

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE FLUXANTES APLICADOS NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO DO AÇO SAE 1046 MOD*

Vinícius Cardoso da Rocha¹

Wagner Viana Bielefeldt²

Antônio Cezar Faria Vilela³

Marino Moscardini dos Passos Junior⁴

Resumo

Frente ao cenário industrial competitivo, o emprego de fluxantes em lingotamento contínuo de aços permitiu o aumento da produtividade e a redução das perdas metálicas por defeitos superficiais. Neste estudo, avaliou-se a aplicabilidade de dois tipos de fluxantes para produção do aço SAE 1046 Mod. Os fluxantes foram testados quanto ao desgaste da válvula submersa, frenagem (atrito) na interface metal/molde e rejeição dos produtos de lingotamento devido à presença de defeitos superficiais. O fluxante teste apresentou taxa de desgaste de válvula submersa de 2,2 mm/corrida, frente ao fluxante padrão com 0,8 mm/corrida. Entretanto, o fluxante teste demonstrou bons resultados quanto à lubrificação do molde, reduzindo a frenagem (atrito) entre o metal e molde e, conseqüentemente, melhorando a qualidade superficial do produto de lingotamento. A rejeição dos produtos por defeitos superficiais reduziu 47% com o fluxante teste.

Palavras-chave: Fluxantes; Lingotamento contínuo; Desgaste de válvula submersa; Lubrificação do molde.

COMPARATIVE STUDY BETWEEN MOULD FLUXES APPLIED IN STEEL CONTINUOUS CASTING SAE 1046 MOD

Abstract

Facing the competitive industrial scenario, the use of mould powders in continuous casting of steels allowed the increase in productivity and reduction in metal losses by surface defects. In this study, the applicability of two types of mould powder for the production of steel SAE 1046 Mod was evaluated. The powders were tested for submerged entry nozzle (SEN) wear, friction on the interface metal/mould and casting rejection of products due to the presence of surface defects. The test powder presented SEN wear of 2.2 mm/heat, against 0.8 mm/heat from standard powder. However, test powder has demonstrated good results related to the mould lubrication, reducing friction between metal and mould and, consequently, improving product superficial quality. The rejection of the product due to the superficial defects reduced 47% applying the test powder.

Keywords: Mould powders; Continuous casting; Submerged entry nozzle; Mould lubrication.

¹ Eng. Metalúrgico, mestrando, Laboratório de Siderurgia (LaSid), Depto. de Metalurgia, PPGE3M, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

² Professor, Dr., LaSid, Depto. de Metalurgia, PPGE3M, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

³ Professor, Dr.-Ing., LaSid, Depto. de Metalurgia, PPGE3M, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

⁴ Eng. Metalúrgico, Msc., Gerdau Aços Especiais Brasil, Charqueadas, RS, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Na aciaria, a solidificação do aço é estabelecida na última etapa do processo, no lingotamento contínuo. O processo de solidificação dos aços é complexo e exige o controle adequado de cada parâmetro associado à máquina de lingotamento. O fluxante empregado no molde assume funções essenciais no que se refere à sanidade do produto siderúrgico, tendo em vista que grande parte dos defeitos possa ser originada no molde.

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a aplicabilidade de fluxantes no processo de lingotamento contínuo do aço SAE 1046 Mod, por meio de um estudo comparativo entre dois diferentes fluxantes empregados em aços médio carbono, visando um aumento na operação de sequenciamento. Para tal, foram analisados 3 (três) parâmetros durante o processo de lingotamento contínuo, a saber, (1) desgaste de válvula submersa, (2) frenagem entre metal e molde e (3) grau de rejeição do produto de lingotamento, devido à presença de defeitos superficiais.

1.1 Fluxantes de Lingotamento Contínuo

Os fluxantes, também chamados de pó de molde, são escórias sintéticas utilizadas em moldes no processo de lingotamento contínuo, que devem ser aplicados quando o vazamento do metal líquido do distribuidor para o molde ocorre através da válvula submersa, isto é, com jato protegido [1]. Os fluxantes são fundamentais no processo de lingotamento contínuo na produção de aços especiais.

1.1.1 Funções principais e a ação lubrificante

O fluxante e o aço apresentam imiscibilidade e densidade diferentes. No molde, o fluxante fica sobre o aço líquido, justamente devido a sua menor densidade. Durante o processo de lingotamento contínuo, são atribuídas 5 (cinco) funções principais dos fluxantes [2]:

- Promover uma transferência de calor uniforme entre o aço e o molde.
- Promover a lubrificação entre a casca solidificada e o molde.
- Absorver inclusões (por exemplo, Al_2O_3 e TiO_2).
- Proteger a superfície do aço contra a reoxidação.
- Promover o isolamento térmico do aço, evitando sua solidificação precipitada na superfície do molde.

Para fins deste estudo, a função do fluxante em lubrificar a interface metal/molde será destacada.

Durante o processo de solidificação, dentro do molde, ocorre o fenômeno de contração do aço. Essa contração é responsável pelo afastamento (*gap*) entre a casca solidificada de aço e a superfície do molde de cobre, gerando uma resistência na transferência de calor. Em contrapartida, com o mecanismo de oscilação do molde, o fluxante assume funções junto ao processo, de forma a preencher este vazio formado durante a contração do aço [3].

Ao penetrar na região do *gap*, o fluxante fundido tende a formar uma camada de filme vítreo, cristalino e líquido. Segundo Oliveira [3], isto ocorre porque na interface metal/molde o fluxante estará submetido às baixas temperaturas (180 a 208°C) do molde de cobre e às altas temperaturas (da ordem de 1350°C) da casca solidificada. A Figura 1 ilustra a estratificação do fluxante.

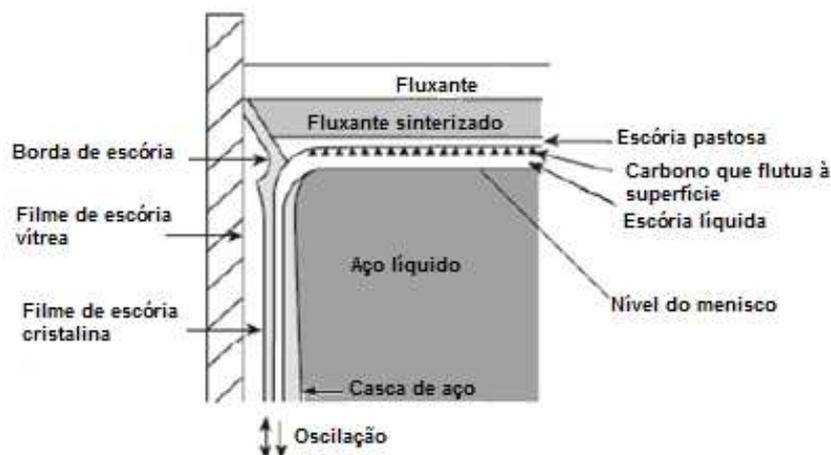


Figura 1. Camadas de fluxante durante seu processo de aplicação e funcionamento. Adaptado de Silva [10].

Como citado anteriormente, uma das atribuições do fluxante, no processo de lingotamento contínuo, é promover a lubrificação entre a casca solidificada de aço e o molde. A adequada lubrificação garante reduzidas forças de atrito e, conseqüentemente, melhor qualidade superficial do produto. Ma *et al.* [4] afirmam que a força de atrito também pode afetar a produtividade de lingotamento.

1.1.2 Composição química e viscosidade

Essencialmente, os fluxantes utilizados em lingotamento contínuo constituem em uma mistura de CaO , SiO_2 , CaF_2 , Al_2O_3 e Na_2O , com adições menores de MgO , FeO e MnO . A especificação da composição química do fluxante é função do tipo de aço, condições de contorno do lingotamento contínuo e, também, do fornecedor. Portanto, os fluxantes são desenvolvidos para atender a cada condição de lingotamento e tipo específico de aço. Segundo Barral [5], a composição química afeta uma série de fatores, a saber, viscosidade, taxa de fusão, temperatura de cristalização e solidificação e taxa de absorção de alumina.

A viscosidade é uma importante característica associada à fluxantes. Para uma breve definição, a viscosidade caracteriza a resistência encontrada por um fluido em escoamento, quando este é submetido a uma força de origem externa. A viscosidade é determinada pela composição química e temperatura. Soares [6] afirma que a viscosidade dos fluxantes é uma das propriedades determinantes na boa operação e qualidade de um lingotamento contínuo.

Estudos realizados por Ogibayashi *et al.* [7] buscaram correlacionar a viscosidade com a velocidade de lingotamento. A partir daí, foi desenvolvida a seguinte relação (Equação 1):

$$\eta \cdot V = C \quad (1)$$

Onde η é a viscosidade, V a velocidade de lingotamento e C uma constante qualquer, que deve variar de 1 a 3,5 P·m/min, a fim de garantir as mínimas forças de fricção e variações de temperatura. Para elevadas velocidades de lingotamento, deve-se objetivar a aplicação de fluxantes com baixa viscosidade e, vice-versa, obtendo-se a faixa ideal estabelecida pelo produto da Equação 1.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizadas 22 (vinte e duas) corridas, igualmente divididas para 2 (dois) fluxantes, ou seja, foram testadas 11 (onze) corridas para cada fluxante. Estas 11 (onze) corridas foram devidamente divididas em 2 (dois) sequenciais, sendo o primeiro sequencial com 6 (seis) corridas e o segundo com 5 (cinco) corridas. Os tarugos produzidos durante o lingotamento destes sequenciais foram laminados e, posteriormente, inspecionados via técnica de partículas magnéticas.

2.1 Matérias-Primas

O aço empregado para o desenvolvimento deste trabalho possui composição química nominal descrita segundo norma SAE 1046 Mod. Com respeito aos fluxantes, foram testados 2 (duas) espécies (Fluxantes A e B), sob as mesmas condições de operação, isto é, qualidade de aço e parâmetros de lingotamento mantidos constantes. O Fluxante A é referenciado como padrão, sendo o Fluxante B denominado como fluxante teste.

Em função do teor de CaO e SiO₂, tem-se um fluxante de característica cristalina (Fluxante A) e outro amorfa (Fluxante B), impactando no processo de transferência de calor dentro do molde. Fluxantes que resultam na formação de camada cristalina maior no molde afetam de forma negativa a troca de calor entre metal e molde. Por outro lado, com uma camada vítrea maior, tem-se o favorecimento da extração de calor. Segundo Nakada *et al.* [8], a cristalização da escória aumenta o poder de reflexão do filme cristalino formado, fazendo com que a energia de radiação retorne para o aço, reduzindo, portanto, o fluxo de calor através do filme.

Além da perceptível diferença entre o teor de CaO entre os fluxantes, o Fluxante B é mais rico em constituintes fluidizantes, como Na₂O, K₂O e F. Estes, quando somados, representam cerca de 46% a mais, em relação ao Fluxante A.

2.2 Equipamentos

2.2.1 Máquina de lingotamento contínuo

A seguir apresenta-se a composição da máquina de lingotamento contínuo, a partir de uma breve descrição do distribuidor, da válvula submersa e do molde. A Tabela 1 mostra as características gerais do equipamento onde foram realizados os testes.

Tabela 1. Informações gerais da máquina de lingotamento contínuo onde foram realizados os testes.

Características da máquina	
Capacidade de distribuidor [t]	15
Número de veios	3
Seção [mm]	240 x 240
Fluxo de aço (panela/distribuidor)	Tubo longo
Fluxo de aço (distribuidor/molde)	Válvula submersa (SEN)
Velocidade de lingotamento [m/min]	0,85
Frequência de oscilação [cpm]	160
Sistema de corte	Oxicorte
Alimentação de pó fluxante	Semiautomático pneumático

Em todos os testes utilizaram-se válvulas submersas (SEN), em cada um dos 3 (três) veios do distribuidor. As válvulas submersas utilizadas apresentavam um revestimento de zircônia na linha de escória e com saída única pelo fundo.

Os moldes empregados apresentam seção quadrada com 240 x 240 mm. Possuem um revestimento interno de cromo. Externamente, o material utilizado na confecção do molde é cobre puro.

2.2.2 Instrumentação para medição de frenagem (atrito) metal/molde

Para avaliar os efeitos indiretos de lubrificação de cada fluxante no interior do molde, utilizou-se um sistema baseado em sensores acelerômetros tri-axiais, fixados na própria mesa de oscilação, conforme Figura 2. Cada veio possui 4 (quatro) sensores acoplados (S1, S2, S3 e S4), de forma idêntica. A partir desses sensores, a aquisição de dados é realizada e processada em um microcomputador, através de um software. Este software apresenta os resultados de frenagem em função de cada sensor, em cada veio da máquina de lingotamento. Os sensores são bastante sensíveis ao movimento, tanto lateral como vertical. Os procedimentos de calibração são indispensáveis para eliminação de qualquer fonte de erro durante a aquisição dos dados. Este sistema, denominado TE-SiMOM Online, é capaz de monitorar a oscilação do molde no decorrer de todo processo de lingotamento contínuo, em tempo real.

Wang *et al.* [9], realizaram medidas em tempo real da oscilação do molde, para o lingotamento contínuo de placas, visando otimização de lubrificação do molde. Porém, sem avaliar a influência do tipo de fluxante empregado. O experimento desenvolvido em planta industrial avaliava a influência da oscilação (senoidal e não-senoidal) no atrito entre o metal e molde.

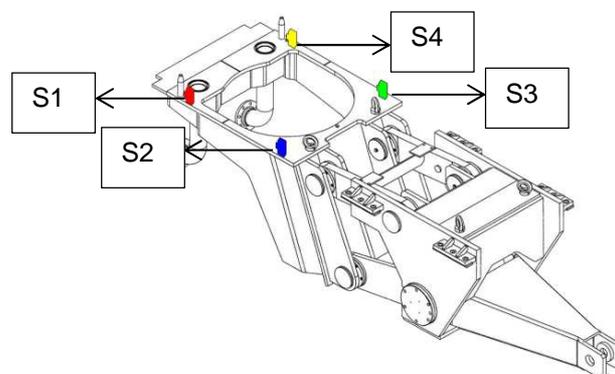


Figura 2. Representação da posição dos sensores S1 a S4 (em cores) na mesa de oscilação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Desgaste de Válvula Submersa

A seguir são mostrados os resultados obtidos para cada fluxante quanto ao desgaste de válvula observado. A Tabela 2 ilustra a taxa de desgaste ocorrida em cada válvula submersa.

Tabela 2. Relação de fluxante com a taxa de desgaste da válvula submersa

Fluxante	Sequencial	Taxa de desgaste [mm/corrida]		
		Veio 1	Veio 2	Veio 3
A	1º sequencial: 6 corridas	0,5	0,8	1,2
	2º sequencial: 5 corridas	1,0	1,0	1,0
B	1º sequencial: 6 corridas	2,7	1,8	2,2
	2º sequencial: 5 corridas	0,6	1,0	1,0

A partir da Tabela 2, verifica-se que há uma elevada taxa de desgaste para o Fluxante B, quando aplicado no sequencial maior, de 6 (seis) corridas. Segundo Silva [10], a taxa de desgaste da válvula submersa está diretamente relacionada à fluidez da escória formada a partir do fluxante. Porém, tanto o Fluxante A como o B apresentou, conforme especificação, a mesma viscosidade calculada, de 0,24 Poise na temperatura de 1300°C. É utilizada esta temperatura para determinar a viscosidade, pois representa a temperatura média na camada de escória líquida [10]. Embora possuam a mesma viscosidade, o Fluxante B indicou maior índice de erosão à válvula. A Tabela 2 mostra que o Fluxante B apresenta 1,3% em massa de flúor a mais do que no Fluxante A, além de 3,2% (em massa) a mais de outros fluidizantes, como $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$. Isso pode sustentar uma das possíveis explicações para o resultado danoso causado pelo Fluxante B. Silva [10] lista as principais funções desempenhadas pela presença de fluidizantes como o flúor na composição do fluxante, porém destaca o problema relacionado com a erosão da válvula submersa.

A operação de medição do diâmetro final das válvulas é realizada sempre no final de cada sequencial, sendo ainda uma atividade totalmente manual, o que pode caracterizar uma fonte de erro. Portanto, os dados da Tabela 2 podem conter equívocos, já que não retrata de forma ideal o desgaste exato ocorrido em cada corrida. Outrossim, a taxa de alimentação nos 3 (três) veios foi considerada constante e iguais. Desconsiderando a possibilidade da adição de fluxante de modo manual, conforme necessidade.

As válvulas submersas utilizadas durante os testes com o Fluxante B podem ser visualizadas nas Figuras 3a e 3b. Em vermelho, evidencia-se a região de contato direto do fluxante (escória) com a superfície da válvula, para o primeiro sequencial (6 corridas) e para o segundo (5 corridas), respectivamente.

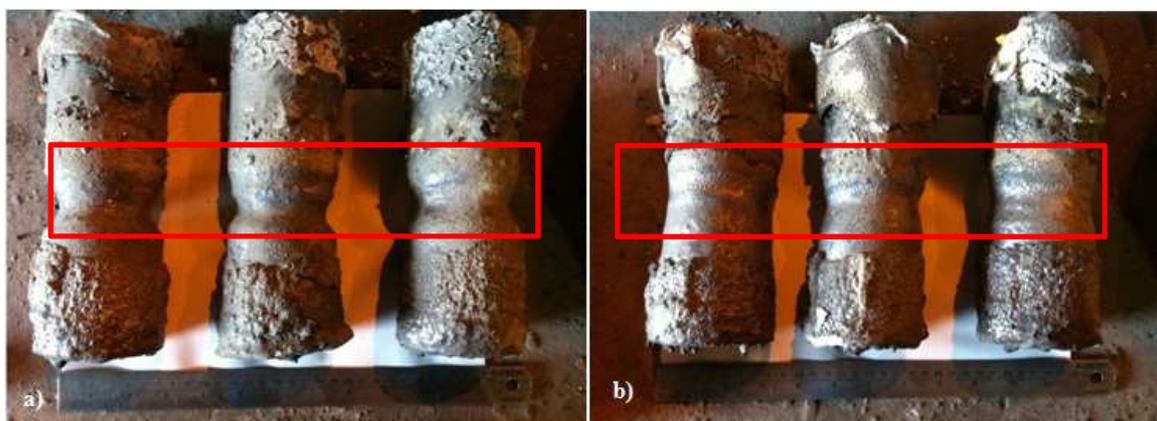


Figura 3. Destaque da região de contato direto do Fluxante B com a válvula submersa, na condição a) para 6 corridas e b) para 5 corridas.

Não foi realizada análise em difração de raios-X nos fluxantes utilizados no estudo. O que dificulta, talvez, a melhor caracterização da erosão da válvula submersa. Em testes realizados por Devic [11], notou-se que a presença de wollastonita no fluxante pode acentuar a erosão da válvula apreciavelmente.

Em relação ao Fluxante A, o Fluxante B apresenta menor teor de CaO e, praticamente, mesmo teor de SiO₂. Para Cirilli *et al.* [12], este fato estaria de acordo com os resultados observados. Segundo eles, a baixa atividade de CaO implica no aumento da capacidade da escória em dissolver CaO, causando redução da vida útil do refratário da válvula submersa, devido principalmente à degradação dos grãos de zircônia.

4.1 Frenagem (Atrito) Metal/Molde

Conforme ilustrado anteriormente, os sensores acelerômetros foram dispostos identicamente nos 3 (três) veios. Em cada veio foi acoplado 4 (quatro) sensores, denominados S1, S2, S3 e S4. As Figuras 4, 5 e 6 mostram os resultados dos módulos de frenagem obtidos para os Fluxantes A e B, em cada veio do distribuidor. Cada um dos gráficos a seguir foi elaborado a partir de uma média dos módulos de frenagem, correspondentes a cada uma das 11 (onze) corridas para cada fluxante.

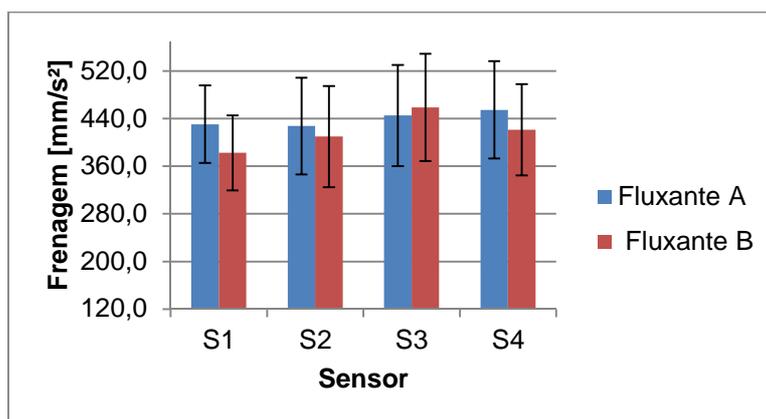


Figura 4. Frenagem (atrito) em função dos sensores aplicados no veio 1 para os Fluxantes A e B.

A Figura 4, que representa o veio 1, apresentou o Fluxante B como melhor lubrificante, tendo em vista os menores módulos de frenagem, com exceção ao sensor 3 (S3).

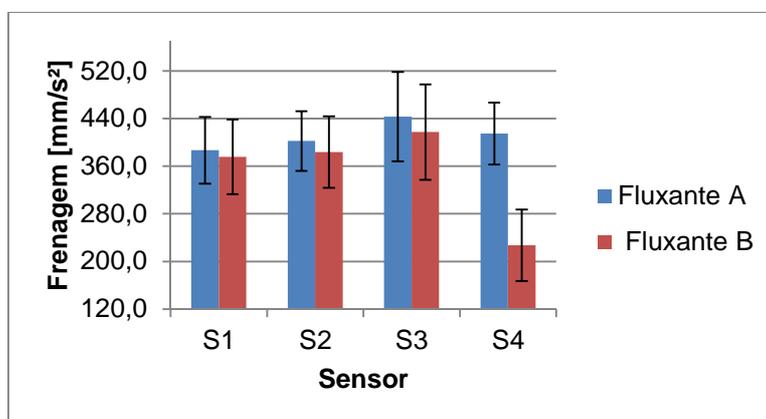


Figura 5. Frenagem (atrito) em função dos sensores aplicados no veio 2 para os Fluxantes A e B.

No veio 2 (apresentado na Figura 5), o Fluxante B, novamente, manteve os menores índices de frenagem, comparado ao Fluxante A. Porém, existe uma diferença no sensor 4 (S4) em relação aos demais. Neste caso, é possível que a calibração do S4 não tenha sido efetuada de modo correto ou, ainda, existam outras causas especiais, como a falta de limpeza adequada no momento de manutenção.

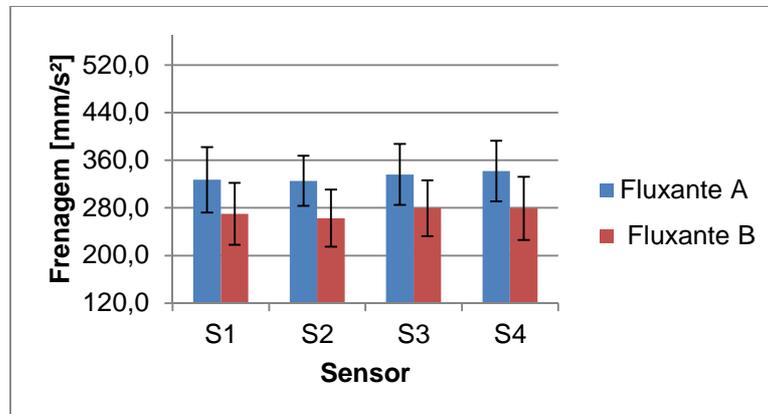


Figura 6. Frenagem (atrito) em função dos sensores aplicados no veio 3 para os Fluxantes A e B.

Para o veio 3, a configuração de frenagem caracteriza, indiretamente, o Fluxante B como melhor lubrificante, sendo o Fluxante A com os mais elevados módulos de frenagem. É possível perceber, ainda, que a média do módulo de frenagem para o veio 3 difere dos demais veios. Pode-se dizer que a taxa de alimentação de fluxante foi desigual. O veio 3, por apresentar menores módulos de frenagem, possivelmente apresentou maior camada de filme fluxante, favorecendo a lubrificação.

Fator que pode ter contribuído para a baixa lubrificação do Fluxante A é sua elevada basicidade (>1). Segundo Kromhout [13], a formação de um filme de cristais torna-se maior quando a relação CaO/SiO_2 é elevada, aumentando perceptivelmente o atrito entre a casca solidificada e a parede interna do molde. O baixo teor de CaO no Fluxante B, em relação ao Fluxante A, apresentou significativas diferenças quanto à interação da casca solidificada com o molde.

Embora não tenha sido realizado nenhum experimento para medir a formação das camadas do fluxante durante o processo de lingotamento, Kromhout [13] afirma que o reduzido teor de CaO proporciona a formação de uma camada de filme vítreo maior, próximo à parede do molde, favorecendo as condições de lubrificação, conforme ilustrados anteriormente.

4.2 Rejeição de Produtos por Defeitos Superficiais

A Figura 7 retrata a redução da rejeição por defeitos superficiais percebida no emprego do Fluxante B.

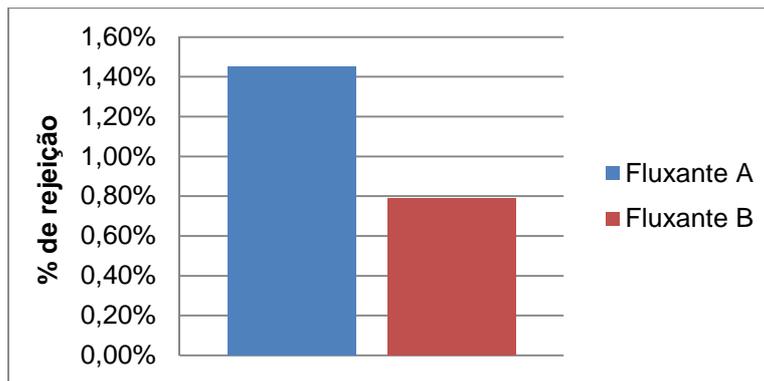


Figura 7. Índice de rejeição por defeitos superficiais dos produtos de lingotamento contínuo, em função do fluxante empregado.

Das 11 (onze) corridas avaliadas para cada fluxante, a aplicação do Fluxante B apresentou o menor índice de rejeição, quando comparado ao Fluxante A. Como observado anteriormente, o Fluxante A apresentou baixas condições de lubrificação no molde. Este fato, por sua vez, reflete diretamente na formação de defeitos superficiais no produto de lingotamento.

A redução do percentual de rejeição está diretamente associada à adequada condição de lubrificação do molde, minimizando o atrito e fricção na interface metal/molde.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados do estudo comparativo, pode-se concluir que:

- O Fluxante B apresentou taxa de desgaste média de 2,2 mm/corrída, para 6 (seis) corridas, frente à taxa média de 0,8 mm/corrída do Fluxante A.
- Para o sequencial menor (5 corridas), a diferença do desgaste pode ser considerada desprezível, já que para ambos fluxantes o desgaste evidenciou-se de forma semelhante.
- Para aumento de sequenciamento, o Fluxante B não deve ser empregado. Os resultados mostraram que o ataque à válvula submersa foi mais intenso com a aplicação do Fluxante B.
- O teor de CaO de 18,5% em massa, do Fluxante B, possivelmente foi determinante para a erosão do revestimento do refratário da válvula submersa, principalmente na linha de escória, causando a degradação do revestimento de zircônia. O teor de 5,5% em massa do flúor do Fluxante B, que representa 1,3% a mais em relação ao Fluxante A, pode ter amplificado o desgaste da válvula submersa durante a tentativa de aumento de sequenciamento, em conjunto com outros constituintes fluidizantes como $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$.
- O Fluxante A apresentou os maiores módulos de frenagem (atrito) metal/molde, ou seja, menores condições de lubrificação, devido sua alta basicidade de 1,1.
- As corridas com aplicação dos Fluxantes A e B representaram índices de rejeição por defeitos superficiais de 1,49% e 0,79%, respectivamente. Representando uma redução de 47%.

Agradecimentos

À orientação e revisão dos professores Dr.-Ing. Antônio C. F. Vilela e Dr. Wagner V. Bielefeldt. Ao Eng. Msc. Marino Moscardini pelo incentivo e apoio. Ao Eng. Sandro Machado pela confiança e oportunidade. A Tozato Measurements pelo suporte e apoio técnico.

REFERÊNCIAS

- 1 Garcia, A *et al.* Lingotamento contínuo de aços. Coleção Metalurgia e Materiais. São Paulo: ABM; 2006.
- 2 Mills, KC. Mold powders for continuous casting. The AISE Steel Foundation. Pittsburgh: 2003.
- 3 Oliveira, LJS. Comportamento dos aços peritéticos durante a solidificação no molde de lingotamento contínuo. Minas Gerais: 2009.
- 4 MA, Y *et al.* Experimental research on effect of control model on lubrication for slab continuous casting mould. *Ironmaking and Steelmaking*. 2008; 164-168.
- 5 Barral, CEP. Efeito de parâmetros geométricos e operacionais sobre o comportamento do fluxante no molde de lingotamento contínuo de placas. Minas Gerais: 2006.
- 6 Soares, RB. Fluxantes para molde em lingotamento contínuo. Porto Alegre: 1998.
- 7 Ogibayashi. S. *et al.* Mold powder technology for continuous casting of low-carbon aluminum killed steels. *Nippon Steel Technical Report*. 1987: 1.
- 8 Nakada, H. *et al.* Mechanism of heat transfer reduction by crystallization of mold flux for continuous casting. *ISIJ International*. 2008; 48(4): 446-453.
- 9 Wang, X *et al.* Optimization of oscillation model for slab continuous casting mould based on mould friction measurements in plant trial. *Journal of Iron and Steel Research*. 2013; 20(1): 13-20.
- 10 Silva, DR. Análise termodinâmica da formação de Al_2O_3 durante o lingotamento contínuo através da interação química entre pós fluxantes sem flúor e uma liga de Fe líquido saturada com alumínio e oxigênio. Porto Alegre: 2010.
- 11 Devic, S. Marceta, L. Erosion of submerged entry nozzles by casting powders. *American Ceramic Society Bulletin*. 2007; 86(6).
- 12 Cirilli, F *et al.* Corrosion mechanisms of zirconia/carbon based refractory materials by slag in presence of steel. *La Metallurgia Italiana*. 2008.
- 13 Kromhout, JA. Mould powders for high speed continuous casting of steel. Delft: 2011.