

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 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.

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.

¹ Engenheiro Metalurgista, Pós-Graduação em Engenharia da Qualidade, Engenheiro de Produção Pleno, Gerência Técnica de Laminação a Frio, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, CQE/ASQ, Engenheiro de Produção Sênior, Gerência Técnica de Aciaria, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

³ Engenheiro Mecânico, Pós-Graduação em Metalurgia, Engenheiro de Produção Pleno, Gerência Técnica de Aciaria, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

⁴ Engenheiro Metalurgista, Mestre em Metalurgia Extrativa, Gerente de Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Siderúrgicos, Gerência de Pesquisa e Desenvolvimento de Processos, Usiminas, Membro da ABM, Ipatinga, MG, Brasil.

⁵ Account Manager USIMINAS, Gerente de Contas setor Norte, Vesuvius, Brasil

⁶ Engenheiro Metalurgista, PhD, Professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG, Membro da ABM, Belo Horizonte, Minas Gerais, 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 laminado 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).

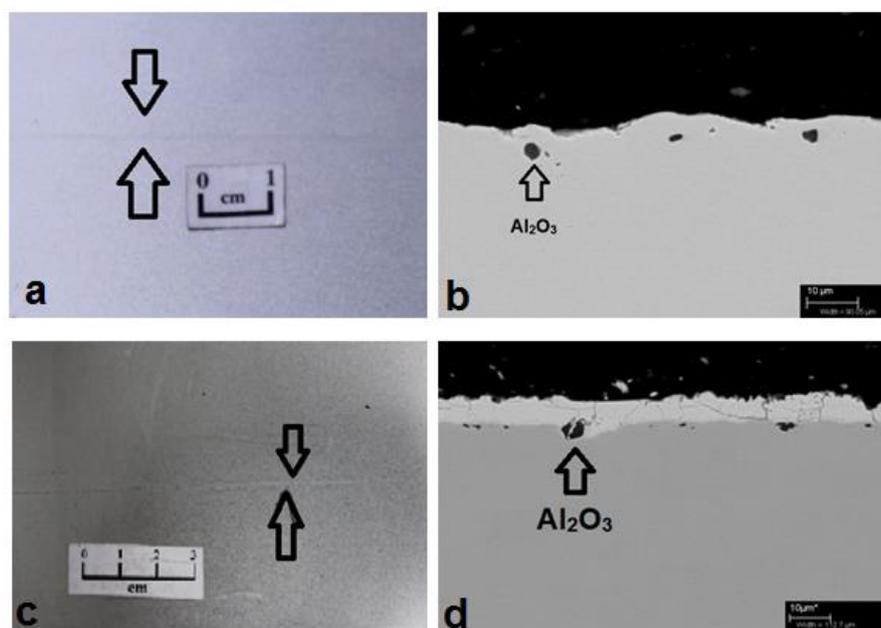


Figura 1. Defeitos superficiais em material: (a) laminado a frio; (b) presença de inclusão de alumina; (c) laminado a frio revestido; (d) presença de inclusão de alumina [5].

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].

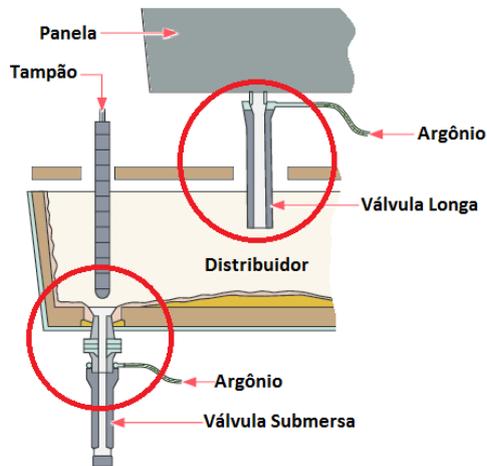


Figura 2. Pontos de conexões existentes no processo de lingotamento contínuo com uso da válvula longa e válvula submersa [7].

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], a adição deve ser realizada no momento adequado, 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 a reoxidação. Isso contribui com o acréscimo do número de inclusões de alumina (Al_2O_3) no banho e, conseqüentemente, nas placas. Logo, quaisquer esforços para proteger o aço da atmosfera produzirá aço mais limpo. A formação da alumina é demonstrada conforme equação 1 [8].



As inclusões de alumina (Al_2O_3) em placas podem dar origem a produtos laminados com defeitos, conhecidos como esfoliamento. 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.

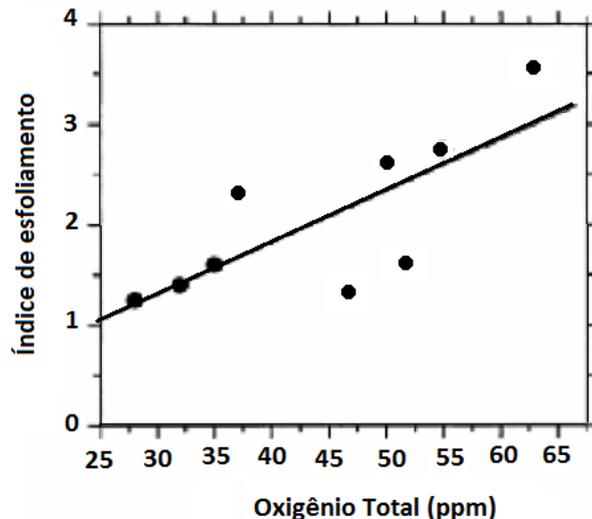


Figura 3. Relação entre o Oxigênio total no aço e o índice de esfoliamento no produto [2].

Assim, com foco no que foi discutido, os objetivos do estudo foram comparar e identificar qual a melhor prática e instantes de adição de pó de cobertura, qual a influência disto no processo de formação de inclusões, por meio da medição de oxigênio. Além disso, verificar se existe ganho de qualidade no produto final. Para isso, avaliaram-se as inclusões formadas durante o início do processo de lingotamento contínuo para aços ultra baixo carbono (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 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. 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. Na Figura 4 é mostrado esquematicamente o peso de aço líquido visado no distribuidor em cada Teste.

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

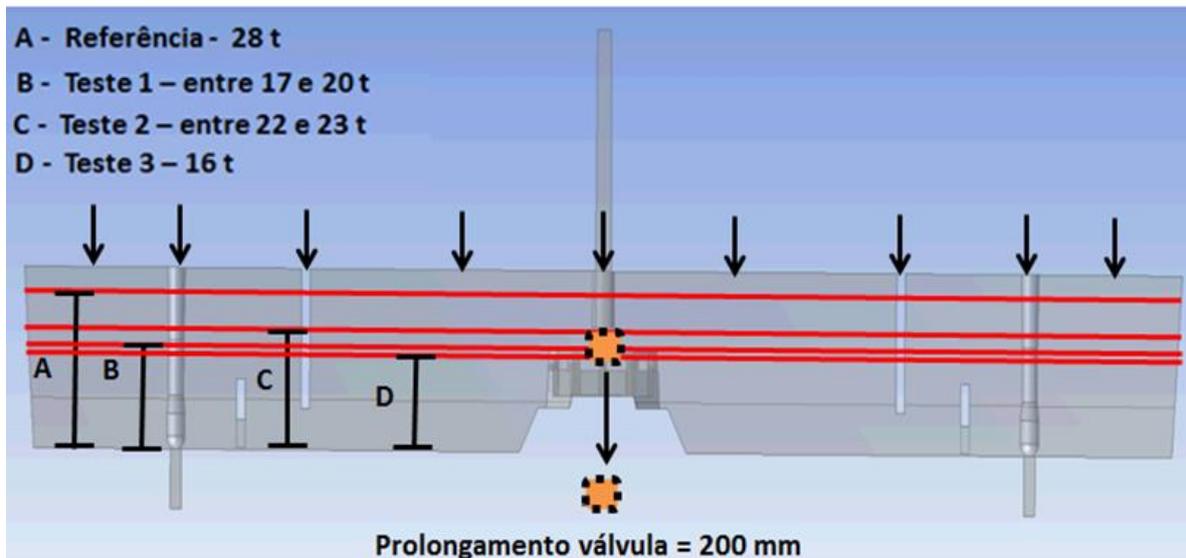


Figura 4. Peso de aço líquido visado no distribuidor no momento da adição de pó de cobertura para cada um dos testes.

Na Figura 5 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.

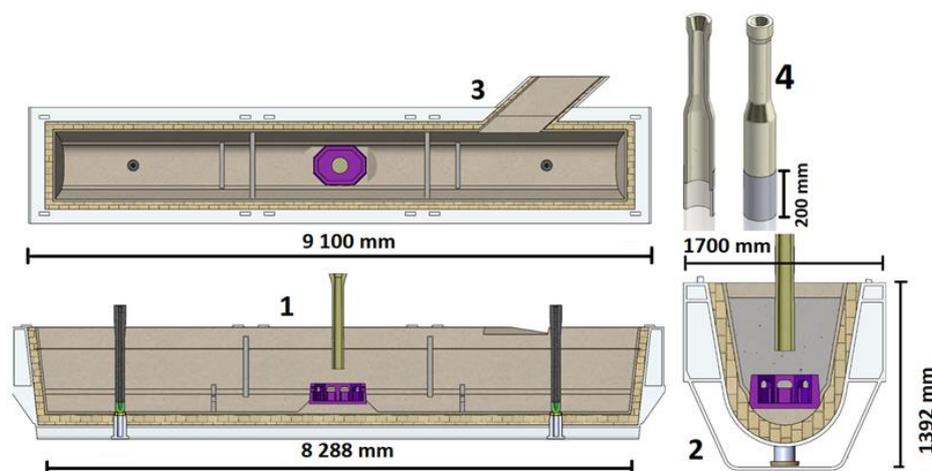


Figura 5. Especificações dimensionais e técnicas do distribuidor: 1- corte frontal; 2- corte lateral; 3- corte superior e 4- válvula estendida utilizada no teste 3. [9].

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

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 3ª 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 6 [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. A análise dos teores de oxigênio foi realizada no equipamento denominado Leco TC 600 (Precisão: 0,025 ppm), conforme norma ASTM E1019 [13].

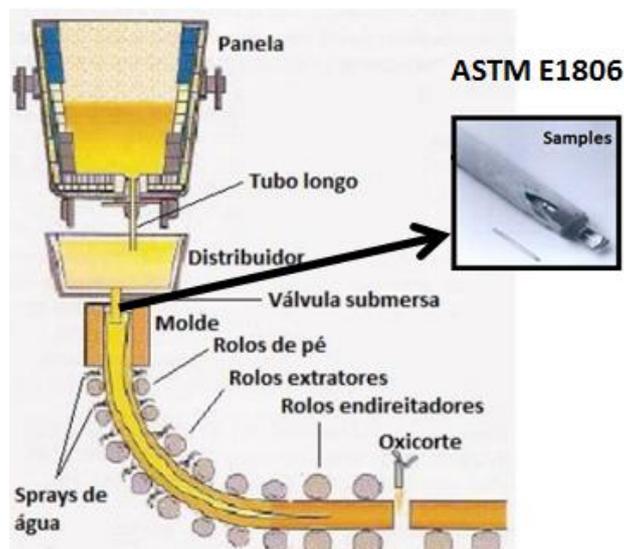


Figura 6. Esquema da retirada de amostras no molde da máquina de lingotamento contínuo [14].

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. 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 e analisadas ao MEV via EDS, a fim de identificar as inclusões presentes no aço. A fim de se obter um resultado apurado em relação à qualidade das condições testadas, foi observado o período de 24 meses, divididos entre os Testes 1, 2 e 3 e Referência, considerando 6 meses para cada um. Sendo avaliado o resultado de qualidade para a 3ª placa inicial do distribuidor. O levantamento leva em consideração o número de placas recusadas para processo de retrabalho por determinados defeitos, em relação ao número de placas inspecionadas. Os defeitos considerados no levantamento são os defeitos superficiais com origem no lingotamento contínuo relacionados à reoxidação do 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 28 t.

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 7 e 8 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: 1 m/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.

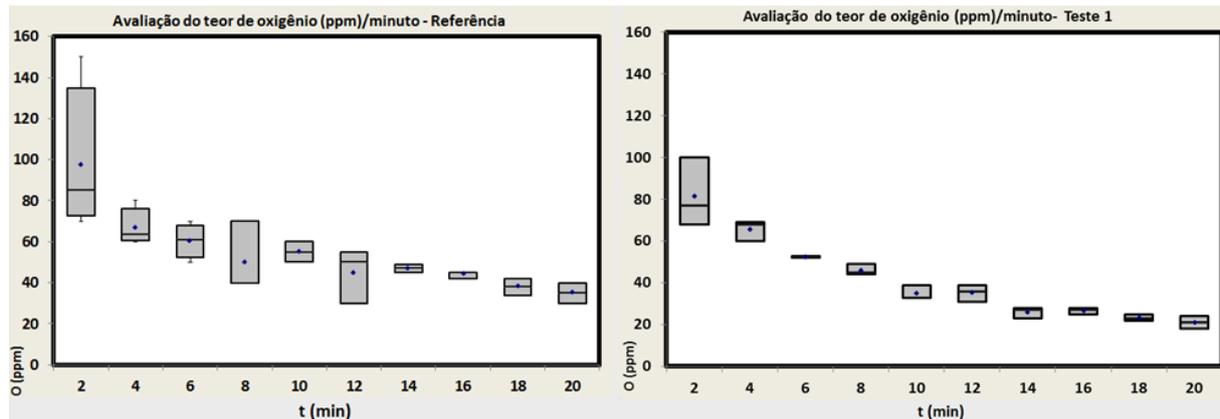


Figura 7. Resultado da avaliação do teor de oxigênio: Referência e Teste 1.

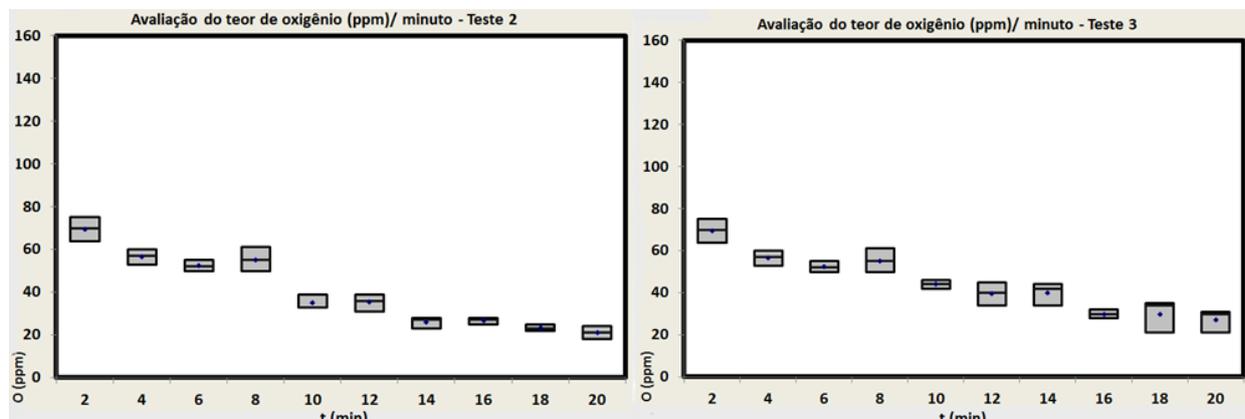


Figura 8. Resultado da avaliação do teor de oxigênio: Teste 2 e Teste 3.

Na Figura 9 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 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 2. A diferença entre os dois testes é que no Teste 3 foi utilizada a válvula longa estendida.

Avaliação do teor de oxigênio total / minuto

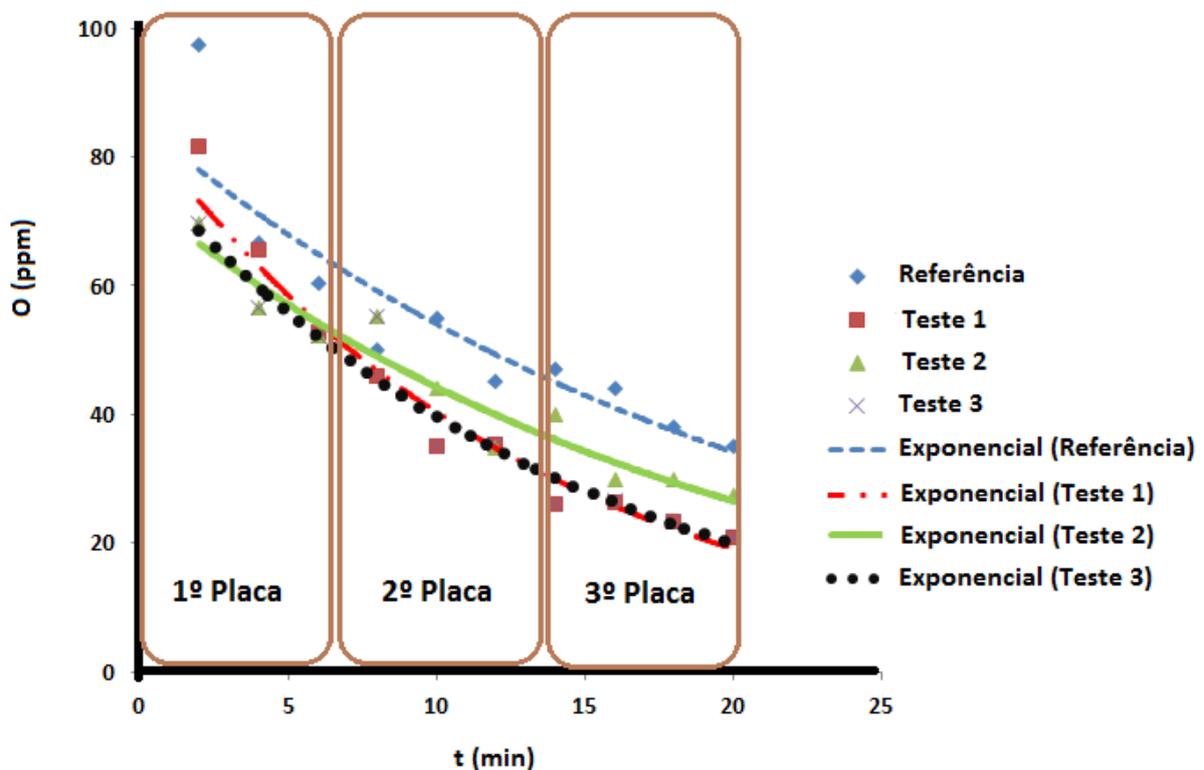


Figura 9. Avaliação do teor de Oxigênio do aço UBC nos testes.

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 10 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.

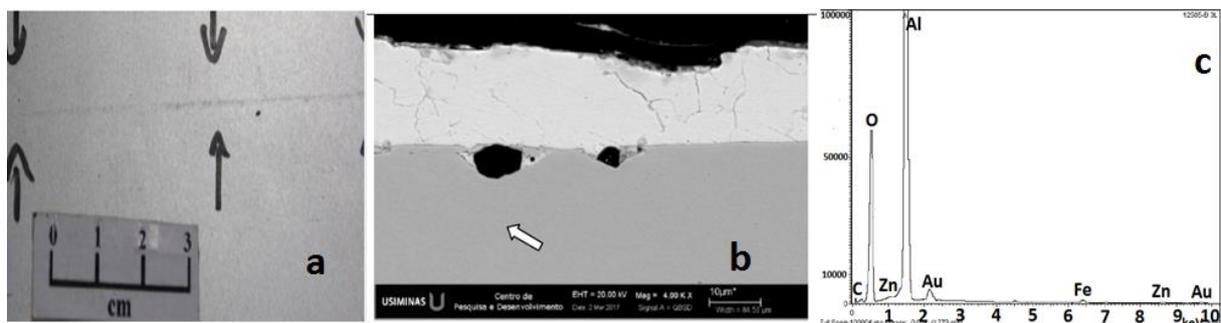


Figura 10. Análise e caracterização de inclusão da Referência.

Na Figura 11 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.

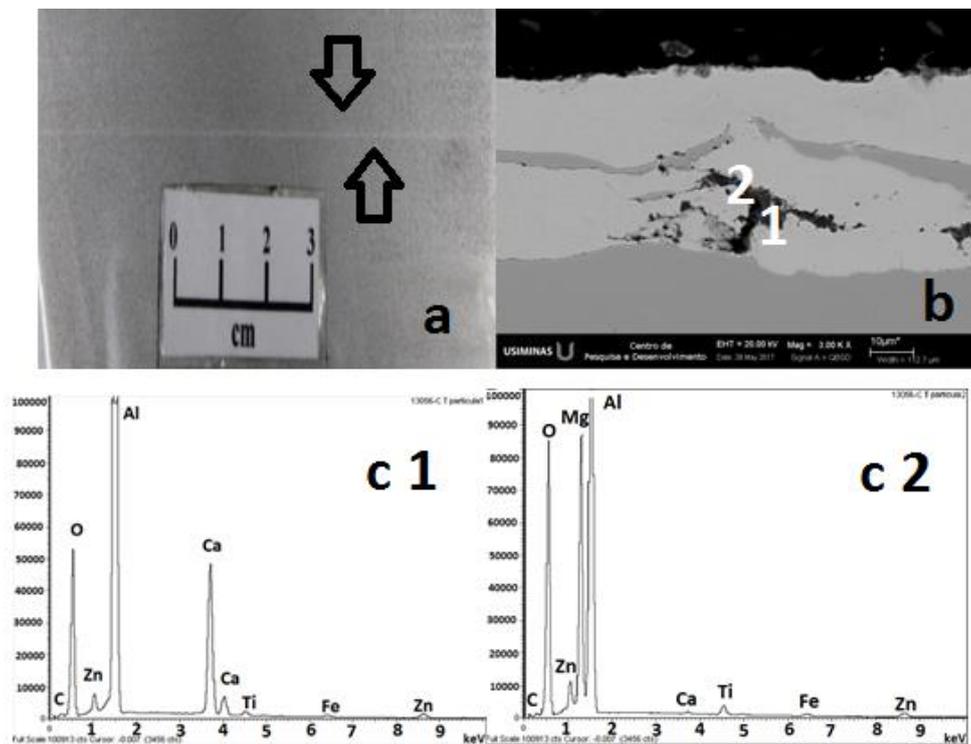


Figura 11. Análise e caracterização de inclusão do Teste 1.

Na Figura 12 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.

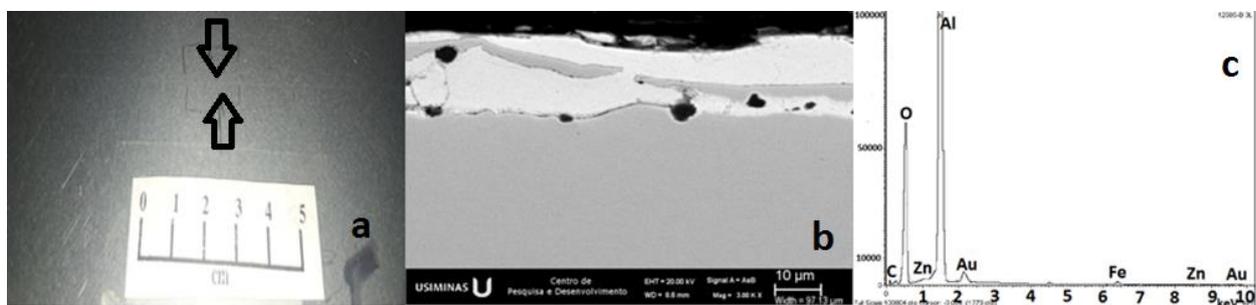


Figura 12. Análise e caracterização de inclusão do Teste 2.

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.

2.2.4 Resultados de qualidade

O gráfico da Figura 13 mostra o resultado de inspeção para avaliação de superfície de placas provenientes de corridas lingotadas com as condições de Teste deste trabalho, conforme quesitos observados no item 2.1.2:

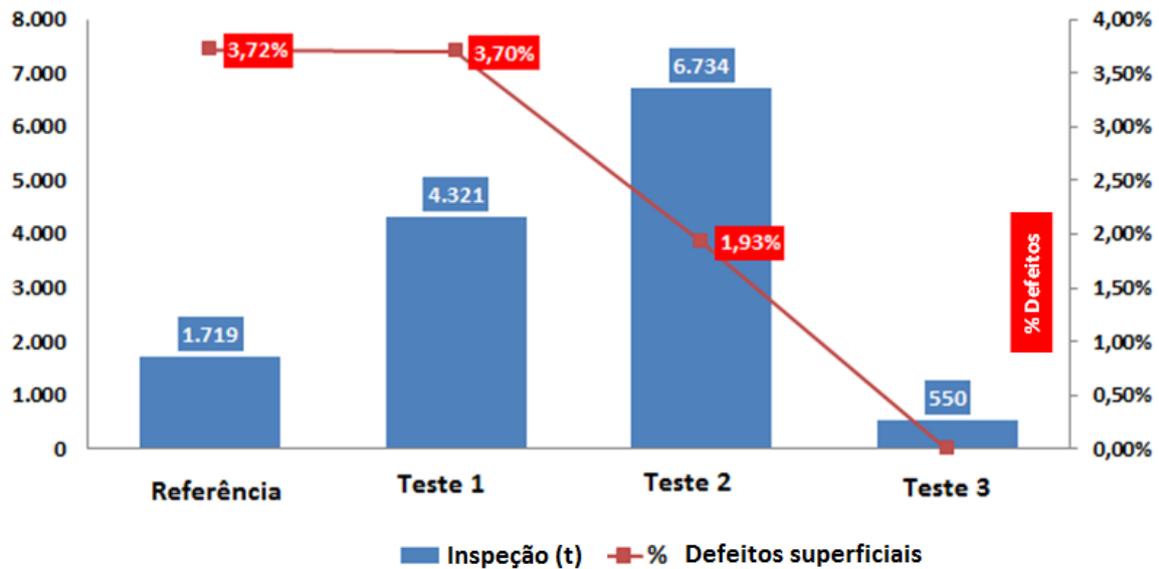


Figura 13. Resultados de qualidade da 3ª placa de distribuidor de material UBC para as três condições de teste, considerando material laminado a frio inspecionado em tonelada.

Pelo gráfico é possível notar que a Referência apresentou maior percentual de tonelagem recusada quando comparado aos demais. O Teste 1 apresentou um percentual semelhante à Referência, embora tenha tido uma maior quantidade de material inspecionado. O Teste 2 apresentou uma redução no percentual de recusa em mais de 50% quando comparado à Referência e ao Teste 1. O Teste 3 não apresentou nenhum percentual recusado, sendo já inspecionadas com essa condição, 550 t de material.

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, exceto 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.

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 Limpidez 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 cleanness in steel, IISI Study on Clean Steel, International Iron and Steel Institute, Belgium, 2004, pp. 307-309.