essa é a placa onde o teor de oxigênio total é o menor em comparação com as demais (1º e 2º placas) para todos os testes do estudo: Referência, Teste 1, Teste 2 e Teste 3. Conforme observado na figura, a corrida denominada de Referência foi a que apresentou maior índice de recusa por defeito superficial (0,25%), para uma menor quantidade de material inspecionado (115,3 t).

O Teste 1 apresentou valores intermediários em relação ao Teste 2 e à Referência, apresentando uma porcentagem de 0,12% para 141,6 t de material inspecionado. O Teste 2 apresentou a menor porcentagem de defeito superficial (0,05%) para uma maior quantidade de material inspecionado (178 t).

As Figuras 5.17 e 5.18 mostram os resultados de qualidade superficial durante os dois primeiros meses de acompanhamento para a Referência, Teste 1 e Teste 2. Os valores seguiram a tendência já apresentada anteriormente, onde a Referência continua com a maior porcentagem de defeito superficial, o Teste 1 como intermediário e o Teste 2 como a menor porcentagem de defeito observados em suas bobinas.

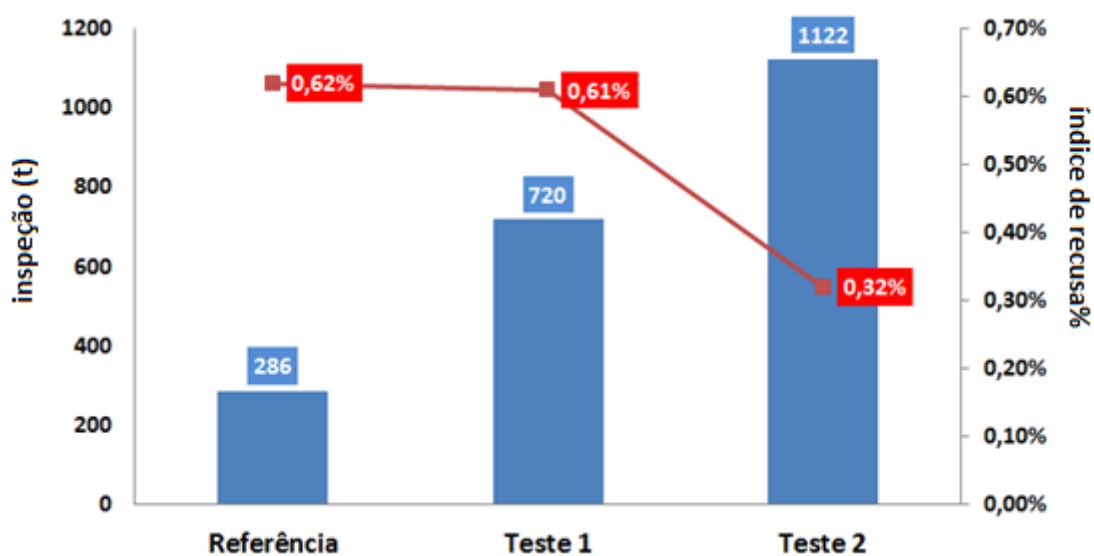


Figura 5.17 - Resultados de qualidade superficial da 3ª placa de distribuidor no 1º mês de acompanhamento, considerando material laminado a frio inspecionado em tonelada.

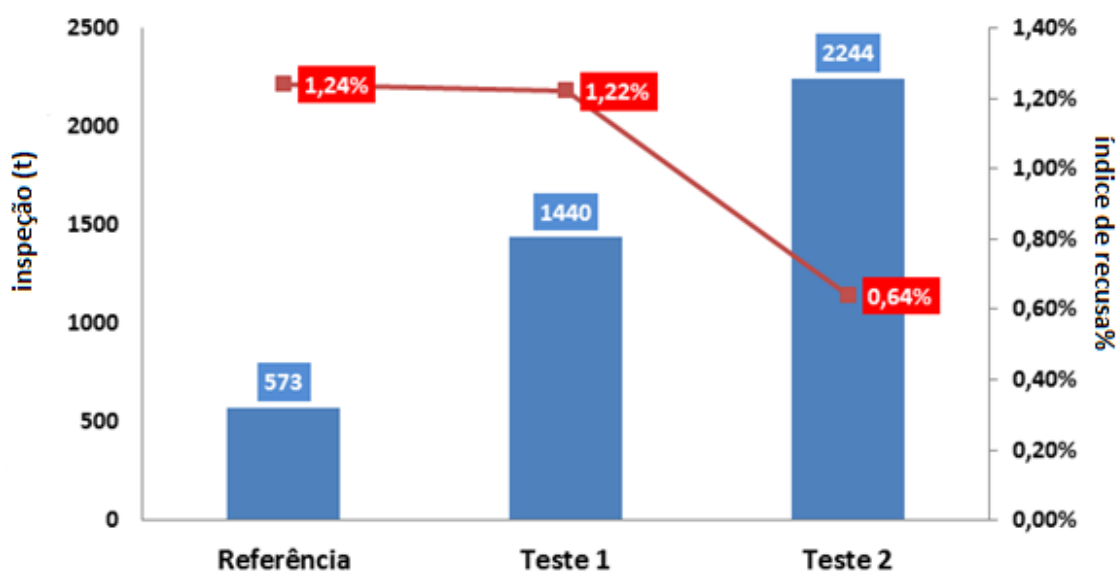


Figura 5.18 - Resultados de qualidade superficial da 3ª placa de distribuidor no 2º mês de acompanhamento, considerando material laminado a frio inspecionado em tonelada.

A Figura 5.19 mostra os resultados de qualidade superficial durante 6 meses de acompanhamento para a Referência, Teste 1 e Teste 2. Com um percentual de 3,72% a Referência foi a que apresentou o maior valor de defeitos superficiais entre os experimentos observados. O Teste 1 teve 3,70% para 4321 t inspecionadas durante esses meses. O Teste 2 apresentou 1,93% de defeitos para 6732 t de material inspecionado. Tendo em vista todos os valores registrados de defeitos para cada um dos testes, foi estabelecido um valor de amostragem representativa de 500 t de material inspecionado para o Teste 3, a fim de que fosse observada a relação entre ele e os demais. Foram inspecionadas 50 t a mais do que o estabelecido, registrando-se então 550 t de material inspecionado para o Teste 3, onde não houve ocorrências de defeitos superficiais.

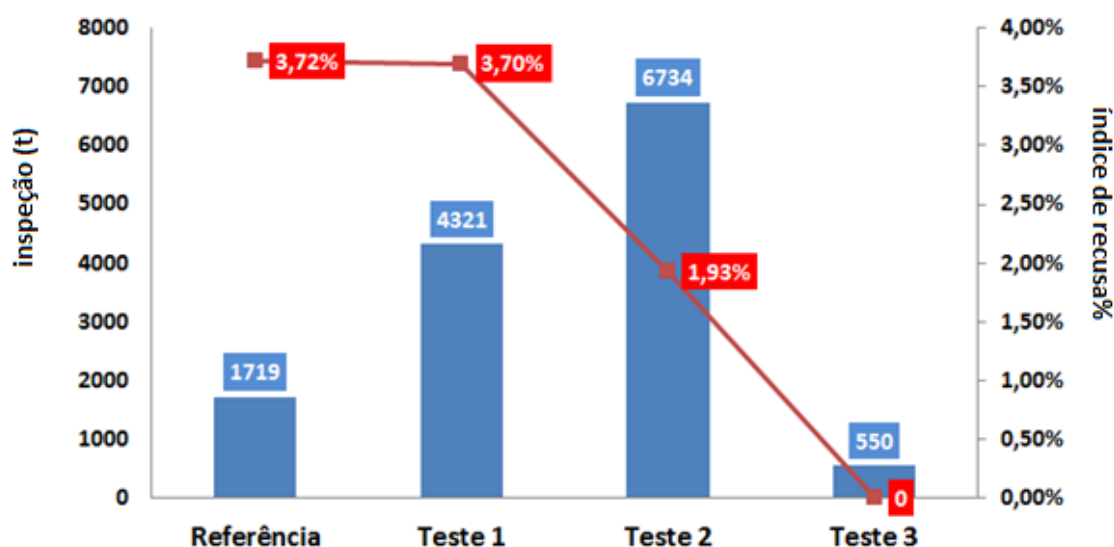


Figura 5.19 - Resultados de qualidade superficial da 3ª placa de distribuidor para todos os experimentos, considerando material laminado a frio inspecionado em tonelada.

A Referência apresenta o pior desempenho se comparada aos demais testes, e isso se deve ao fato de que a adição de pó de cobertura no distribuidor, quando este apresenta 28 t de aço líquido, deixa o banho exposto à reoxidação por mais tempo, contribuindo para a formação de inclusões, principalmente de Al_2O_3 .

O Teste 1 mostra que a adição de pó em 17 t de aço líquido no distribuidor, além de apresentar Al_2O_3 no produto final, contribui também para a incorporação desse pó (composto de Ca e Mg, conforme visto na Figura 5.9) ao banho líquido. Esse fenômeno que ocorre devido à turbulência provocada no distribuidor pelo jato de aço proveniente

da panela expelido pela válvula longa. Com 17 t ainda se não se tem uma estabilização do banho, favorecendo a incorporação do pó.

O Teste 2 apresenta uma porcentagem menor de defeitos superficiais se comparado aos anteriores. A explicação é devido à quantidade de aço líquido presente no distribuidor no momento de adição do pó (22 t). Nesse valor o aço já começa a cobrir a válvula longa, contribuindo para a estabilidade do banho, mas mesmo com esses cuidados, pode eventualmente apresentar defeitos superficiais à base de Al_2O_3 (conforme visto na Figura 5.13).

Pelo fato de ter sido realizado com a válvula estendida de 200 mm, o Teste 3 foi o que apresentou melhor desempenho se comparado aos demais, pois com um valor médio significativo de material inspecionado, não apresentou nenhuma ocorrência de defeito superficial. O extensor da válvula contribui para a estabilidade do banho, permitindo a adição de pó de cobertura no distribuidor, a um valor reduzido (17 t). Embora o Teste 3 e o Teste 1 apresentassem valores próximos de aço no momento da adição de pó, O Teste 1 apresenta mais chances de ocorrências de defeitos, pois o banho ainda não está estabilizado.

6 CONCLUSÃO

Foi possível observar uma relação entre o teor de oxigênio total no aço líquido, o aparecimento de defeitos superficiais nas bobinas provenientes das placas iniciais de lingotamento e o momento de adição de pó de cobertura no distribuidor.

Quando o pó de cobertura é adicionado com 28 t de aço líquido no distribuidor, o banho fica exposto à reoxidação por mais tempo, contribuindo para a formação de inclusões, principalmente à base de Al_2O_3 , apresentando o maior valor de defeito superficial entre os testes executados.

Se o pó de cobertura é adicionado próximo à 17 t de aço, sem um extensor na válvula longa, além de ocorrer reoxidação do banho, ocorre também o fenômeno de emulsificação, onde material proveniente do próprio pó se incorpora ao aço pelo mecanismo de turbulência causado pelo jato de aço despejado da panela pela válvula longa.

Quando o pó de cobertura é adicionado com 22 t de aço líquido no distribuidor, o banho fica menos exposto à reoxidação do que com 28 t e apresenta estabilidade, mas também há o aparecimento de inclusões à base de Al_2O_3 , embora com valores menores se comparados aos momentos de 28 t e 17 t (sem a válvula estendida).

Se o pó de cobertura é adicionado próximo à 17 t de aço com um extensor de 200 mm na válvula longa, não ocorre o fenômeno de emulsificação, pois o banho já está estabilizado. Não foi verificado para esse caso também alguma ocorrência de defeito superficial causado pela reoxidação do aço.

7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para uma avaliação futura pode ser empregada a técnica de contagem de inclusões em microscópio aliada à medição do teor de oxigênio total. Um outro parâmetro que pode ser verificado é a inertização do distribuidor visando a diminuição do *pick-up* de oxigênio total reduzindo assim a quantidade de inclusões presentes no aço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. G. **Melhoria no padrão de escoamento do aço líquido no distribuidor do lingotamento contínuo 01 da Aperam Inox América do Sul**. Dissertação Mestrado em Engenharia Metalúrgica. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2014, 79p.

ARGON SAMPLING SYSTEMS. For AOD, Laddle Stations, **Degasser and Tundish. Heraeus Electro-Nite International**, 2006. Disponível em: <<http://www.kataloge.xyz/heraeus/en/argon-sampling/argon-sampling.pdf>> Acesso em: 27 abr. 2019.

ASTM - American Society For Testing Materials. ASTM E45-05. **Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel**. Philadelphia, PA, 2002.

ASTM International, ASTM E1806. **Standard Practice for Sampling Steel and Iron for Determination of Chemical**, West Conshohocken, PA, 2018a, 23 p.

ASTM International, ASTM E1019. **Standard Test Methods for Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen, and Oxygen in Steel**, Iron, Nickel, and Cobalt Alloys by Various Combustion and Inert Gas Fusion Techniques, West Conshohocken, PA, 2018b, 22 p.

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**, v. 29, n. 6, 2002. pp. 427

BIELEFELDT, W. V. **Estudo do Tratamento de Inclusões com Cálcio na Fabricação do Aço SAE 8620**. Dissertação Mestrado em Engenharia Metalúrgica. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. 134p.

BRAGA, B. M. **Modelamento matemático da inertização de distribuidores para lingotamento contínuo de aços**. Dissertação Mestrado em Engenharia Metalúrgica Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2015. 197p.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo-SP, Brasil: Editora Edgard Blücher Ltda. 1983, pp. 121-198,

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

DAVIES, I. G.; MORGAN, P. C.; Secondary Steelmaking Developments on Engineering Steel at Stocksbridge Works, BSC. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 12, n. 4, p. 176-184, 1985.

DEKKERS, R. **Non-metallic inclusions in steel**. Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium, 2002, 158p .

DEKKERS, R.; BLANPAIN, B.; WOLLANTS, P. Nozzle Plugging of Calcium- treated Steel. **AIST Transactions**, August, 2004, p. 1-8.

FACO, R. **Levantamento das inclusões nos principais grupos de aços produzidos em aciaria do tipo LD**. Dissertação Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; São Paulo, 2005, p. 108.

FINARDI, J. Inclusões em aço: seu efeito e seu controle. In: **II Congresso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Mackenzie**. São Paulo-SP, Brazil, out. 1989. p. 01-28.

HERRING, D. H. Steel Cleanliness: Inclusions in Steel. *Industrial Heating*. August 2009, p. 18-20.

JACOBI, H.; WUNNENBERG, K. Methods for determination of oxide cleanness in steel, IISI Study on Clean Steel, **International Iron and Steel Institute**, Belgium, 2004, pp. 307-309.

KAY, D. A. R. International Symposium on the Effects and Control of Inclusions and Residuals in Steels, **Canadian Metallurgical Quarterly**, v. 24, n. 2, p. 175, 1985.

KIESSLING, R.; LANGE, N. **Non-metallic inclusions in steel**. Part II: Inclusions belonging to the systems MgO-SiO₂-Al₂O₃, CaO-SiO₂-Al₂O₃ and related oxide systems. (Sulphide inclusions). London, UK: The Iron and Steel Institute, 1966.

KIMURA, H. et al. Innovative Technologies in Continuous Casting Tundish. **Nippon Steel Technical Report**, n. 61, p. 22-28, abr. 1994.

KIRSCH-RACINE, A.; BOMONT-ARZUR, A.; CONFENTE, M. Calcium Treatment of Medium Carbon Steel Grades for Machinability Enhancement: From the Theory to Industrial Practice. **ATS International Steelmaking Conference**, Paris, p. 591-597, 2007.

LARSEN, K.; FRUEHAN, R. J. Calcium Modification of Oxide Inclusions. **Iron & Steelmaking**, July 1990, p. 45-51.

LIU, R. et al. Measurements of Molten Steel Surface Velocity and Effect of Stopper-rod Movement on Transient Multiphase Fluid Flow in Continuous Casting. **ISIJ International**, Tokyo, v .54, n. 10, p. 2314-2323, 2014.

MAPELLI, C. **Non-Metallic Inclusions and Clean Steel**. La Metallurgia Italiana, p. 43-52, jun. 2008.

McPHERSON, N. A.; McEAN, A. Continuous casting”, Non- metallic inclusions in continuously casting steel. **The Iron and Steel Society**, Warrendale, Pennsylvania, USA, 1995, v. 7.

MENDONÇA, A. F. G. **Avaliação do efeito da injeção de gás sobre a flotação de inclusões em um distribuidor de lingotamento contínuo**. Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2016. 188p.

MILLMAN, S. Basic features and operating practices-Clean steel. In: **IISI Study on Clean Steels**. International Iron and Steel Institute-IISI, Brussels, Belgium, 2004, pp. 39-60.

MIRANDA, M. **Projeto Tubo Longo Estendido**. Usiminas Ipatinga - Tundish - MLC 1&2 2017 (Relatório interno de P&D). Vesuvius Modeling Group, VESUVIUS, 2017.

MORAIS, A. A. **Estudo fenomenológico do mecanismo de obstrução do fluxo de aço do distribuidor para o molde no início do lingotamento contínuo de placas**. Dissertação Mestrado em Engenharia de Materiais e Metalúrgica. Ouro Preto: Escola de Minas da UFOP, 2006. 169p.

NADIF, M. et al. Control of Steel Re-Oxidation and CC Nozzle Clogging, IISI study on Clean Steel: State of the Art and Process Technology in Clean Steelmaking, Literature Survey, **IISI Committee on Technology (TECHCO)**, © International Iron and Steel Institute, p. 87-164, 2004.

NAKASHIMA, J. et al. **Origin of Nonmetallic Inclusions in Ladle Transition part of Continuously Cast Slabs**. Tetsu-to-Hagané, v. 93, n. 5, p. 348-354, 2007.

NAKASHIMA, J.; TOH, T. Improvement of Continuously Cast Slabs by Decreasing Nonmetallic Inclusions. **Nippon Steel Technical Report**, n. 104, p. 42-47, ago. 2013.

NASCIMENTO, R. P. **Remoção de inclusões não-metálicas do aço líquido através do borbulhamento de argônio pelo fundo do distribuidor de lingotamento contínuo da Arcelor Mittal Tubarão** - Dissertação de Mestrado. Ouro Preto: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT da Escola de Engenharia da UFOP, 2008, p. 17; 55-69.

NUSPL, M. et al. Qualitative and quantitative determination of micro-inclusions by automated SEM/EDX analysis. **Analytical Bioanalytical Chemistry**, v. 379, n. 4, 2004. pp. 640-645.

OTOTANI, T. **Calcium Clean Steel**. Berlin, Germany; New York, USA: Springer-Verlag, 1986, 141p.

PIELET, H. M.; BHATTACHARYA, D. Thermodynamics of nozzle blockage in continuously casting of calcium-containing steels. Metallurgical Transactions B. v. 15B, September, pp. 547-562, 1984. Toronto, Canada, 1986, Warrendale, **Iron and Steel Society of AIME**, pp. I-25 - I-42, 1986.

PIRES, J. C. S.; GARCIA, A. Modification of Oxide Inclusions Present in Aluminum-Killed Low Carbon Steel by Addition of Calcium. **REM - Revista Escola de Minas**. Ouro Preto, v. 57, n. 3, p. 183-189, 2004.

RICHAUD, J. Steel Flow Understanding for Higher Quality Steel Casting. **Curso Ministrado no 45º Seminário de Aciaria – Internacional**. Porto Alegre, ABM, 2014, 330p.

RIZZO, E. M. S. **Introdução aos processos de lingotamento dos aços**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006, 158 p

SASAI, K.; MIZUKAMI, Y. Reoxidation Behavior of Molten Steel in Tundish. **ISIJ Int.**, v. 40, n. 1, p. 40, 2000.

SCHADE, J. H.; O'MALLEY, R. J.; KEMENY, F. L.; SAHAI, Y.; ZACHARIAS, D. J. Tundish operations. In: CRAMB, A. W. **The Making, Shaping and Treating of Steel: Casting volume**. The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, Warrendale, PA: 2003. Ch. 13, 6p.

SICHEN, D.; BESKOW, K.; NAGENDRA, T. Formation and Chemical development of nonmetallic 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, 2004, June 20-24.

SIMENSEN, C. J. The effect of dissolved elements and inclusions on the properties of metal products. In: ENGH, T. A. **Principles of metal refining**, Oxford University Press, Oxford, UK, pp. 1-38, 1992

SLAG ATLAS. **Düsseldorf**. Germany: Verlag Stahleisen GmbH, 1981, 282 p.

STORY, S. R.; PICCONE, T. J.; FRUEHAN, R. J.; POTTER, M.; Inclusions Analysis to Predict Casting Behavior. **Iron & Steel Technology**. Sept. 2004, p. 163-169.

STORY, S. R.; STANICH, D.; CAMILLO J. Effect of Initial Tundish Flux Addition Timing on Steel Cleanliness. In: **Aistech Conference Proceedings**. St. Louis, Missouri: Association for Iron and Steel Technology, 2009. p. 1201-1208.

SUZUKI, T. et al. **Reoxidation of quality of aço fundido and panela por injection of concha**. Tetsu-to-Hagané, v. 69, n. 12, p. 914, 1983.

THOMAS, B. G.; DENISSOV, A.; MIKI, Y.; SHIMADA, Y. Model of inclusion removal during RH degassing of Steel, **ISS 80th Steelmaking conference**, 1997, p. 31-38.

TURKDOGAN, E. T. **Fundamentals of Steelmaking**, 1th ed., Cambridge: The Institute of Materials. The University Press, 1996.

VAN ENDE, M. A. **Formation and morphology of non-Metallic Inclusions in Aluminium Killed Steels**. Tese Doutorado em Ciências Aplicadas. Leuven: Departement Metaalkunde En Toegepaste Materiaal Kunde, 2010, 277p.

WANG, L.; LEE, H. G.; HAYES, P. Prediction of the Optimum Bubble Size for Inclusion Removal from Molten Steel by Flotation. **ISIJ Int**, v. 36, n. 1, p. 7-16 e 17-24,

1996.

WÜNNENBERG, K., CAPPEL, J. **Measures to Improve Oxide Cleanness in Continuous Casting**. In: Aistech, 2009.

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

YANG, S.; LI, J.; WANG, Z.; LI, J.; LIN, L. Modification of MgO.Al₂O₃ Spinel inclusions in Al-killed Steel by Ca-treatment. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, v. 18, n. 1, p. 18-23, 2011.

ZHANG, L.; THOMAS B. G. State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness. **ISIJ International**, v. 43, n. 3, p. 271-291, 2003.

ZHANG, L.; THOMAS, B. Alumina inclusion behavior during steel deoxidation. In: 7th European Electric Steelmaking Conference. Venice, Italy. **Associazione Italiana di Metallurgia**. Milano - Italy, 2002. p. 2.77-2.86.

APÊNDICE

**AVALIAÇÃO DA LIMPIDEZ DAS PLACAS DE AÇO ULTRA BAIXO CARBONO
PROVENIENTES DO FLUXO INICIAL DO DISTRIBUIDOR DO LINGOTAMENTO
CONTÍNUO ***

*Sérgio Roberto Lopes Moreira*¹
*Rodrigo Madrona Dias*²
*Rodrigo Seara Martins*³
*Leonardo José Silva de Oliveira*⁴
*Fabiano Abrahão Moreira*⁵
*Leandro Rocha Lemos*⁶

Resumo

O nível de inclusões presentes no aço líquido interfere diretamente na qualidade das placas produzidas por lingotamento contínuo e são determinantes na formação de defeitos superficiais em produtos laminados a frio. A reoxidação do aço, bem como a passagem de escória do distribuidor para o molde, a interação do aço com o pó de cobertura do distribuidor e com o pó fluxante, têm forte influência na limpidez das placas originadas no processo de solidificação no molde. No presente trabalho, avaliaram-se as inclusões formadas durante o início do processo de lingotamento contínuo para aços de ultra baixo teor de carbono, sob três diferentes condições de adição do pó de cobertura do distribuidor, além da própria condição padrão. O objetivo do estudo é reduzir a quantidade das inclusões presentes, e consequentemente, os defeitos superficiais em placas iniciais, por meio da relação com o teor de oxigênio no veio da máquina de lingotamento contínuo. Tal investigação visou fornecer informações para alterações nas condições do processo para melhoria da qualidade do produto final.

Palavras-chave: Distribuidor; Esfoliamento; Reoxidação; Inclusões.

**ULTRA LOW CARBON STEEL CLEANLINESS EVALUATION SLABS FROM CONTINUOUS CASTING
INITIAL FLUX**

Abstract

The inclusions level present in molten steel interferes directly in the slabs produced by continuous casting and are determinant in surface defects formation in cold rolled products. The steel reoxidation, as well as the slag carried from the tundish to the mold, the interaction of the steel with tundish covering powder and mold flux powder, have a strong influence on the slabs cleanliness originated in solidification process in the mold. In the present work, the inclusions formed during the beginning of the continuous casting process for ultra low carbon steels were evaluated, under three different conditions of addition from tundish powder covering, besides the standard condition itself. The study's objective is to reduce the inclusions, and consequently, superficial defect in initial slabs and, it will be possible to identify them by means of the relation of the oxygen content in the continuous casting machine strand. Such research was intended to provide information for changes in the process conditions to improve the quality of the final product.

Keywords: Tundish; Slivers; Reoxidation; Inclusions.

* Contribuição técnica ao 50º Seminário de Aciaria, Fundição e Metalurgia de Não-Ferrosos, parte integrante da ABM Week 2019, realizada de 01 a 03 de outubro de 2019, São Paulo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Um dos fatores determinantes para a qualidade das placas produzidas no processo de lingotamento contínuo é o nível de inclusões presentes no aço líquido. Cabe ao distribuidor a função de alimentar os moldes durante as trocas de panela, garantindo um nível de aço de trabalho adequado para que o processo não seja interrompido. O equipamento é usado também para flutuação de inclusões não metálicas e controle de temperatura do banho [1]. As inclusões não metálicas são fases vítreo-cerâmicas (óxidos, sulfetos e nitretos), que se incorporam à matriz metálica do aço, causando interrupção da continuidade dessa matriz metálica, provocando danos às propriedades mecânicas do aço [2]. Essas inclusões têm as mais diversas origens relacionadas ao processo de lingotamento contínuo, vindas principalmente de reações químicas durante a adição de ligas utilizadas no processo e da interação do aço com ar, escória e refratário, destacando-se: a reoxidação do aço líquido que ocorre em decorrência da exposição ao ar atmosférico; arraste de escória, pós de cobertura do distribuidor e de pós fluxantes no molde pelo fluxo de aço [3, 4]. As inclusões contribuem para a formação de defeitos superficiais nos produtos laminados, podendo gerar recusas ou retrabalho onerando os custos de processo. Assim, o entendimento do tipo de inclusão auxilia na determinação de sua possível origem no processo e na proposição de contramedidas para evitá-las. Na Figura 1 abaixo são mostrados exemplos de defeitos superficiais em um produto laminados a frio (a) e em outro produto laminado a frio revestido com Zinco (c), ambos caracterizados com a utilização do microscópio eletrônico de varredura (MEV) como inclusão de alumina (Al_2O_3) (b e d).

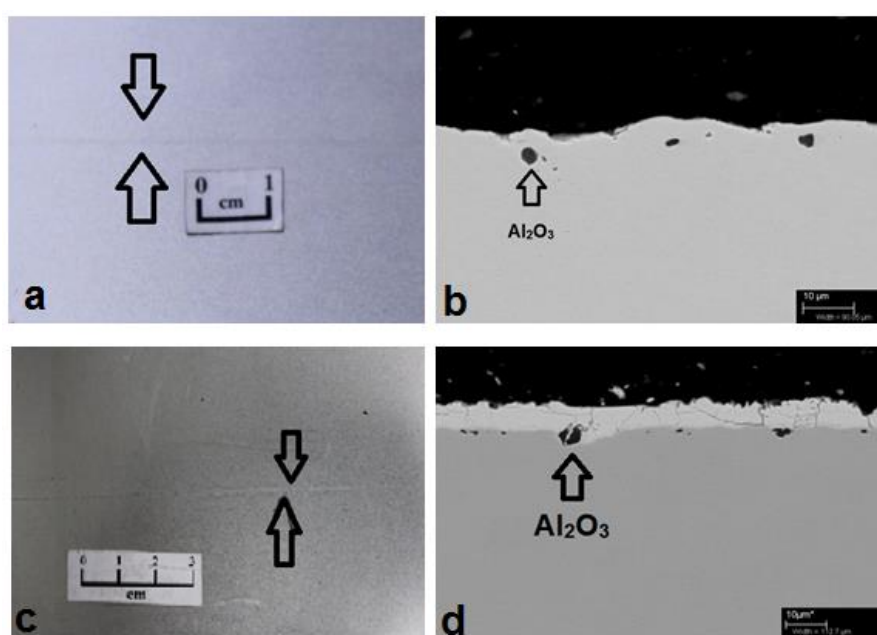


Figura 1. Defeitos superficiais em material: (a) laminado a frio; (b) presença de inclusão de alumina; (c) laminado a frio revestido; (d) presença de inclusão de alumina [5].

Segundo Sasai e Mizukami [6], as placas provenientes do fluxo inicial (partida do distribuidor) podem ter um nível maior de inclusões em relação às demais, pois o tempo de exposição do aço à atmosfera é maior. Além disso, pode ocorrer o arraste de materiais presentes no distribuidor, como resíduos de refratários e outros gerados na sua preparação, transporte e secagem. Neste caso, estas placas iniciais ficam vulneráveis ao aparecimento de defeitos que

podem prejudicar a aplicação do produto, após laminadas. Na Figura 2 são apresentados os pontos que, por meio da reoxidação, podem ser fontes de contaminação para o aço líquido, da sua saída na panela até sua chegada ao molde, além do próprio ambiente do distribuidor [7].

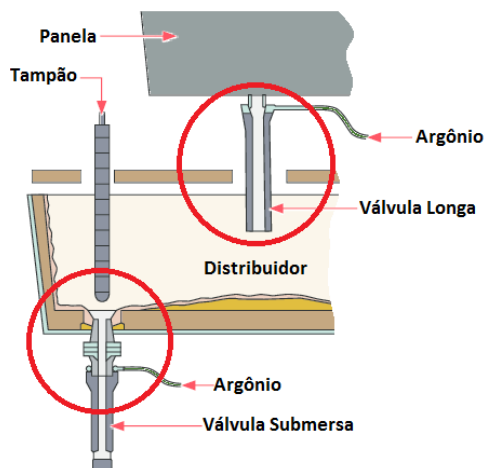
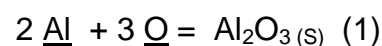


Figura 2. Pontos de conexões existentes no processo de lingotamento contínuo com uso da válvula longa e válvula submersa [7].

O pó de cobertura é utilizado no distribuidor, com a função de proteger o aço do contato com a atmosfera, evitando a perda de elementos de liga do aço e o aparecimento de inclusões formadas a partir da reoxidação. A contaminação do aço pode ocorrer durante o enchimento do distribuidor enquanto o material de cobertura não executa plenamente sua função [7]. Segundo Story *et al* [8], o momento da adição de pó deve ser realizado com cuidado, pois se for efetuado antes da estabilização da superfície do banho, o pó poderá ser incorporado ao aço. Por outro lado, quanto mais se aumenta o tempo de espera para a adição do pó de cobertura, maior será o aumento da reoxidação que poderá aumentar a concentração de inclusões, formadas principalmente por alumina (Al_2O_3), especialmente nos primeiros 15 minutos de operação de lingotamento em aços ultra baixo carbono (UBC), causando o defeito denominado de esfoliamento. Isso mostra que a geração dessas inclusões pode ser decorrente da reoxidação do aço durante o preenchimento inicial do distribuidor. Logo, quaisquer esforços para proteger o aço da atmosfera produzirá aço mais limpo. A formação da alumina é demonstrada conforme equação 1 [8].



Zhang e Thomas [2] afirmam que há uma relação direta entre a incidência de esfoliamento nos produtos finais e o teor de oxigênio total observado no aço líquido, onde quanto maior a concentração deste, maior será a incidência do defeito, o que é mostrado pela Figura 3 abaixo. 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 utilizando sensores de medição de oxigênio.

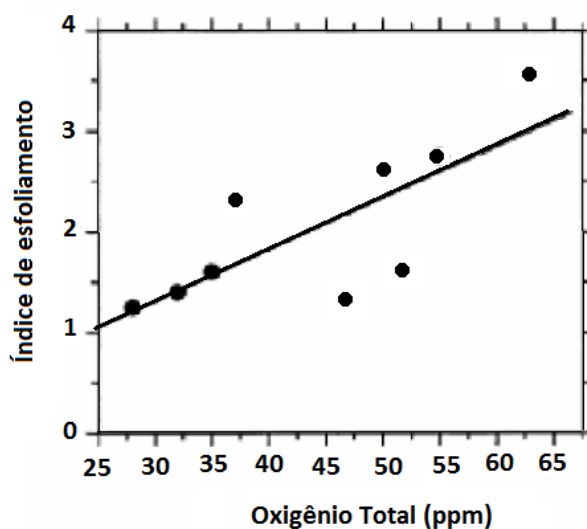


Figura 3. Relação entre o Oxigênio total no aço e o índice de esfoliamento no produto [2].

Assim, com foco no que foi discutido, o objetivo do estudo foi propor uma prática operacional para a redução da quantidade de alumina, proveniente da reoxidação presente durante a partida da máquina, sendo possível identificá-la por meio da relação com o oxigênio no veio da máquina de lingotamento contínuo, contribuindo para melhoria da qualidade do produto final. Para isso, avaliaram-se as inclusões formadas durante o início do processo de lingotamento contínuo para aços UBC, sob três diferentes condições de adição do pó de cobertura do distribuidor, além da própria condição padrão.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

Foram avaliadas nesse estudo 3 condições diferentes de teste para o momento de adição do pó de cobertura, baseadas no peso de aço líquido no distribuidor, conforme Tabela 1. A prática corrente para a adição de pó se dá por volta de 28 t de aço no distribuidor, sendo também avaliada e utilizada como a base de Referência do presente trabalho. Para o Teste 1, o pó de cobertura foi adicionado no distribuidor quando o peso de aço líquido presente nele atingiu entre 17 a 20 t. Para o Teste 2, o peso de aço líquido visado foi entre 22 a 23 t. No Teste 3, foi de 16 t. A razão para um menor peso visado nessa condição, foi a utilização da válvula longa estendida com um prolongamento de 200 mm em sua extremidade, permitindo a adição de pó no distribuidor com menor peso de aço líquido nele.

Tabela 1. Peso de aço líquido visado no distribuidor no momento da adição de pó de cobertura

Teste	Aço líquido (t) no distribuidor
Teste 1	17~20
Teste 2	22~23
Teste 3	16
Referência	28

Na Figura 4 são mostradas as especificações dimensionais e técnicas do distribuidor utilizado e da válvula estendida que foi utilizada somente no Teste 3. O aço UBC utilizado apresenta 0,001% de teor de carbono e 0,030% de alumínio. Na composição química do pó de cobertura do distribuidor são encontrados os óxidos: CaO, Al₂O₃ e MgO.

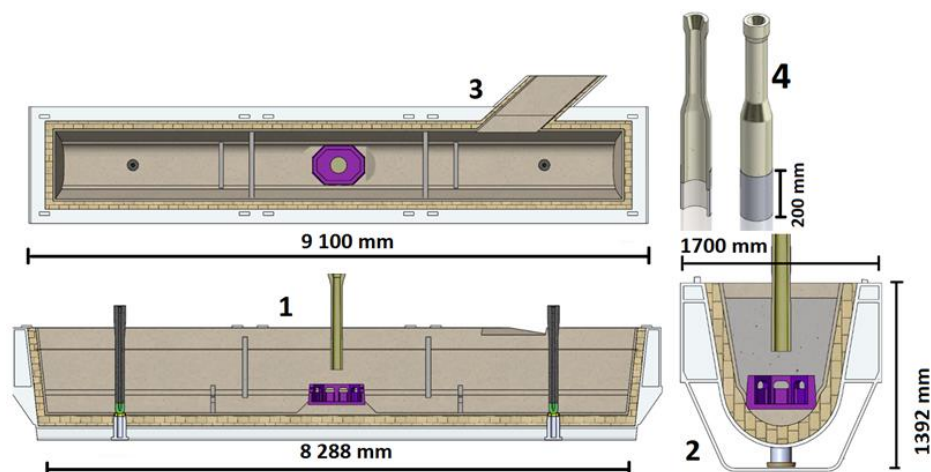


Figura 4. Especificações dimensionais e técnicas do distribuidor: 1- corte frontal; 2- corte lateral; 3- corte superior e 4- válvula estendida utilizada no teste 3. [9].

Considerando as condições propostas, foram realizadas medições do teor de oxigênio no molde da máquina de lingotamento contínuo para três corridas em cada uma das condições de teste propostas. Além disso, a qualidade do produto final laminado foi comparada com os teores medidos no lingotamento.

2.1.1 Retirada e análise de amostras no lingotamento e no produto final

Para cada teste, houve o acompanhamento da partida de 3 corridas e para cada corrida foi realizada a retirada de amostras no molde a cada 2 metros lingotados, totalizando 10 amostras ao longo dos primeiros 20 metros do veio da máquina de lingotamento. Houve também o acompanhamento para retirada de amostras de uma corrida com a prática usual, denominada de Referência. Tal amostragem buscou garantir que a medição do teor de oxigênio atingisse até a 3^o placa inicial do distribuidor, pois cada placa tem o comprimento médio de 6 metros. A aquisição de amostras para análise da % de oxigênio total foi feita utilizando o amostrador tipo TOS “Total Oxygen Sample”, do fornecedor Heraeus Electro-Nite, de acordo com a Figura 5 [11]. 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. As amostras foram confeccionadas seguindo a norma ASTM E1806 [12], sendo então enviadas ao laboratório, onde foram preparadas para análise do oxigênio total da corrida. A análise dos teores de oxigênio foi realizada no equipamento denominado Leco TC 600 (Precisão: 0,025 ppm), conforme norma ASTM E1019 [13].

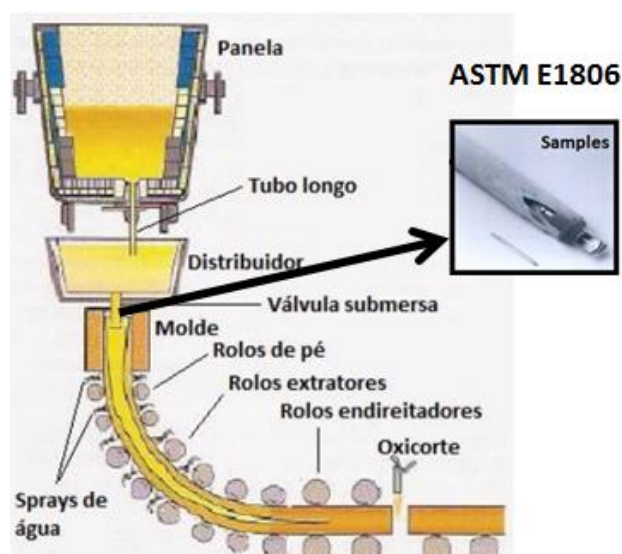


Figura 5. Esquema da retirada de amostras no molde da máquina de lingotamento contínuo [14].

2.1.2 Método de Análise de Qualidade

Houve o acompanhamento na inspeção final do produto para todas as condições testadas. A inspeção final do produto consiste em observar os aspectos superficiais das bobinas a fim de bloquear aquelas que apresentam eventos de qualidade que podem ser prejudiciais à aplicação solicitada previamente. Cada placa tem o comprimento médio de 6 metros. Foram retiradas amostras das bobinas laminadas a frio que apresentaram alguma ocorrência de desvio de qualidade para análise no Centro de Pesquisa da USIMINAS. As amostras foram preparadas metalograficamente e analisadas ao MEV com EDS, a fim de se identificar as inclusões presentes no aço.

2.2 Resultados e Discussão

2.2.1 Adição do pó de cobertura

Foi efetuado o acompanhamento de 3 corridas para cada condição de teste, totalizando 9 corridas. Os valores obtidos na adição do pó de cobertura para cada uma delas são descritos na Tabela 2. O maior valor médio foi o obtido no Teste 2. Os valores médios dos Testes 1 e 3 se assemelham. Para a Referência foi observada apenas uma corrida com o valor de 28t.

Tabela 2. Peso de aço líquido obtido no distribuidor no momento da adição de pó de cobertura

Aço líquido (t) no distribuidor					
Teste	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Média	Desvio Padrão
Teste 1	17	19	17	17,67	1,15
Teste 2	22	22	22	22,0	0,00
Teste 3	16	18	18	17,63	1,20
Referência	Histórico			28	-

2.2.2 Análise de amostras e teor de Oxigênio

Nas Figuras 6 e 7 são mostrados os resultados obtidos para a Referência, Teste 1, Teste 2 e Teste 3 da medição do teor de oxigênio (em ppm) / minuto, para as amostras nas seguintes condições: Temperatura média de 1540°C; Teor médio de alumínio: 0,03%; Velocidade média de lingotamento: 1m/min para as corridas. A maior variação do teor de oxigênio, nos primeiros 2 minutos de lingotamento, é na Referência, podendo chegar a uma variação média de 100 ppm. A menor variação, para o mesmo instante, é para o Teste 3, obtendo um teor médio de oxigênio de 60 ppm. Os Testes 1 e 2 obtêm valores próximos nos primeiros 2 minutos.

A partir do instante igual a 12 minutos, todas as condições apresentam valores médio próximos, ficando entre 20 e 40 ppm, o que leva a conclusão que, a partir disso, a turbulência no distribuidor próximo à válvula longa, começa a se estabilizar, permitindo uma diminuição da incorporação do pó no banho. Story *et al* [8] constataram que, quando há atraso na adição do pó de cobertura na partida do distribuidor, contribui para o aparecimento de elevado conteúdo de inclusões de alumina (Al_2O_3), especialmente nos primeiros 15 minutos de lingotamento, para um aço UBC acalmado a alumínio. O instante encontrado no trabalho (12 minutos) se encontra próximo do artigo referenciado, uma vez descontados os aspectos dimensionais.

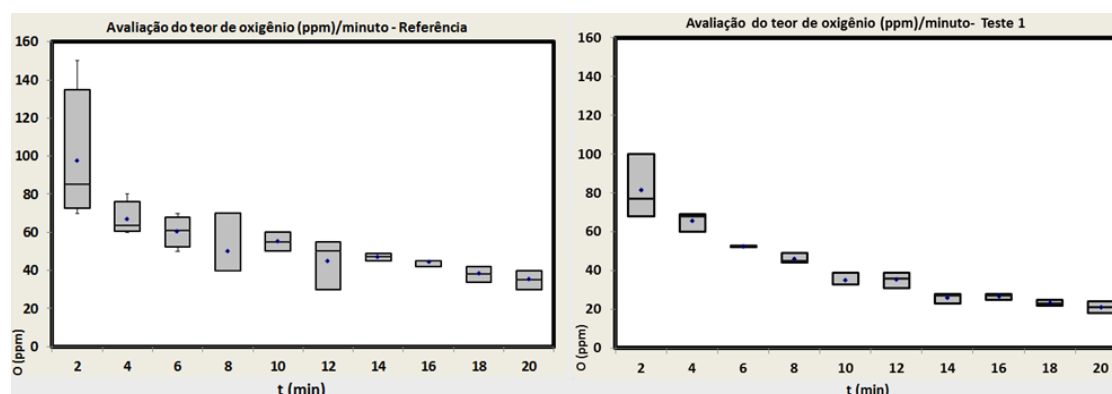


Figura 6. Resultado da avaliação do teor de oxigênio: Referência e Teste 1.

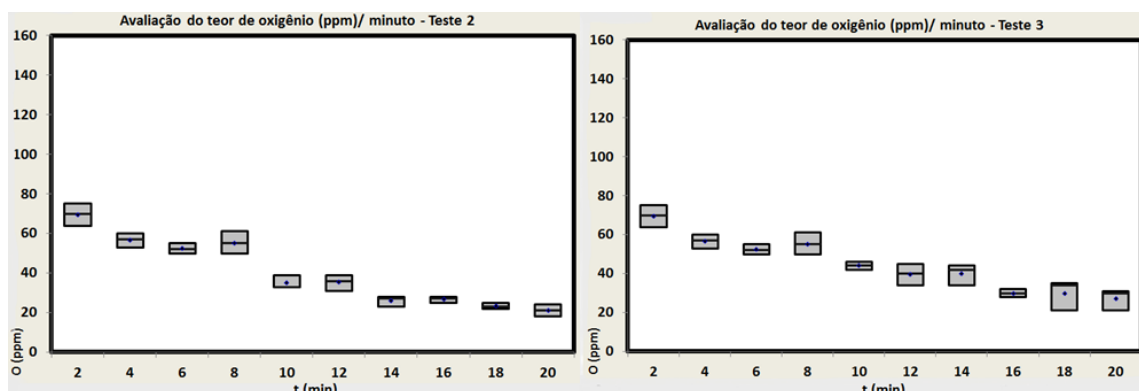


Figura 7. Resultado da avaliação do teor de oxigênio: Teste2 e Teste 3.

Na Figura 8 são mostrados os teores médios das concentrações obtidas para cada condição de teste por minuto, desde a partida do veio da máquina de lingotamento contínuo, sendo separado por placa para uma melhor análise. Do ponto de vista de teor de oxigênio obtido em todas as amostras, separando por teste, observa-se que a Referência apresentou os maiores valores obtidos, sendo mais propícia à formação de esfoliamento nas primeiras placas. O Teste 1, até o instante de 6 minutos, apresenta o segundo maior valor obtido para o teor de oxigênio, pois a partir desse instante e até 20 minutos, é o Teste 2 que ocupa o segundo lugar em maior teor. O Teste 3 é o que apresenta a menor variabilidade dentre eles, sendo portanto o mais estável. Até o instante de 5 minutos, ele se mantém próximo do Teste 2, pois a partir disso, os valores obtidos para a concentração de oxigênio para o Teste 3, são próximos dos valores obtidos para o Teste 1. A razão da proximidade de valores para os valores de oxigênio total para o Teste 1 e Teste 3, a partir do instante de 6 minutos (ou 2ª placa do distribuidor), deve-se ao fato que ambos tiveram adição de pó de cobertura com peso de aço visado semelhante, conforme visto anteriormente na Tabela 2. A diferença entre os dois testes é que no Teste 3 foi utilizado a válvula longa estendida.

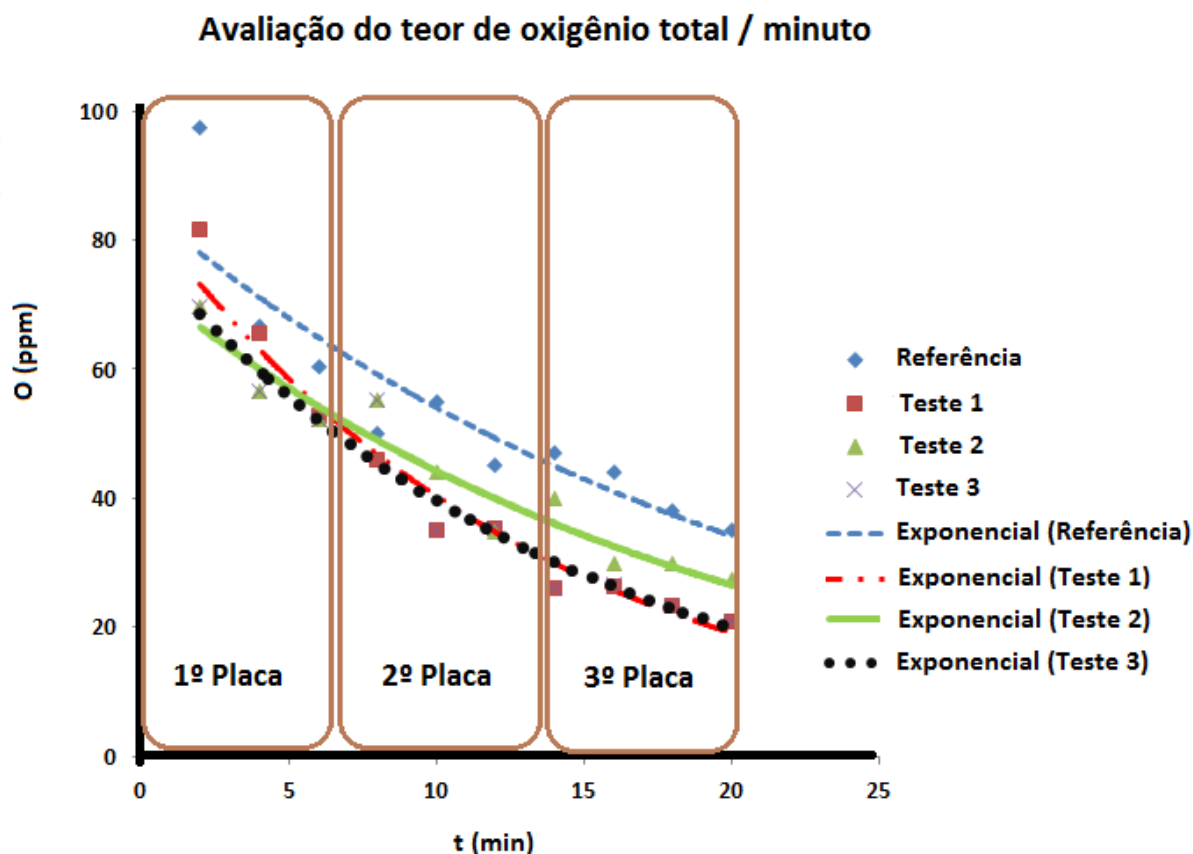


Figura 8. Avaliação do teor de Oxigênio do aço UBC nos testes.

2.2.3 Acompanhamento na inspeção final

Todas as corridas testadas foram acompanhadas durante a inspeção final de produto. Foram retiradas amostras daquelas que tiveram eventos de qualidade para serem analisadas. Na Figura 9 é mostrado o esfoliamento de uma amostra retirada da segunda placa de partida do lingotamento para a Referência (a), bem como as caracterizações realizadas via MEV (b) e EDS (c), constatando a presença de alumina nesse caso, corroborando a constatação de Story *et al* [8] de que o atraso na adição do pó de cobertura favorece a reoxidação do aço.

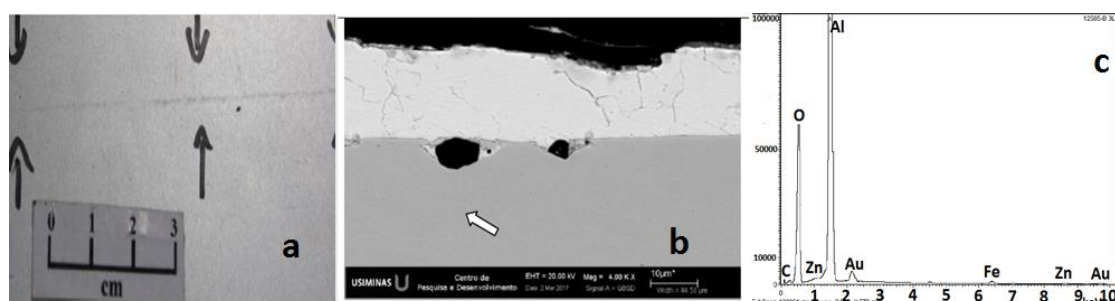


Figura 9. Análise e caracterização de inclusão da Referência.

Na Figura 10 é mostrado o esfoliamento de uma amostra retirada da terceira placa de partida do lingotamento de uma das corridas do Teste 1 (a), bem como as caracterizações realizadas via MEV (b) e EDS (c). Conforme a parte (b) da Figura, há duas regiões (1 e 2) que apresentaram os seguintes elementos via EDS: (c 1) alumina e cálcio; (c 2) alumina e magnésio.

Os elementos encontrados na amostra além da alumina (cálcio e magnésio) sugerem a incorporação do pó de cobertura no aço. Jacobi e Wunnenberg [15] afirmam que o fenômeno ocorre devido aos seguintes mecanismos: agitação resultante do borbulhamento de gases na interface metal / pó; impacto do fluxo de vazamento na camada de pó; drenagem causada pelo efeito vortex. Todos esses fatores contribuem para o aprisionamento de ar no aço (reoxidação), exercendo influência na formação de inclusões, dificultando a função do pó de cobertura.

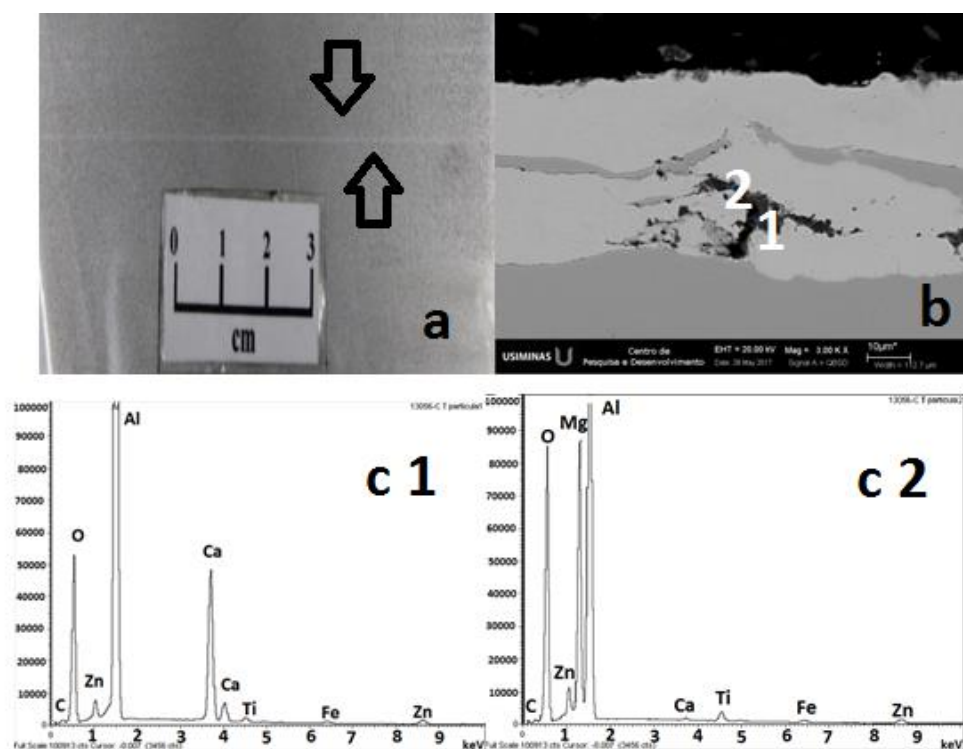


Figura 10. Análise e caracterização de inclusão do Teste 1.

Na Figura 11 é mostrado o esfoliamento de uma amostra retirada da segunda placa de partida do lingotamento de uma das corridas do Teste 2 (a), bem como as caracterizações realizadas via MEV (b) e EDS (c), constatando somente a presença de alumina nesse caso.

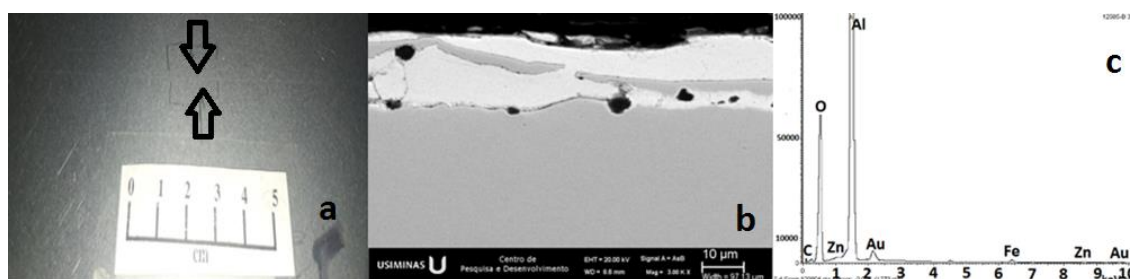


Figura 11. Análise e caracterização de inclusão do Teste 2.

Nenhuma corrida do Teste 3 apresentou evento de qualidade, inferindo-se portanto que a válvula longa estendida proporciona uma maior estabilidade em relação aos demais testes, significando uma menor turbulência ao redor da válvula longa estendida, o que proporciona uma proteção adequada do banho pelo pó de cobertura; além de contribuir para a redução de formação de inclusões nas primeiras placas.

3 CONCLUSÃO

O método experimental de medição de oxigênio total foi capaz de distinguir variações de teores de oxigênio de cada condição de adição de pó de cobertura no distribuidor ao longo do veio da máquina de lingotamento contínuo. A inspeção final em produto contribuiu para verificação de eventos de qualidade entre as práticas efetuadas. Todos os testes, excetuando-se o Teste 3, apresentaram potencial formação de alumina. O Teste 1, além da reoxidação, é também vulnerável à incorporação do pó de cobertura no aço líquido. A utilização da válvula longa estendida contribui para a redução de formação de inclusões nas primeiras placas, pois seu prolongamento garante uma adição de pó de cobertura antecipada no distribuidor quando este apresenta estabilidade na turbulência de aço líquido presente, diminuindo a risco de incorporação de pó no banho. A adição antecipada do pó de cobertura no distribuidor, aliada à estabilidade do banho de aço líquido presente nele, contribui para a melhoria da qualidade nos produtos finais.

Agradecimentos

Os autores agradecem:

- Ao programa de Mestrado Profissional da CPGEM – UFMG;
- À USIMINAS;
- Alberto Cesar Soares Rodrigues pela gestão dos experimentos;
- Everton Paço Cunha e Cáiser Antônio Cunha dos Reis pelo apoio da área de operação;
- Omar de Siqueira Júnior pelos ensaios do Laboratório Químico;
- À VESUVIUS na pessoa do Engenheiro de Produto Moisés Miranda;
- Gerência Técnica de Aciaria e Gerência Técnica de Laminação a Frio pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- 1 Mendonça AFG. Avaliação do Efeito da Injeção de Gás sobre a Flotação de Inclusões em um Distribuidor de Lingotamento Contínuo. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2016. 188p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).
- 2 Zhang L, Thomas BG. State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness. ISIJ International, 2003, v. 43, n.3, p. 271-291.
- 3 Nakashima J, Toh T. Improvement of Continuously Cast Slabs by Decreasing. Nonmetallic Inclusions, Nippon Steel Technical Report, ago. 2013 n.104, p.42-47.
- 4 Dekkers R. Non-metallic inclusions in steel. Tese de Doutorado, Katholieke Universiteit Leuven, Chapter 1, Introduction, pp. 1-6, 2002, 158p.
- 5 Oliveira LJS. Análise de Defeito Classificado como Gota Fria em Material Laminado a Frio. 2018. (Relatório interno de P&D – número RAMZ014313). Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas.
- 6 Sasai K, Mizukami Y. – Reoxidation Behavior of Molten Steel in Tundish - ISIJ Int. 2000. Vol. 40, nº 1, p. 40-47.
- 7 Badr K, Tomas M, Kirschen M, Mcilveney G. Refractory Solutions to Improve Steel Cleanliness. 2011. RHI Bulletin, n.1, p. 43-50.
- 8 Story SR, Stanich D, Camillo J. Effect of Initial Tundish Flux Addition Timing on Steel Cleanliness. In: AISTECH CONFERENCE PROCEEDINGS 2009, St. Louis, Missouri: Association for Iron and Steel Technology, 2009. p. 1201-1208
- 9 Miranda M. Projeto Tubo Longo Estendido. Usiminas Ipatinga – Tundish – MLC 1&2 2017 (Relatório interno de P&D). Vesuvius Modeling Group, VESUVIUS.
- 10 Lascosqui PSB. Avaliação da Limpeza do Aço Líquido Através da Modelagem Matemática do Desgaseificador – RH da Companhia Siderúrgica de Tubarão - CST. Ouro Preto: Escola de Minas UFOP, 2006. 99p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).
- 11 Rizzo EMS. Introdução aos processos de lingotamento dos aços. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006. 158 p
- 12 ASTM International, ASTM E1806 Standard Practice for Sampling Steel and Iron for Determination of Chemical, West Conshohocken, PA, 2018, 23 p.
- 13 ASTM International, ASTM E1019 Standard Test Methods for Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen, and Oxygen in Steel, Iron, Nickel, and Cobalt Alloys by Various Combustion and Inert Gas Fusion Techniques, West Conshohocken, PA, 2018, 22 p
- 14 Argon Sampling Systems For AOD, Ladle Stations, Degasser and Tundish. Heraeus Electro-Nite International, 2006 [acesso em 27 abr. 2019]. Disponível em: <http://www.kataloge.xyz/heraeus/en/argon-sampling/argon-sampling.pdf>
- 15 Jacobi H, Wunnenberg K. Methods for determination of oxide cleanliness in steel, IISI Study on Clean Steel, International Iron and Steel Institute, Belgium, 2004, pp. 307-309.