

AUMENTO DE TRANSFERÊNCIA TÉRMICA NO MOLDE EM AÇOS ULTRA BAIXO CARBONO PELO AJUSTE DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO PÓ FLUXANTE*

Alexandre de Freitas Gomes de Mendonça¹
Rodrigo Seara Martins²
Rodrigo Madrona Dias³
Leonardo José Silva de Oliveira⁴

Resumo

No lingotamento contínuo, o pó fluxante é responsável pela formação de uma escória líquida no molde que formará um filme de escória entre a placa de cobre e a pele solidificada. As principais funções do filme são lubrificar e moderar o fluxo térmico no molde. Em particular, para aços com tendência ao agarramento, objetiva-se uma escória que potencialize uma extração térmica mais intensa em relação às escórias aplicadas em aços com tendência à depressão. O índice de basicidade do pó fluxante é o parâmetro que afeta diretamente a resistência térmica do filme de escória e, por consequência, a espessura da pele solidificada na saída do molde. Com o trabalho investigativo das melhores práticas, reduziu-se o índice de basicidade em 16,8% dos pós fluxantes aplicados em aços ultra baixo carbono obtendo um aumento de até 10,1% no fluxo de calor no molde. Além do aumento na espessura da pele solidificada, esse resultado também influenciou na estabilidade do nível de aço do molde e na qualidade superficial de placa.

Palavras-chave: Lingotamento contínuo; Pó fluxante; Transferência de calor.

INCREASE OF HEAT TRANSFER IN MOLD IN ULTRA LOW CARBON STEELS BY ADJUSTING THE PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF THE MOLD POWDER

Abstract

In continuous casting, the mold powder is responsible for the formation of a liquid slag in the mold which will form a slag film between the copper plate and the solidified shell. The main functions of the film are to lubricate and moderate the thermal flow in the mold. In particular, for steels with a tendency to stick, a slag is proposed to potentiate more intense thermal extraction in relation to the slag applied in steels with tendency to depression. The basicity index of the mold powder is a parameter that affects directly the heat resistance of the slag film and consequently, the thickness of the solidified shell at the outlet of the mold. With the investigative work of the best practices, the basicity index was reduced in 16.8% of the mold powder applied in ultra low carbon steel, and thus it was possible to increase up to 10.1% in the heat flux in the mold. In addition to the increase in the thickness of the solidified skin, this result also influenced the stability of the mold steel level and the slab surface quality.

Keywords: Continuous casting; Mold powders, Heat flux.

¹ Engenheiro Metalurgista, Mestre em Metalurgia Extrativa, CQE/ASQ, Pós-Graduação em Estatística; Engenheiro de Produção Sênior, Gerência Técnica de Aciaria, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil, alexandre.freitas@usiminas.com.

² Engenheiro Mecânico, Pós-Graduação em Metalurgia, Engenheiro de Produção Pleno, Gerência Técnica de Aciaria, Usinas Siderúrgica de Minas Gerais - Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, Mestre em Metalurgia Extrativa, CQE/ASQ, Engenheiro de Produção Sênior, Gerência Técnica de Aciaria, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

⁴ Engenheiro Metalurgista, Mestre em Metalurgia Extrativa, Gerente de Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Siderúrgicos, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais - Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O lingotamento contínuo de placas é o processo responsável por solidificar o aço líquido em aço sólido com forma controlada garantindo qualidade interna e superficial de placa. Na Figura 1(a) é apresentado um desenho esquemático de uma máquina de lingotamento contínuo de placas enfatizando o percurso do aço líquido até o ponto final de solidificação, e na Figura 1(b) o molde da máquina de lingotamento.

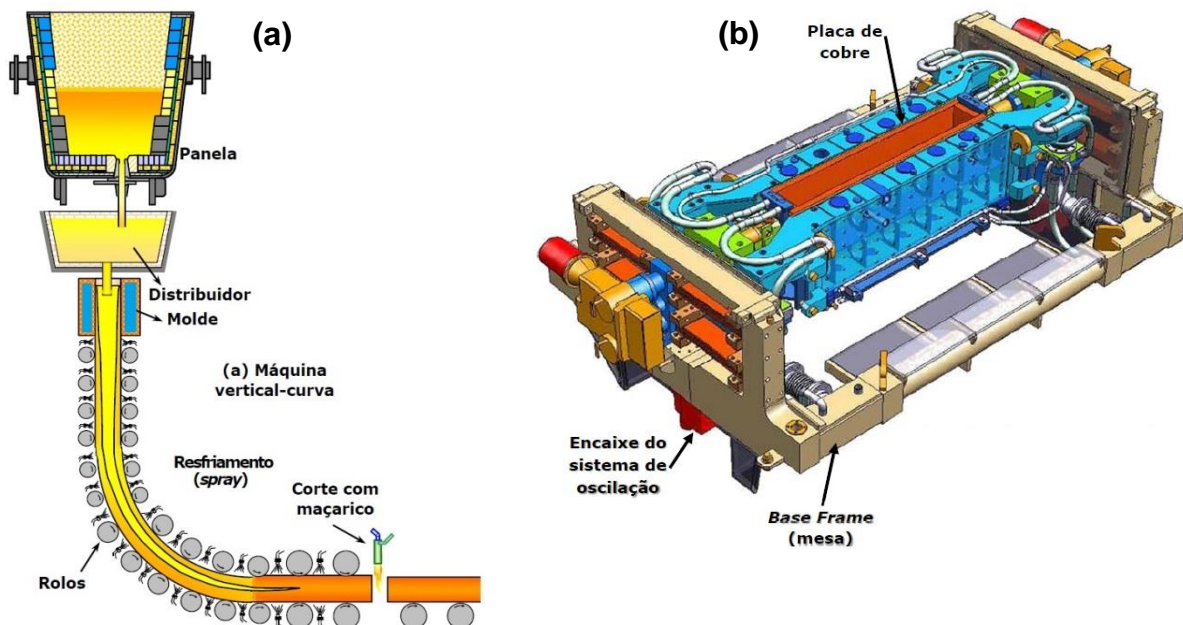
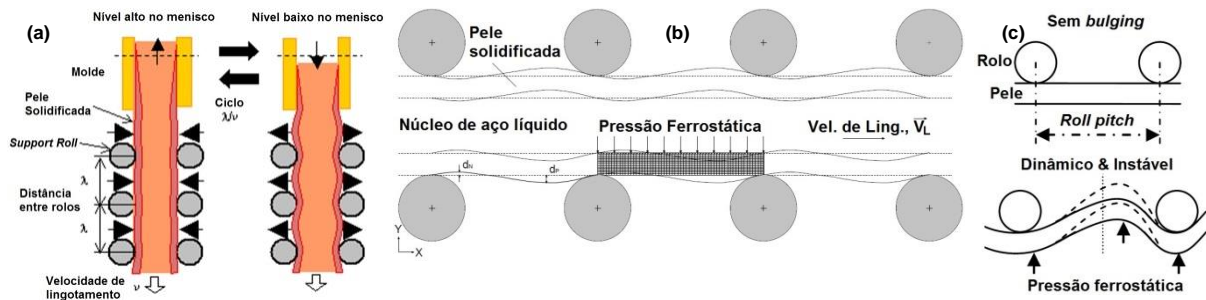


Figura 1. (a) Desenho esquemático da máquina de lingotamento contínuo em corte. (b) Molde da máquina de lingotamento [1].

Para iniciar a solidificação, o aço líquido do distribuidor é vazado para dentro de um molde de cobre refrigerado por água. Nesse molde, o aço líquido entra em contato com a sua superfície e forma uma fina camada sólida de aço a alta temperatura chamada de pele de aço solidificada. Para controlar a extração térmica e lubrificar a interface da pele de aço no molde é aplicado o pó fluxante sobre a superfície livre do aço (menisco) [2], superfície essa que estabelece o nível de aço no molde e é ponto de controle fundamental para o processo. O pó fluxante sobre essa superfície funde-se e gera uma escória líquida que infiltra entre a interface pele/molde em todas as paredes, estabelecendo um filme de escória de pó fluxante sólido/líquido. Além disso, o molde é oscilante, o que evita o agarramento dessa pele ao molde. À medida que a pele segue no sentido da saída do molde, ela aumenta a sua espessura. Ao sair do molde, essa pele de aço deve ter uma espessura mínima que suporte a pressão ferrostática do núcleo líquido da placa em solidificação. Se a pele não suportar essa pressão, ela se rompe ao sair do molde e o aço líquido presente no interior da placa vaza danificando a máquina de lingotamento contínuo. A esse fenômeno de rompimento da pele seguido de vazamento do núcleo líquido da placa em formação é denominado de *breakout* [3]. Entretanto, se a espessura da pele sólida na saída do molde atender as condições mínimas de segurança para evitar o *breakout*, mas abaixo da espessura que garanta a mínima flexão entre rolos, essa deformação conduzirá a um problema de bombeamento do núcleo líquido. A esse fenômeno se denomina *bulging*, e podendo ser dinâmico e/ou instável [4]. Ele deteriora o controle de nível do aço no molde, e por consequência, cria risco para a segurança operacional e degrada a qualidade superficial de placa. Na Figura 2 é ilustrado, de forma sucinta, o mecanismo e efeito do *bulging*.

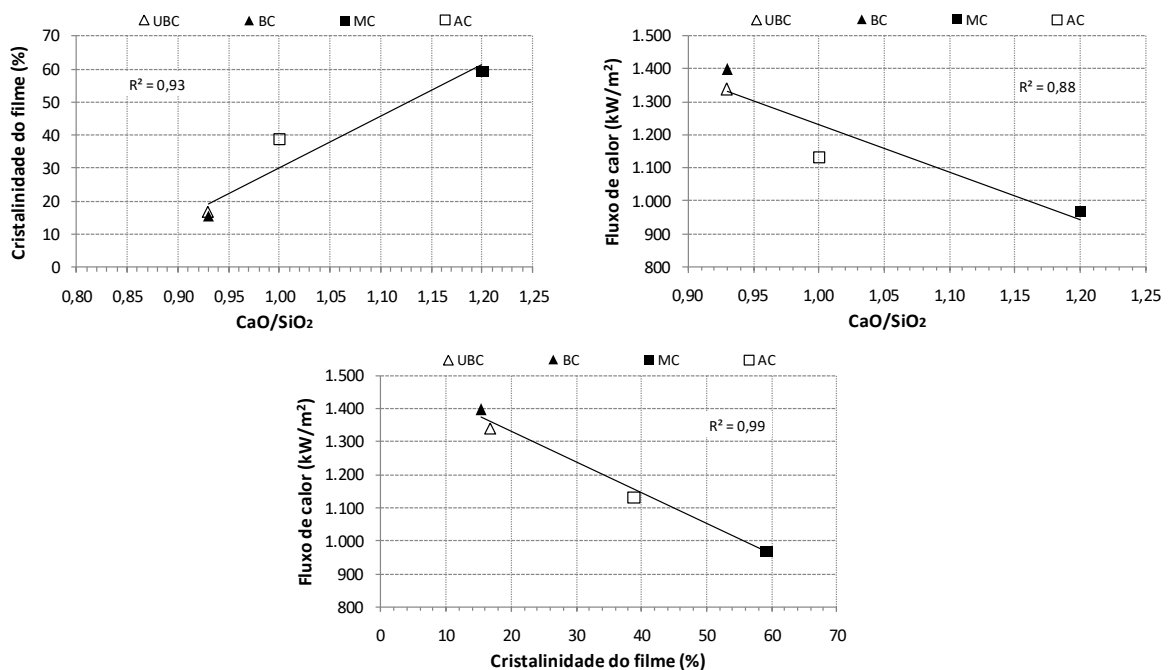


Legenda: (a) Efeito do bombeamento entre rolos afetando o nível do aço no molde [3]; (b) Ação da pressão ferrostática na deformação da pele [5]; (c) *Bulging* dinâmico e instável [4].

Figura 2. Efeito e mecanismo de *bulging*.

Existem vários mecanismos associados à potencialização do *bulging*. Alguns exemplos são: Distância entre rolos (*roll pitch*) excessiva; Característica química do aço; Resfriamento primário e/ou secundário incompatíveis; Elevação do nível térmico do veio; Presença de inclusões no aço líquido; Sistema de controle de fluxo inadequado e/ou ineficiente; Nível térmico do aço excessivo (superaquecimento); Frequência de oscilação de molde com tempo do estripamento negativo inadequado; Pó fluxante com propriedades inadequadas, dentre outros.

Dentre os mecanismos mencionados, a investigação sobre as propriedades pó fluxante mostrou-se oportuna. Dessa forma, foram levantadas as melhores práticas para pó fluxante de aço ultra baixo carbono com foco no ganho em extração térmica no molde. Em linhas gerais, com a redução do valor do índice de basicidade (IB) binária, razão entre CaO e SiO₂, do pó fluxante espera-se reduzir a cristalinidade do filme de escória na interface pele/molde. A redução desse parâmetro potencializa a extração térmica no molde, e por consequência, o aumento da espessura da pele solidificada na saída do molde, minimizando o efeito do *bulging* [6]. Tal constatação sobre a cristalinidade e o fluxo de calor é relatada pela literatura [7], e exemplos gerais sobre essas correlações podem ser observadas nos gráficos da Figura 3. Apesar da Figura 3 abordar o efeito sobre tipos de fluxantes distintos, a linha de raciocínio é mantida para o mesmo fluxante.



Legenda: UBC, Ultra baixo carbono; BC, Baixo carbono; MC, Médio carbono; AC, Alto carbono.
Figura 3. Efeitos da basicidade e da cristalinidade do filme de escória de pós fluxantes no fluxo de calor [7].

Por fim, pelo aumento da extração térmica é esperado um aumento de espessura de pele na saída do molde e assim reduzir, ou até mesmo eliminar, a tendência de *bulging*. Na Figura 4 é consolidado o efeito do coeficiente de transmissão de calor sobre a espessura da pele em um aço baixo carbono para dois casos: (a) $h = 0,18 \text{ W/cm}^2$ e (b) $h = 0,10 \text{ W/cm}^2$, estudados por Alberny *et al.* Apud Carlos *et al.* [6]. Como pode ser verificada, a previsão para o caso (a) $h = 0,18 \text{ W/cm}^2$ conduz a uma maior espessura, isso para o mesmo tempo de residência do aço no molde.

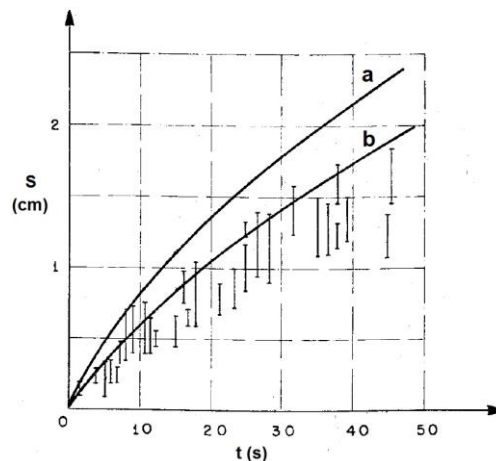


Figura 4. Comportamento de espessura de pele na saída do molde para dois fluxos térmicos [6].

2 DESENVOLVIMENTO

Para esse desenvolvimento foram comparados dois pós fluxantes de ultra baixo carbono de fontes distintas, denominados como Pó fluxante 1 (PF1) e Pó fluxante 2 (PF2). Cada pó fluxante foi avaliado em sua formulação original e formulação com índice de basicidade ajustado. Em cada teste de campo foram coletadas amostras do pó fluxante *in natura* e do filme de escória solidificada para análise química. A avaliação das amostras dos filmes de escória solidificadas foi feita por difração de raios X (DRX) para determinação das fases cristalinas formadas, visando à comparação do nível de cristalinidade entre as amostras e relacionar com o aumento de extração térmica no molde.

2.1 Proposta de alteração no índice de basicidade

Neste desenvolvimento visou-se maximizar a resposta da extração de calor no molde pela redução do índice de basicidade binária dos pós fluxantes com a mínima interferência possível em suas características originais, de forma não serem obtidos novos insumos. Isso por entender que as características gerais dos pós fluxantes originais atendem as necessidades operacionais e de qualidade, exceto pela resposta na extração térmica. Na Tabela I é resumida a proposta de ajuste no índice de basicidade, juntamente com os parâmetros de temperatura de cristalização e viscosidade dos pós fluxantes avaliados.

Tabela I - Proposta de redução no índice de basicidade dos pós fluxantes.

Pó fluxante	CaO/SiO ₂ Visado	Temperatura de cristalização (°C)	Viscosidade (Poise a 1300°C)	Varição de basicidade
1	Original	1135	1,9	- 9,47%
	Ajustado	1160	2,6	
2	Original	1199	2,1	- 18,81%
	Ajustado	1058	2,7	

Como mencionado, as duas principais funções do pó fluxante é controlar a transferência térmica no molde e lubrificar a interface pele/molde [8]. Com respeito à solidificação de aços ultra baixo carbono, a tendência deles é ao colamento no molde [9]. Assim sendo, deseja-se um pó fluxante com índice de basicidade menor ou igual a 1 para oferecer uma menor resistência térmica por apresentar um menor nível de cristalinidade. Por essa argumentação, entende-se que o pó fluxante 1 original estava melhor ajustado que o pó fluxante 2, fato esse positivo, e que refletiu em um menor valor da variação de basicidade na Tabela I.

2.2 Análises dos pós fluxantes 1 e 2 e seus respectivos filmes de escória

As análises químicas dos óxidos de CaO e SiO₂ dos fluxantes testados estão apresentadas na Tabela II.

Tabela II - Composição química dos óxidos de CaO e SiO₂ dos pós fluxantes.

Pó fluxante		CaO (%)	SiO ₂ (%)	IB	
1	Original	<i>In natura</i>	33,00	35,30	0,93
		Filme	35,50	38,00	0,93
	Ajustado	<i>In natura</i>	33,00	38,20	0,86
		Filme	34,30	39,20	0,88
2	Original	<i>In natura</i>	36,80	40,00	0,92
		Filme	37,00	38,20	0,97
	Ajustado	<i>In natura</i>	32,20	41,40	0,78
		Filme	32,40	39,60	0,82

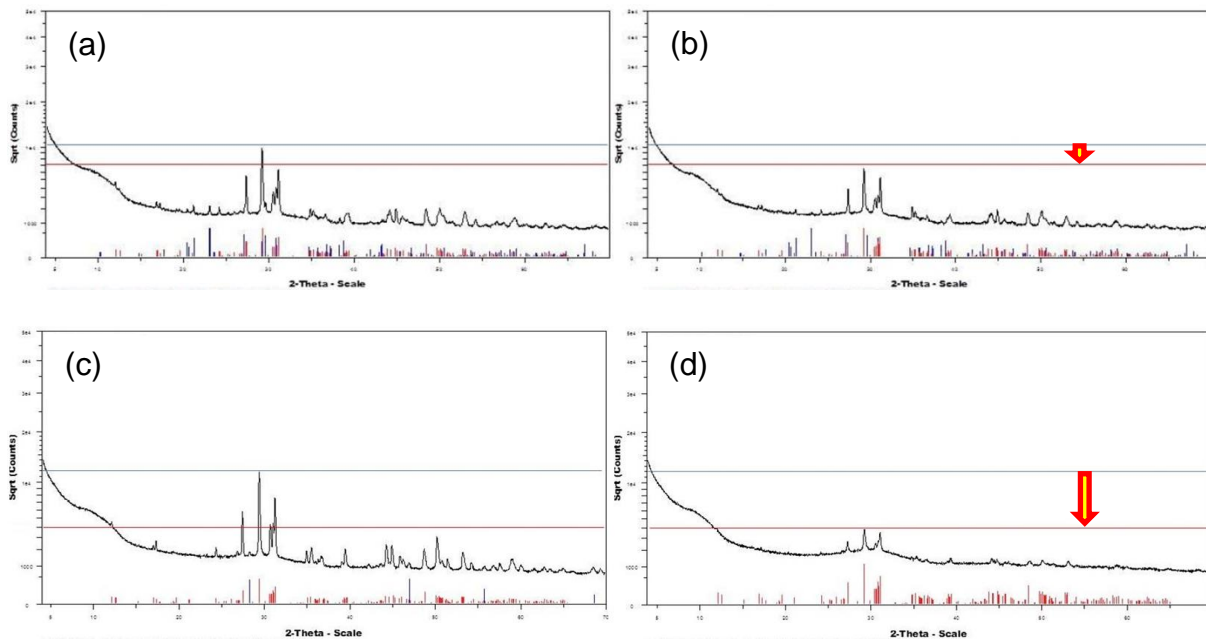
Em suma, as análises químicas dos óxidos CaO e SiO₂ dos pós fluxantes testados mostraram-se dentro de suas respectivas especificações e da proposta de teste. Não foram constatadas outras alterações de composição química e/ou na constituição mineralógica relevantes nas formulações dos pós fluxantes *in natura*.

Na análise do índice de basicidade entre o pó *in natura* e o filme de escória é possível perceber que o valor da basicidade é relativamente preservado, e que a variação natural não é suficiente para descaracterizar a proposta de redução da basicidade. Dessa forma, a redução no índice de basicidade entre os filmes de escória dos pós fluxantes originais e ajustados foi atendida. Todavia, mesmo tais alterações sendo mínimas, elas têm impacto em propriedades como viscosidade e temperatura de recristalização, alvo de investigação e discussão nos próximos itens.

2.3 Avaliação da cristalinidade dos filmes de escória dos pós fluxantes 1 e 2

Como abordado, a cristalinidade do filme de escória formada na interface pele/molde controla a transferência térmica. Dessa forma, a cristalinidade e a espessura do filme formado são a base para interpretação dos fenômenos térmicos no molde. Para aços ultra baixo carbono espera-se que a cristalização do filme de escória seja mínima para potencializar a máxima extração térmica. Para checar o comportamento da cristalinidade dos filmes de escória, realizou-se análise de difração de raios X nas amostras.

Na Figura 5 são apresentados os espectros de difração de raios X obtidos para os filmes de escória dos pós fluxantes amostrados industrialmente.



Legenda: (a) Pó fluxante 1 original; (b) Pó fluxante 1 ajustado; (c) Pó fluxante 2 original; (d) Pó fluxante 2 ajustado. Seta apresentando a magnitude dos maiores pico-a-pico entre os difratogramas.

Figura 5. Espectros de difração de raios X obtidos para os filmes de escória dos pós fluxantes.

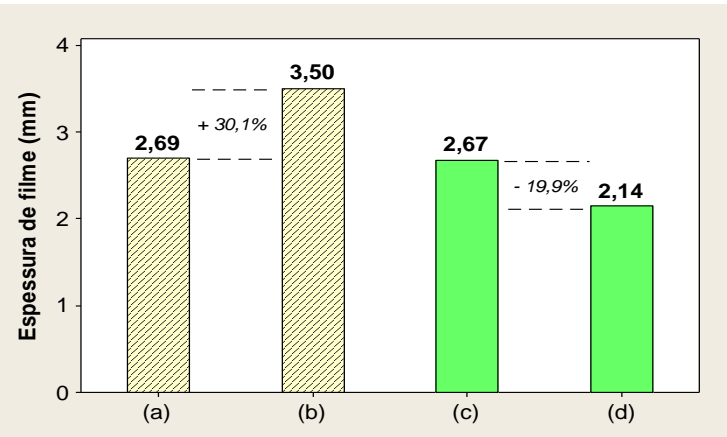
O que se percebe com os resultados de DRX em todas as amostras é a presença predominante de picos característicos da fase cristalina cuspidina, tipicamente formada em filmes de pós fluxantes comerciais. A presença de picos cristalinos não é predominante, indicando que houve cristalização parcial nos filmes de escória solidificados.

Comparando, de forma qualitativa, a intensidade dos picos cristalinos no espectro de difração, verifica-se que a intensidade dos picos é menor nos pós fluxantes com menor basicidade binária. Outra constatação é que o pó fluxante 2 apresenta maior diferença de intensidade de picos cristalinos que o pó fluxante 1. Tais diferenças levam ao entendimento que o pó fluxante 2 tem menor tendência de cristalização em relação ao pó fluxante 1.

A eventual alumina fluada no molde é capturada pela escória líquida do pó fluxante, o que tende a deixar os filmes de escória mais vítreos. Do ponto de vista de composição química, a cristalização é favorecida com o incremento da basicidade $(CaO+MgO)/(SiO_2+Al_2O_3)$. Sob essa perspectiva, o pó fluxante com menor basicidade apresenta menor grau de cristalinidade, o que está coerente com a proposta desse desenvolvimento.

2.4 Avaliação da espessura dos filmes de escória dos pós fluxantes 1 e 2

Outro aspecto importante é a espessura do filme de escória do pó fluxante solidificado na interface pele/molde. A resistência térmica do filme de escória solidificado aumenta à medida que a espessura da camada sólida aumenta para a mesma fração de fase cristalina. Dessa forma, os filmes de escória de pó fluxante amostrados foram medidos em vários pontos, para comparação. Na Figura 6 são apresentados os valores de espessuras medidos para cada filme de escória amostrado.



Legenda: (a) PF1 original; (b) PF1 ajustado; (c) PF2 original; (d) PF2 ajustado.

Figura 6. Exemplo de um filme de escória do pó fluxante 1 ajustado evidenciando a região da fratura, à direita. Espessuras dos filmes de escórias solidificadas de pós fluxantes, à esquerda.

Os dados referenciados na Figura 6 evidenciam comportamento distinto entre os pós fluxantes em relação a espessura do filme de escória. A redução da basicidade binária não parece ter relação direta com a espessura do filme de escória. Para o caso do pó fluxante 2, a espessura do filme do pó fluxante com basicidade reduzida foi inferior ao original. Entretanto, o contrário ocorreu para a espessura do filme do pó fluxante 1.

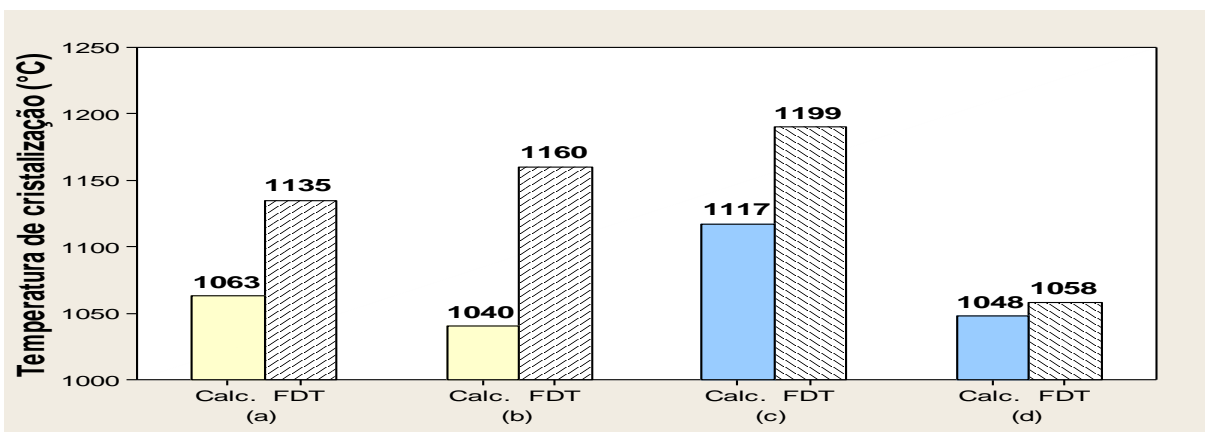
2.5 Avaliação da temperatura de cristalização dos pós fluxantes 1 e 2

O principal fator que afeta a espessura solidificada do filme de escória de pó fluxante é a temperatura de cristalização (ou temperatura de solidificação, também referida como *T break*). Um aumento na *T break* resulta em um aumento na espessura solidificada do filme de escória [10]. Sob essa perspectiva, uma avaliação da temperatura de solidificação pode ser realizada por meio da Equação (1), com base na composição química de cada filme de pó fluxante em estudo [11].

$$(T_{br} - 1120^{\circ}\text{C}) = - 8,4[\%\text{Al}_2\text{O}_3] - 3,3[\%\text{SiO}_2] + 8,65[\%\text{CaO}] - 13,8[\%\text{MgO}] - 18,4[\%\text{Fe}_2\text{O}_3] - 3,2[\%\text{MnO}] - 9,2[\%\text{TiO}_2] + 22,8[\%\text{K}_2\text{O}] - 3,2[\%\text{Na}_2\text{O}] - 6,47[\%\text{F}] \quad (1)$$

Nessa Equação (1) os compostos estão em porcentagem em peso e a temperatura em Celsius, calculada com um desvio de $\pm 20^{\circ}\text{C}$.

Os valores das temperaturas de cristalização da ficha de dados técnicos (FDT) e calculados (Calc.) pela Equação 1 estão apresentados na Figura 7.



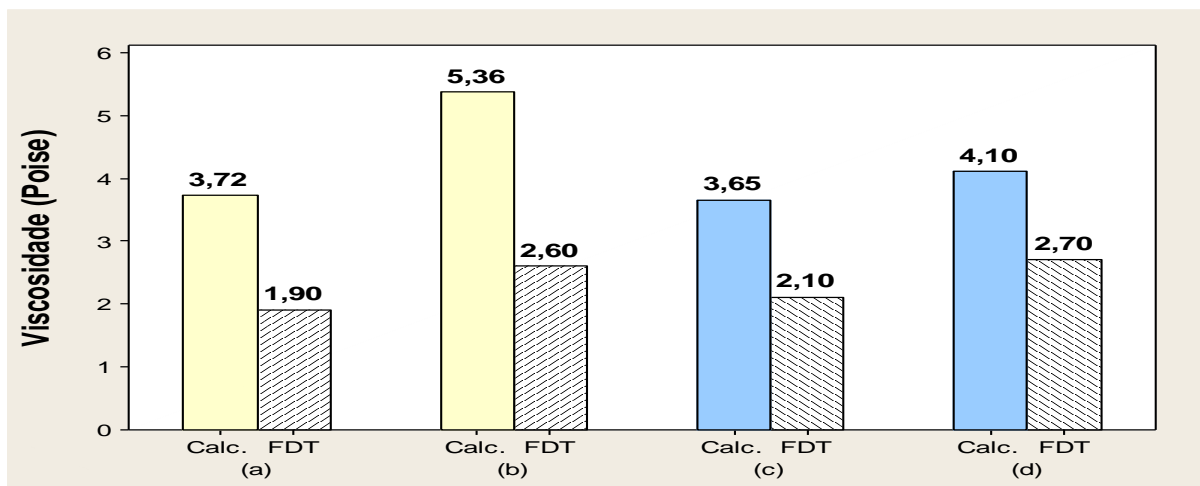
Legenda: (a) PF1 original; (b) PF1 ajustado; (c) PF2 original; (d) PF2 ajustado.

Figura 7. Temperatura de solidificação dos pós fluxantes.

Com base na Figura 7, e referente aos valores originados das FDT, a redução do índice de basicidade para o pó fluxante 1 implicou em uma elevação da temperatura de cristalização, mas essa mesma constatação não aconteceu para o pó fluxante 2, haja vista que a redução do índice de basicidade conduziu a redução da temperatura de cristalização. Agora, ao avaliar as temperaturas de cristalização calculadas para os dois pós fluxantes com redução do índice de basicidade, ambos apresentaram redução da temperatura de cristalização. Outro aspecto pertinente sobre os pós fluxantes com basicidade reduzida é que o fluxante 1 apresentou a maior temperatura de cristalização. Tal comportamento pode ser uma explicação para as diferenças de espessura solidificada dos filmes de escória amostrados industrialmente.

2.6 Avaliação da viscosidade dos pós fluxantes 1 e 2

Outro aspecto relevante é a avaliação da viscosidade do pó fluxante. Tal propriedade tem relação com o consumo específico e, conseqüentemente, com o fluxo de calor na interface pele/molde. Na Figura 8 são apresentados os valores de viscosidade da especificação (FDT) e calculadas (Calc.) via modelo Ribound-IRSID [12] para a composição química do filme de escória solidificada.



Legenda: (a) Pó fluxante 1 original; (b) Pó fluxante 1 ajustado; (c) Pó fluxante 2 original; (d) Pó fluxante 2 ajustado.

Figura 8. Viscosidade calculada para os pós fluxantes.

Percebe-se pelos dados da Figura 8, que as viscosidades dos pós fluxantes propostos são mais elevadas do que as viscosidades dos pós fluxantes originais, seja pelas FDT, seja pelos valores calculados pelas análises químicas dos filmes de escória. Agora, essa tendência também foi observada entre o valor da FDT e o valor calculado do respectivo filme de escória, sendo que o principal mecanismo de aumento de viscosidade se deve à incorporação da alumina.

Mills *et al.* [11] relataram um ligeiro aumento na espessura do filme de pó fluxante com o aumento da viscosidade. Neste caso, tal constatação está coerente com os resultados obtidos para o pó fluxante 1 que teve um incremento razoável de viscosidade e espessura do filme solidificado, quando se reduziu a basicidade binária. Para o pó fluxante 2 esta constatação não foi evidenciada.

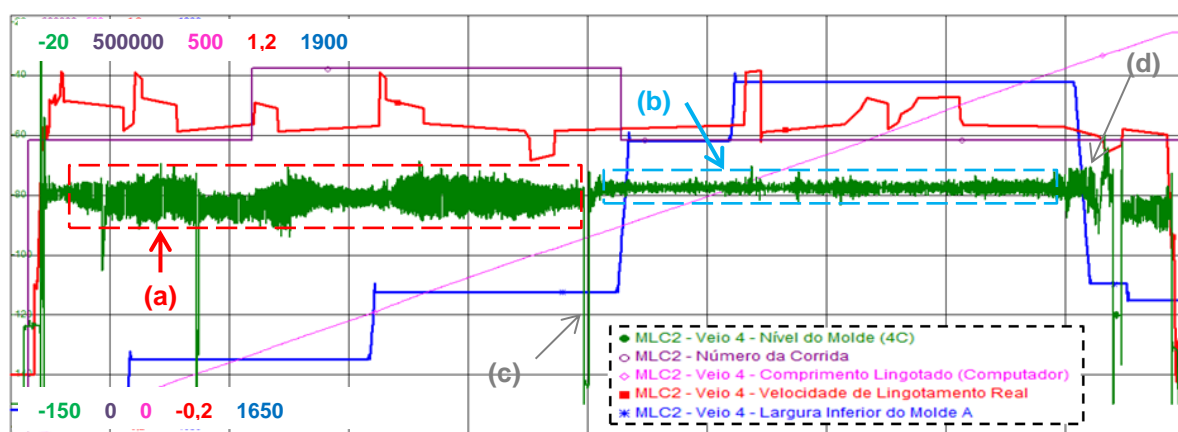
Todavia, existem dois efeitos conjuntos que devem ser avaliados: a temperatura de solidificação e a viscosidade. Neste aspecto, a hipótese que se aponta é que, para o pó fluxante 2 a temperatura de solidificação teve maior efeito na espessura do filme que a viscosidade, devido sua variação mais elevada. Entretanto, para o pó fluxante 1, o efeito da alteração de viscosidade foi predominante.

Por fim é complexo investigar os efeitos das propriedades do pó fluxante e suas relações com o processo de lingotamento. As características esperadas para o pó fluxante estão relacionadas com desenvolvimento do insumo (constituição e definição de propriedades) e das características do processo. Entretanto, as propriedades do pó fluxante podem ser afetadas pelo processo e vice versa, levando a resultados inesperados. A realização de experimentos, neste caso, deve ser rigorosamente controlada.

Em suma, sabe-se que a viscosidade afeta a espessura do filme e que tanto a redução da espessura do filme de escória quanto à redução da cristalinidade de pó fluxante na interface pele/molde intensifica a extração de calor. Pelas caracterizações realizadas, constata-se que o filme do pó fluxante 2 ajustado apresentou tanto redução de espessura do filme escória quanto redução de cristalinidade. Entretanto o filme do pó fluxante 1 ajustado apresentou menor intensidade na redução de cristalinidade e teve ganho de espessura, em relação à formulação original.

2.7 Efeito térmico no molde pela aplicação dos pós fluxantes 1 e 2 com índice de basicidade ajustado

Com a expectativa de ganho de extração térmica, é esperado um ganho de espessura de pele na saída do molde com a redução na intensidade do *bulging* em aços ultra baixo carbono e, por consequência, uma melhoria no controle de nível de aço no molde. Por se tratar de uma análise de campo complexa, em virtude de inúmeras variáveis que potencializam o *bulging*, direcionaram-se os pós fluxantes com índice de basicidade ajustados para a produção no veio com larguras superiores a 1.500mm. Cada molde apresenta uma vida específica, e respectivamente, espessuras de paredes de cobre diferentes (resistências térmicas). Devido a isso, optou-se por avaliar termicamente o molde/veio e o respectivo controle de nível de aço dele durante uma série em lingotamento. Nos dados de campo apresentados na Figura 9 é ilustrado no trecho (a) o desempenho do pó fluxante original e, após a troca programada, pelo trecho (b), o desempenho do fluxante ajustado. Por terem efeitos de campo muito próximos na extração térmica (menos de 2,3%), elegeu-se o pó fluxante 2 com índice de basicidade reduzido para exemplificar se o ganho de extração térmica teve efeito sobre o controle de nível de aço no molde em um veio e no mesmo sequencial.



Legenda: (a) Pó fluxante 2 original; (b) Pó fluxante 2 ajustado; (c) Troca preventiva de válvula submersa; (d) Região do controle de nível com reposicionamento da altura do tampão.

Figura 9. Parâmetros operacionais de lingotamento enfatizando o controle de nível do aço no molde.

Na corrida de transição entre os pós fluxante, estrategicamente foi realizada a troca da válvula submersa. Após a troca, ao analisar a válvula submersa *post mortem*, não foi observado *clogging* no canal de trabalho e nem em suas portas de saída. Tal fato era

esperado pelo posicionamento estável do tampão e abertura proporcional à vazão mássica de lingotamento no veio, indícios esses que o mecanismo associado à degradação do controle de nível do aço não está ligado à presença de inclusões no aço. Ao aplicar o fluxante 2 rotina, o nível do molde apresentava variação de $\pm 3,7\text{mm}$ (1σ), com amplitude máxima de 20,1mm. Após a entrada do pó fluxante 2 com índice de basicidade reduzido, e sendo atendido o tempo mínimo para o veio sentir o efeito da alteração térmica no molde, o nível passou a apresentar uma variação de $\pm 0,6\text{mm}$ (1σ), com amplitude máxima de 6,3mm, que está dentro da especificação do sensor de controle de nível automático, indicativo desse que o principal mecanismo do *bulging* é pela baixa resistência à deformação da pele de aço associada as características construtivas (*roll pitch*) e térmicas da máquina de lingotamento. Em particular, o mecanismo para a transmissão do efeito do ganho de espessura segue uma sequência de eventos dentro do veio, onde após a entrada do pó fluxante ajustado deve acontecer a renovação da escória líquida do molde e do filme de escória sólida entre a interface pele/molde, para o efeito do ganho de espessura de pele alcançar a parte reta da máquina (ao menos 23 metros lingotados), gerando uma melhor sustentação da pele entre os pontos de apoio dos rolos. Na Figura 10 é apresentado o comportamento da extração total de calor (kJ/kg) no molde e os respectivos intervalos com 95% de confiança entre duas corridas de aço ultra baixo carbono produzidas no mesmo sequencial com os parâmetros de processos simétricos, sendo a primeira realizada com o pó fluxante 2 original, e a segunda com o pó fluxante 2 com o índice de basicidade reduzido.

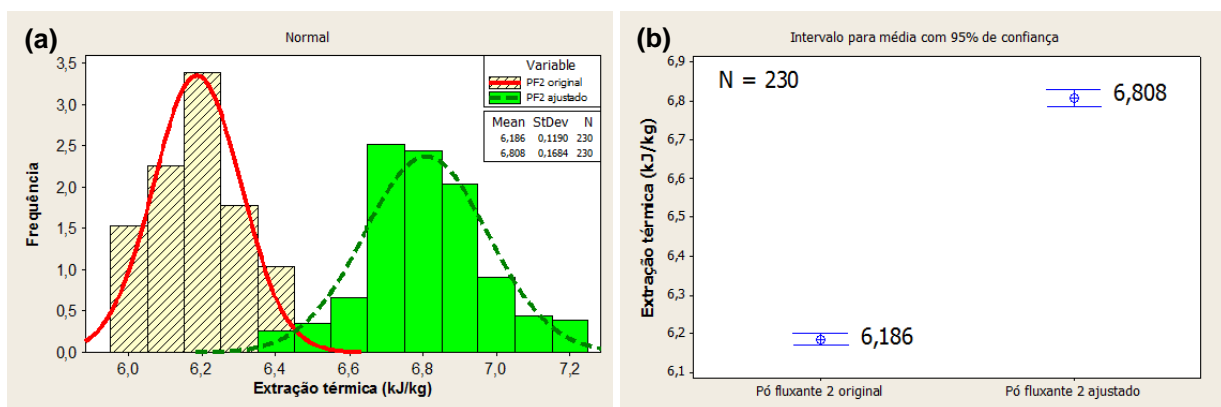


Figura 10. (a) Histogramas da extração total de calor de duas corridas de aço UBC. (b) Intervalos com 95% de confiança para a extração de calor no molde (N=230; V fixa: $(0,81\pm 0,01)\text{m/min}$).

Pela verificação dos intervalos de confiança apresentados na Figura 10 (b), existe evidência estatística para sustentar que a alteração na extração térmica no molde é diferente entre as corridas, isso para o nível de significância de 5,0%. Com base na diferença entre as médias, é possível aferir 10,1% de ganho na extração térmica do molde pela aplicação do pó fluxante 2 com basicidade reduzida em relação ao original. Infelizmente tal abordagem não elimina todos os mecanismos possíveis de excesso de variação de nível de aço no molde por formação de *bulging*, mas torna o sistema menos sensível ao fator baixa espessura de pele na saída do molde. Tal situação pode ser constatada no final da Figura 9, na indicação (d), onde o controle de nível do aço do molde degradou, mas com aumento sistemático e proporcional da abertura do tampão para a mesma vazão mássica (velocidade de lingotamento), evento que sinaliza obstrução da válvula interna de distribuidor por *clogging*. E de fato, ao finalizar o veio/série e inspecionar a válvula submersa *post mortem*, confirmou-se a presença de material não metálico aderido ao canal interno e nas portas de saída.

2.8 Impacto na qualidade de placa e laminado pela aplicação dos pós fluxantes 1 e 2 com índice de basicidade ajustado

Foram realizados vários testes industriais de homologação com os pós fluxantes de aços ultra baixo carbono com índice de basicidade reduzidos. Em nenhum deles foi verificado interferência com o processo e nem degradação dos resultados de qualidade de placa e/ou laminado que inviabilizasse o desenvolvimento. Pelo contrário, constatou-se uma menor frequência de inclusões de pó fluxante no *check scarfing* de placa e, para o produto laminado, não foi observado desvio ou recusa por esfoliamento por pó fluxante. Resultado esse coerente com o benefício da redução da intensidade ou eliminação do *bulging*. Em linhas gerais, a camada de escória líquida no molde deve ter uma espessura tal que amortecia as perturbações dinâmicas no menisco impostas pela reposição contínua de aço líquido e pela oscilação do molde. Uma espessura de camada de escória líquida entre duas a três vezes à amplitude (a distância entre vale mínimo a pico máximo) da variação de nível é uma boa prática para a qualidade de placa. O nível deve ser o mais estável possível para não romper a camada de escória líquida, e assim, evitar o contato do pó fluxante *in natura* com o aço líquido, e assim, mitigar ou até mesmo eliminar a ocorrência de inclusão de pó fluxante em placa. Outro aspecto é a velocidade de variação do menisco, que influencia diretamente na chance de romper a camada de escória líquida, onde em geral, velocidades baixas tendem a não romper essa camada por permitir seu reposicionamento regular da escória. Com a redução da intensidade de *bulging*, esses fatores mencionados são minimizados ou eliminados, melhorando a condição de controle do nível de aço no molde, e por consequência, o resultado de qualidade de placa e produto laminado.

3 CONCLUSÃO

Com base nas análises químicas realizadas verificou-se que ambos os pós fluxantes atenderam a proposta de redução da basicidade. O pó fluxante 1 e o pó fluxante 2 apresentaram valores médios de basicidade de 0,88 e 0,82 respectivamente. Não foi constatada também nenhuma alteração na constituição mineralógica, indicando que não houve mudança na formulação dos insumos.

Do ponto de vista da extração de calor, dois pontos foram considerados:

- (i) a espessura do filme de escória solidificado na interface pele/molde (o incremento de espessura reduz a extração de calor);
- (ii) a cristalinidade desse filme (aumento da cristalinidade reduz a extração de calor).

Os resultados mostraram que o pó fluxante 2 gerou um filme de escória solidificado de menor espessura com a diminuição da basicidade. O contrário ocorreu com o fluxante 1, apresentando filme mais espesso com a redução da basicidade. Do ponto de vista da cristalinidade, ambos os pós fluxantes propostos produziram filmes solidificados com menor grau de cristalização. Entretanto, a redução da cristalinidade para o pó fluxante 1 foi menor do que para o pó fluxante 2.

Com base nos resultados entende-se que o pó fluxante 2 apresentou uma relação de espessura solidificada e grau de cristalização que favorece a elevação da extração de calor no molde. Com relação ao pó fluxante 2, entende-se que existe espaço para a redução da temperatura de cristalização objetivando uma redução da espessura solidificada e do grau de cristalização dos filmes.

Em linhas gerais, a redução da basicidade dos pós fluxantes aumentou a extração térmica no molde. Exclusivamente para o fluxante 2, esse ganho de extração foi de 10,1%. Por definição, o incremento na extração de energia no molde repercute em uma maior espessura de pele na saída dele, desdobrando em uma maior sustentação da

pele sólida entre os rolos, o que reduz a intensidade do *bulging* e melhora o controle de nível do molde.

Constatou-se uma menor frequência de inclusões de pó fluxante no *check scarfing* de placa e, para o produto laminado, não foi observado desvio ou recusa por esfoliamento por pó fluxante.

Agradecimentos

Os autores agradecem:

- Ao Pesquisador Rafael Fernandes Reis pelas contribuições técnicas a esse trabalho;
- Aos Gestores Everton Paço Cunha e Flávio Viana Diniz Soares por abraçarem o desenvolvimento e viabilizarem uma estrutura de apoio operacional e técnico;
- E a todos os participantes das áreas de operação que se envolveram com as atividades, representados aqui pelos colaboradores: Alberto César Soares Rodrigues e Cáiser Antônio Cunha dos Reis.

REFERÊNCIAS

- 1 Rizzo E. Lingotamento contínuo – Equipamento e instalações, Usiminas, Ipatinga, 2015:78.
- 2 Cimarelli T, Ferreti A. Kempro international. A tool to explain the behavior of lubricating and covering powder during continuous casting.
- 3 Machado MLP, Sobrinho VPFM e Arrivabene LF. Siderurgia para não Siderurgistas, CEFET-ES, Vitória, ES, Brasil. 2003.
- 4 Karim J, Emmanuel G, Didier D, Alain M, Bertrand B. Cancellation of Bulging Effect on Mold Level in Continuous Casting: Experimental Validation. IFACMMM 2009. Viña del Mar, Chile, 14 - 16 October 2009.
- 5 Sumitomo Metal Industries, Ltd. Development of High-Efficiency Continuous Casting Technologies. Aiming for world-leading technologies through use of proprietary technologies and collaboration with universities. [acesso em 25/07/2017] Disponível em: https://www.nipponsteel.com/en/news/old_smi/2008/news2008-10-16-02.html.
- 6 Carlos ABC, Marcos ETA, Amauro G. Transferência de calor na etapa de resfriamento primário do lingotamento contínuo do aço. Unicamp, Campinas, SP. 1979.
- 7 Oliveira, LJS. Lima MTD. Rodrigues FD; Valadares CAG. Diego AA. Avaliação da extração de calor no molde de lingotamento contínuo utilizando diferentes pós fluxantes. In: Seminário de aciaria Internacional, 42. ABM Brasil, Salvador, BA 2011.
- 8 Cimarelli T, Ferreti A. Kempro international. A tool to explain the behavior of lubricating and covering powder during continuous casting.
- 9 Wolf MM. Estimation method of crack susceptibility for new steel grades. In: European Conference on Continuous Casting, 1. Florença, 1991.
- 10 Mills KC. Mold Powders for Continuous Casting. In: Cramb AW. The Making, Shape and Treating of Steel. 11ª Edição. Warrendale: AIST Iron and Steel Technology, 2003, cap. 08, p.1-41.
- 11 Mills KC, Dacker C. The Casting Powders Book. Springer International Publishing. 2017.