



AVALIAÇÃO DA EXTRAÇÃO DE CALOR NO MOLDE DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO UTILIZANDO DIFERENTES PÓS FLUXANTES¹

Leonardo José Silva de Oliveira²

Marco Túlio Dias Lima³

Fabício Domith Rodrigues⁴

Cláudio A. G. Valadares⁵

Alexandra de Almeida Diego⁶

Resumo

Neste estudo, o comportamento de 4 pós fluxantes, destinados ao lingotamento contínuo de aços UBC, BC, MC e AC, foram estudados por meio de testes de solidificação/cristalização piloto e ensaios laboratoriais. Com base nos resultados obtidos foi possível avaliar o comportamento de cristalização dos pós fluxantes e a interferência desse fenômeno na resistência à transferência de calor na interface placa/molde. Foi possível também comparar os pós fluxantes com relação à indicação de uso. Os resultados mostraram que existe uma relação direta entre o grau de cristalização dos filmes de pó fluxante com o fluxo de calor. Quando ocorre um aumento da cristalinidade dos filmes há uma redução significativa na quantidade de calor removido.

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

EVALUATION OF HEAT EXTRACTION IN CONTINUOUS CASTING USING DIFFERENT MOULD FLUXES

Abstract

In the present paper, the behavior of 4 mould fluxes, for the continuous casting of ULC, LC, MC and HC steels, were studied by solidification/crystallization experimental test and laboratory analysis. Using the results was possible evaluate the crystallization behavior of mould fluxes and its effect on heat transfer resistance in mold/slab interface. It also was possible to compare the mould fluxes regarding the use indication. The results showed a direct relationship between the mould film crystallization degree with the heat flux. If the films crystallinity increases it will be a significant reduction in the amount of heat removed.

Key words: Mould fluxes; Continuous casting; Heat extraction.

¹ Contribuição técnica ao 42º Seminário de Aciaria – Internacional, 15 a 18 de maio de 2011, Salvador, BA, Brasil.

² Membro da ABM; M. Sc; Engenheiro Metalurgista, Centro de Tecnologia Usiminas - Unidade de Ipatinga, Usiminas; Ipatinga, MG.

³ Membro da ABM, Técnico em Metalurgia, Centro de Tecnologia Usiminas - Unidade de Ipatinga, Usiminas; Ipatinga, MG.

⁴ Membro da ABM; MBA; Engenheiro Metalurgista, Superintendência de Aciaria, Usiminas; Ipatinga, MG.

⁵ Membro da ABM; M. Sc, CQE/ASQ, Eng. Metalurgista, Diretor Técnico; Carbox, Resende, RJ.

⁶ Engenheira de Materiais, Desenvolvimento de Produtos; Carbox, Resende, RJ.



1 INTRODUÇÃO

Os pós fluxantes são insumos, fabricados a partir de uma mistura de minerais com a adição de carbono, usados no processo de lingotamento contínuo do aço para promover a lubrificação da interface formada entre o molde e a placa em solidificação. Além disso, os pós fluxantes devem controlar a transferência de calor, proteger a superfície livre do aço contra a reoxidação e a perda de temperatura e, também, absorver as inclusões que flutuam no molde. Para exercer adequadamente suas funções, algumas propriedades importantes devem estar ajustadas. Estas propriedades estão relacionadas com o comportamento deste insumo durante a fusão, com a viscosidade e com a sua trajetória de cristalização.

Durante o processo de solidificação a extração de calor é um fator essencial. Os pós fluxantes são ajustados para assegurar que exista uma taxa de extração de calor adequada na interface placa/molde, garantindo assim, uma pele solidificada mais homogênea. O que se busca para o processo de lingotamento é a otimização do fluxo de calor de maneira que se possa promover uma operação mais estável e sem ocorrência de defeitos superficiais.

Avaliar a transferência de calor e a evolução da cristalização dos filmes de pó fluxante no molde industrial não é simples, pois a interface placa/molde não é acessível e é sensível às perturbações externas. Assim, observações diretas durante o lingotamento não são possíveis. Outro problema é avaliar os efeitos das diversas variáveis que afetam a remoção de calor *in loco* de maneira independente.

Para contornar tais problemas, tem sido proposta na literatura a utilização de equipamentos piloto para a simulação das etapas iniciais de solidificação. Estes aparatos laboratoriais podem ser de diferentes tipos, tais como: de imersão, moldes estáticos ou, até mesmo, máquinas de lingotamento piloto.^(1,2) A maioria dos estudos realizados com equipamentos laboratoriais tem como objetivo avaliar os efeitos de parâmetros operacionais na qualidade do produto lingotado e no fluxo de calor.

Neste sentido, para avaliação da interferência de filmes de pó fluxante na extração de calor no molde de lingotamento, foram realizados experimentos em escala piloto, buscando-se, assim, um melhor controle das variáveis que afetam a extração de calor. O principal objetivo deste trabalho é entender a contribuição de diferentes filmes de pó fluxante no controle da extração de calor, bem como, comparar o comportamento destes insumos em situações próximas da industrial.

2 METODOLOGIA

Para a realização dos experimentos foram utilizados quatro pós fluxantes comerciais destinados ao lingotamento contínuo dos aços ultra baixo (UBC), baixo (BC), médio (MC) e alto (AC) teores de carbono. A Tabela 1 apresenta as características físico-químicas dos pós fluxantes estudados.

Tabela 1. Propriedades dos pós fluxantes (valores calculados)

Pó fluxante	CaO/SiO ₂	Temperatura de cristalização (°C)	Viscosidade a 1300°C (Poise)
UBC	0,93	1.117	1,10
BC	0,93	1.128	1,15
MC	1,20	1.200	0,92
AC	1,00	1.097	0,75

Para obtenção da viscosidade e da temperatura de cristalização utilizou-se correlações baseadas no método descrito por Riboud e Larrecq.⁽³⁾



2.1 Método Experimental

Para avaliação da interferência de cada pó fluxante na extração de calor, foi utilizado um aparato laboratorial desenvolvido por Oliveira.⁽⁴⁾ O aparato é composto por um amostrador cilíndrico de cobre, refrigerado à água, instrumentado com termopares e um rotâmetro, para medida da temperatura e vazão de entrada e saída da água de refrigeração do sistema. A Figura 1 apresenta o desenho esquemático do equipamento desenvolvido e uma fotografia de aspecto do amostrador de cobre.

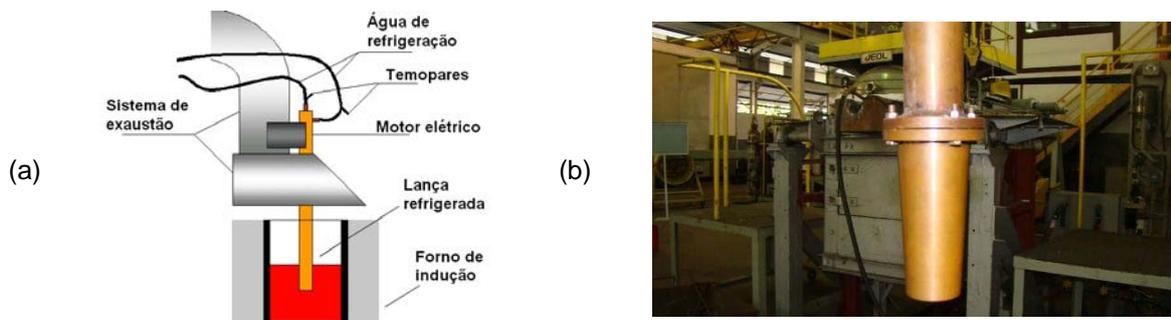


Figura 1. Desenho esquemático do equipamento desenvolvido (a). Amostrador de cobre (b).⁽⁴⁾

Para a realização dos testes, o forno de indução é carregado com o pó fluxante *in natura* e aquecido até a completa fusão da carga. Em seguida, a temperatura é verificada e corrigida para os valores visados e o amostrador é imerso no pó fluxante líquido por um período de tempo pré-determinado, a uma vazão de água constante. Após este tempo, o amostrador é removido, quando a amostra do filme de pó fluxante solidificado é coletada. A Figura 2 apresenta o desenho esquemático do processo de imersão e remoção do amostrador.

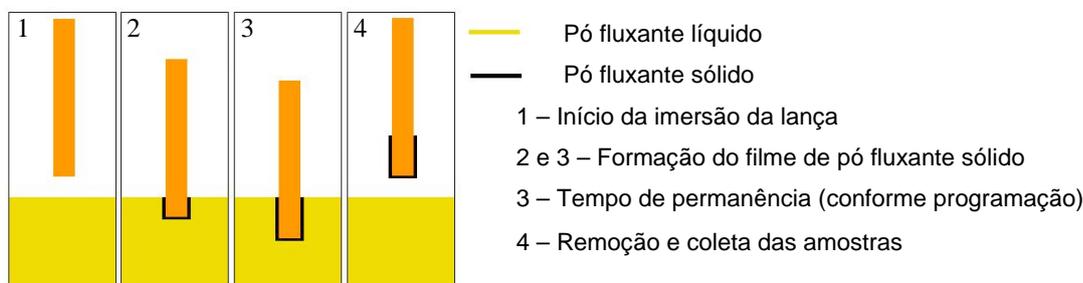


Figura 2. Processo de imersão e remoção do amostrador no pó fluxante líquido.⁽⁵⁾

Os parâmetros de controle para o teste são: a temperatura do pó fluxante líquido, a vazão de água de refrigeração e o tempo de imersão do amostrador. A tabela 2 apresenta os valores visados em cada teste.

Tabela 2. Parâmetros de teste

Temperatura do pó fluxante líquido	Vazão de água	Tempo de imersão do amostrador
1.400 +/- 35°C	26 l/min	10, 20, 30, 40, 50 e 60 segundos

Vale ressaltar que, os tempos de imersão são contados a partir do curso total do amostrador (quadro 3 da figura 2). As temperaturas do pó fluxante líquido foram medidas, utilizando um termopar tipo S PtRh, antes de cada teste de imersão.

2.2 Avaliação da Cristalinidade dos Filmes

Para a determinação do grau de cristalização dos filmes de pó fluxante



utilizou-se técnicas de análise térmica diferencial (ATD) conforme descrito por Oliveira et al.⁽⁵⁾ A técnica baseia-se no modelo cinético desenvolvido por Kolmogorov et al. apud Fokin et al.⁽⁶⁾ que descreve a extensão da transformação de um dado material em função do tempo e da temperatura.

A cinética de cristalização pode ser interpretada a partir do modelo de nucleação e crescimento, sendo a fração transformada relacionada com a intensidade do pico exotérmico da ATD. A equação (1) descreve a dependência da fração cristalizada f com o tempo e a sua relação com o pico da ATD.

$$f = \frac{V_c}{V} = 1 - \exp[-kt^n] \quad \therefore V_g = \frac{(\delta T)_p}{\theta} = N_t \exp[-kt^n] \quad (1)$$

Na equação (1), t representa o tempo, n o coeficiente de Avrami e k é uma constante dependente da temperatura, N_t é a quantidade de núcleos totais, θ uma constante de proporcionalidade e $(\delta T)_p$ é a intensidade do pico na ATD.

Se a fração transformada é proporcional ao pico da análise térmica diferencial, pode-se tomar como referência uma amostra totalmente vítrea e a partir dela avaliar a quantidade de fases cristalinas presentes em outros filmes solidificados através da equação (2).

$$\%V_c = \frac{(\delta T)_p^g - (\delta T)_p^{teste}}{(\delta T)_p^g} \times 100 \quad (2)$$

Na equação (2) os termos $(\delta T)_p^g$ e $(\delta T)_p^{teste}$ são a intensidade do pico na ATD para uma amostra totalmente vítrea e para a amostra em estudo.

Os filmes de pó fluxante obtidos nos testes piloto foram analisados utilizando difração de raios-X (DRX) e análise térmica diferencial (ATD), para determinação da cristalinidade. Na ATD a amostra foi aquecida até uma temperatura de 1.300°C com uma taxa de 20°C/min. Para obtenção da amostra totalmente vítrea, os pós fluxantes líquidos foram resfriados rapidamente entre duas placas de aço inox.

2.3 Avaliação das Resistências Térmicas

A formulação da transferência de calor na região do molde é bastante complexa. Muitas abordagens diferentes têm sido utilizadas para o problema. A mais comum é a utilização de aproximações de engenharia, visando o entendimento do fluxo de calor sem ter que solucionar as equações diferenciais. Esta abordagem é denominada de analogia elétrica para a transferência de calor, na qual as barreiras ao fluxo térmico são transformadas em resistência e os seus efeitos são somados como um arranjo de resistências em série ou em paralelo. Neste caso, não é possível obter o perfil térmico do domínio, mas é possível quantificar os aspectos da transferência de calor de uma maneira global. Sob este ponto de vista pode-se interpretar o molde de lingotamento em termos de resistências térmicas. A figura 3 apresenta a representação das resistências térmicas para o fluxo de calor no molde de lingotamento contínuo, conforme proposto por Saraswat et al.⁽⁷⁾

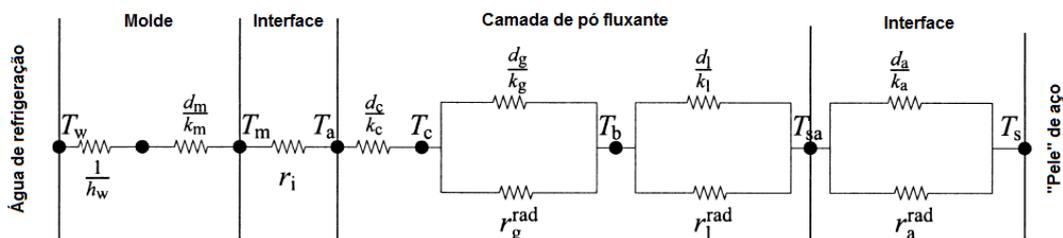


Figura 3. Resistências térmicas no lingotamento contínuo.⁽⁷⁾



Conforme Figura 3, a resistência ao fluxo de calor inclui a radiação e a condução de calor através das diferentes camadas desde o aço líquido até a água de refrigeração do molde. A partir destas definições é possível expressar o fluxo de calor no lingotamento contínuo conforme apresentado na equação (3).⁽⁷⁾

$$q = \frac{T_S - T_m}{r_a + r_l + r_g + r_c + r_i + \frac{1}{h_w} + \frac{d_m}{k_m}} = \frac{T_S - T_m}{R_{total}} = R_{total} (T_S - T_m) \quad (3)$$

Na equação (3) r_a , r_l , r_g , r_c e r_i são as resistências térmicas do vazio de contração, da camada de pó fluxante líquida, sólida vítrea, sólida cristalina e de interface; h_w é o coeficiente de extração de calor entre a água e o molde; d_m é a espessura do molde e k_m a condutividade do cobre. Os símbolos R_{total} e h_{total} são a resistência térmica total e o coeficiente de transferência de calor global.

Como o teste piloto proposto utiliza somente o pó fluxante, pode-se utilizar o conceito de resistências térmicas e adaptar a Figura 3 para as condições de solidificação do pó fluxante em laboratório. A Figura 4 apresenta um desenho esquemático das resistências térmicas para o teste piloto realizado.

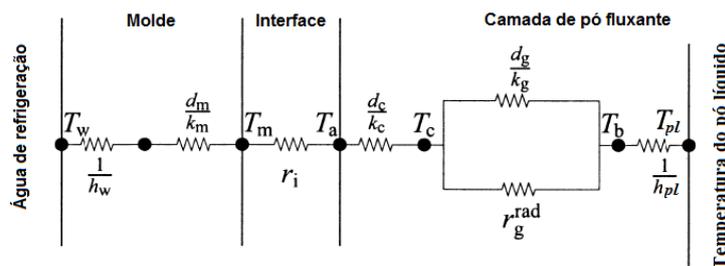


Figura 4. Resistências térmicas associadas ao fluxo de calor no experimento laboratorial.

Conforme Figura 4, as resistências térmicas avaliadas no teste de solidificação dos pós fluxantes estão associadas às camadas de pó fluxante, à resistência de interface e ao amostrador de cobre. Seguindo a mesma lógica utilizada para desenvolvimento da equação (3) é possível propor uma equação para a determinação do fluxo de calor em função das resistências térmicas para o teste piloto de solidificação. A formulação proposta é apresentada pela equação (4).

$$q = \frac{T_w - T_{pl}}{\frac{1}{h_{pl}} + r_g + r_c + r_i + \frac{1}{h_w} + \frac{d_m}{k_m}} = \frac{T_w - T_{pl}}{R_{total}} = R_{total} (T_w - T_{pl}) \quad (4)$$

Na equação (4) r_g , r_c e r_i são a resistência térmica vítrea e cristalina e a resistência de interface; h_{pl} é o coeficiente de transferência de calor entre o pó fluxante líquido e o pó fluxante sólido; h_w é o coeficiente de extração de calor entre a água e o amostrador de cobre; d_m é a espessura da parede do amostrador e k_m a condutividade do amostrador. Os símbolos R_{total} e h_{total} representam a resistência térmica total e o coeficiente de transferência de calor global.

Utilizando os valores da variação da temperatura da água de refrigeração medidos nos testes de solidificação do pó fluxante, calculou-se o fluxo de calor, conforme a equação (5).



$$q = \frac{(m C_p \Delta T)}{A} \quad (5)$$

Na equação (5), m é a vazão mássica de água (kg/s), C_p é o calor específico da água (4178 J/kg K à temperatura de 300 K), ΔT é a variação da temperatura da água (K) e A é a área do amostrador que foi introduzida no metal líquido (m²).

Levando em consideração que durante a solidificação do pó fluxante não há geração de energia, o fluxo de calor é igualmente conduzido em todas as camadas. Neste caso, fazendo uso da equação (5) e aplicando a regra da conservação de energia é possível utilizar a equação (4) para avaliar o coeficiente global de transferência de calor e a resistência total nos testes de solidificação.

Vale ressaltar que, nos testes de solidificação as temperaturas do pó fluxante líquido (T_{pl}) e a temperatura da água de refrigeração (T_w) foram medidas.

3 RESULTADOS

A Figura 5 apresenta a variação da temperatura da água de refrigeração do amostrador de cobre medida durante a execução dos testes.

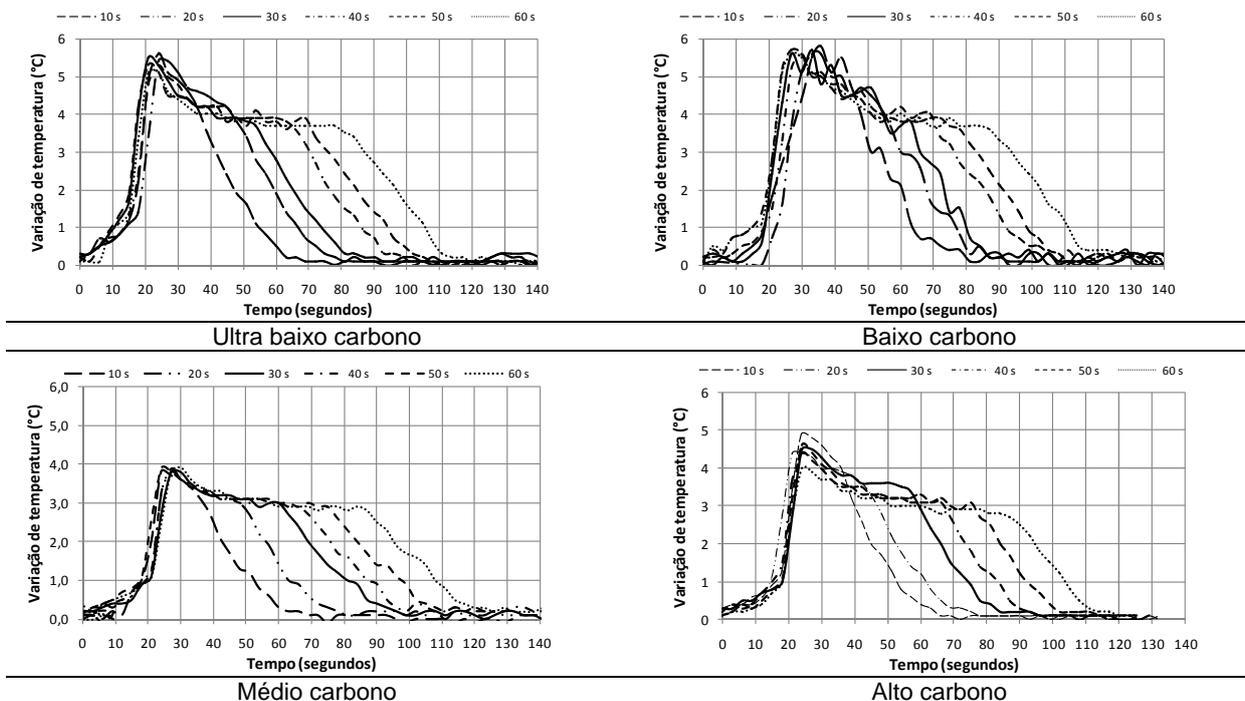


Figura 5. Variação da temperatura da água de refrigeração do amostrador com o tempo.

Na Figura 5, os primeiros 20 segundos indicam o tempo de decida do amostrador até atingir o seu curso final. A partir deste momento inicia-se a contagem do tempo de imersão, representado pelo patamar de variação de temperaturas. Durante a remoção do amostrador do banho, a vazão de água é colocada no máximo da linha para forçar o resfriamento e não permitir qualquer transformação física no filme de pó fluxante amostrado. Entretanto, leva-se um tempo para que o sistema volte à temperatura ambiente, motivo pelo qual se observa o comportamento de queda da variação logo após o patamar mostrado na Figura 5.

Antes de cada teste foi realizada a medição da temperatura do pó fluxante líquido. A Figura 6 apresenta as temperaturas medidas para cada teste e a



interferência das temperaturas na variação da temperatura da água de refrigeração.

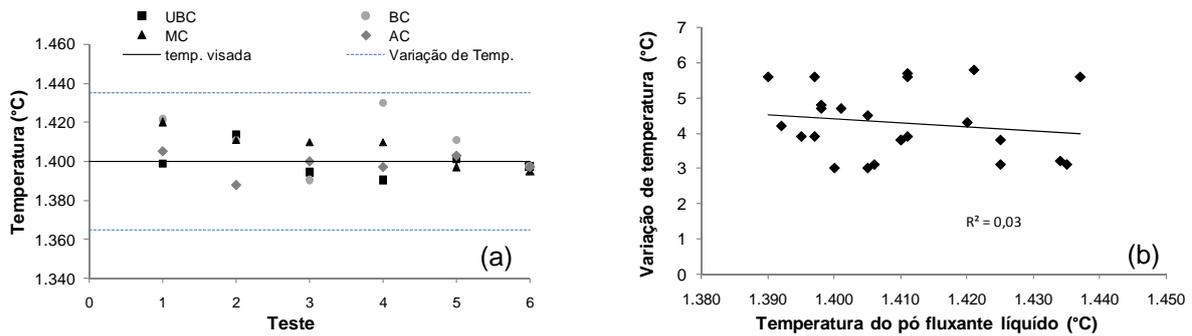


Figura 6. Variação da temperatura do pó fluxante líquido durante os testes (a) e variação da temperatura da água de refrigeração com a temperatura do pó fluxante líquido (b).

Conforme a Figura 6 (a), a temperatura do pó fluxante líquido antes de cada teste variou em torno de 35°C do valor visado, 1.400°C. As variações mais significativas ocorreram para valores superiores ao visado. Observando a figura 6 (b), verifica-se que não existe correlação entre a temperatura do pó fluxante líquido e a variação da temperatura da água de refrigeração do amostrador. Neste caso, entende-se que a variação pode ser considerada satisfatória.

Os filmes de pó fluxante obtidos tiveram sua espessura medida. Os valores médios da espessura do filme solidificado em função do tempo de imersão são apresentados na Figura 7.

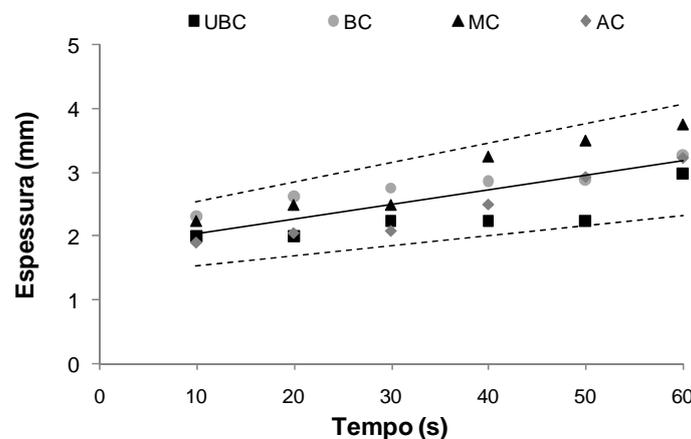


Figura 7. Variação da espessura solidificada dos filmes com o tempo de imersão.

A espessura dos filmes solidificados evolui com o tempo de imersão, conforme visto na Figura 7. Na média, as espessuras variam de 2,0 mm, aos 10 segundos de imersão, para 3,4 mm, no tempo de 60 segundos.

Com base na equação (2), utilizando os valores máximos do pico da análise térmica diferencial para cada amostra, calculou-se o percentual de fases cristalinas nas amostras para cada tempo de solidificação. A Tabela 3 apresenta os resultados.



Tabela 3. Percentual cristalizado em função do pico máximo de análise térmica

Tempo (s)	UBC		BC		MC		AC	
	(δT) _P	%						
vítrea	60,3	0,0	52,0	0,0	60,0	0,0	76,8	0,0
10	53,2	11,8	50,7	2,5	41,6	30,6	69,5	9,4
20	49,0	18,7	49,5	4,8	34,8	41,9	57,7	24,9
30	42,7	29,2	42,3	18,6	30,9	48,6	49,9	34,9
40	49,1	18,6	38,6	25,7	16,1	73,2	46,0	40,1
50	50,8	15,9	36,0	30,8	15,2	74,7	31,3	59,2
60	56,3	6,7	46,8	10,0	8,1	86,5	27,4	64,4
Média		16,8		15,4		59,3		38,8

Para melhor compreensão das fases formadas e da evolução da cristalinidade dos filmes de pó fluxante eles foram avaliados via difração de raios-X. Um exemplo de espectro de difração de raios-X é apresentado na Figura 8.

Conforme Figura 8, na medida em que o tempo de amostragem aumenta ocorre o aparecimento da fase cristalina e o aumento na intensidade do pico característico destas fases. Isto indica que há um aumento da cristalinidade dos filmes de pó fluxante com o tempo de imersão do amostrador. Nas amostras analisadas a fase presente é a cuspidina ($3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot CaF_2$), fase cristalina tipicamente encontrada em filmes de pós fluxantes contendo flúor.

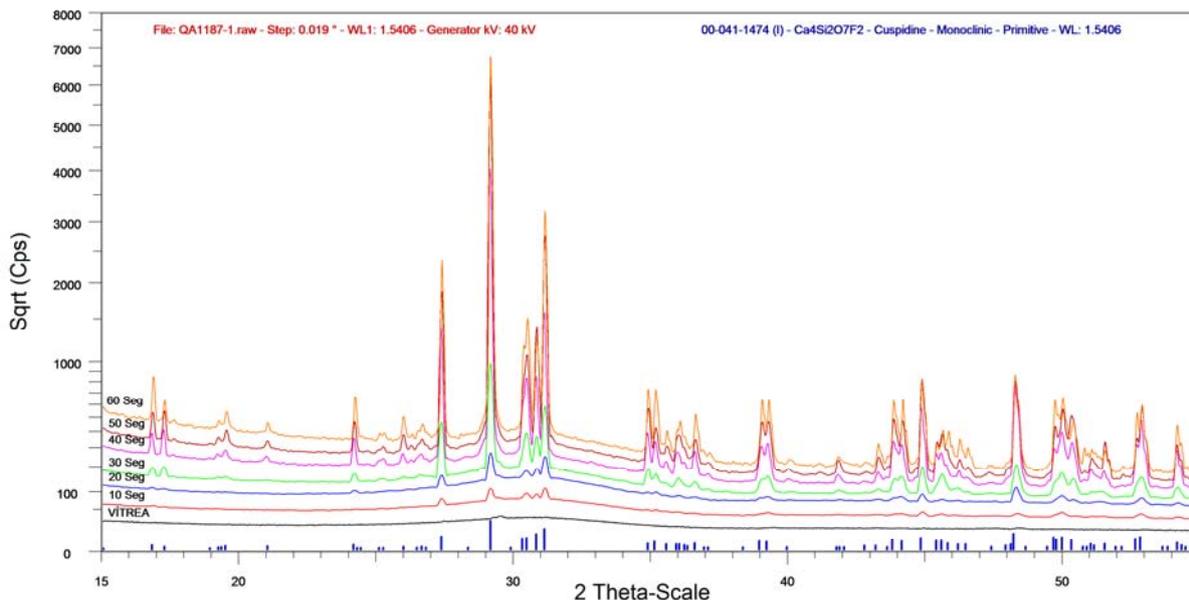


Figura 8. Espectro de difração de raios-X para filmes de pó fluxante solidificado - pó fluxante MC.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para interpretar os aspectos referentes a transferência de calor, é necessário, inicialmente, fazer uma interpretação das curvas de variação de temperatura da água de refrigeração do amostrador com o tempo de imersão. A Figura 5 mostra que as curvas de variação da temperatura da água de refrigeração do amostrador apresentam características semelhantes. Em todos os casos, nos primeiros 10 segundos de imersão, é observado um máximo de variação de temperatura que, conseqüentemente, gera um máximo de extração de calor. Com o tempo a variação de temperatura vai reduzindo até se estabilizar na forma de um patamar definido.



Esta característica está fortemente ligada às características de cristalização dos filmes de pó fluxante. Nos primeiros instantes de imersão do amostrador o pó fluxante irá sofrer um resfriamento brusco, devido à baixa temperatura da parede de cobre do amostrador. Este resfriamento brusco irá favorecer a formação de um filme de pó fluxante com aspecto vítreo. Os pós fluxantes vítreos tendem a permitir uma maior extração de calor, pois permitem a transferência pelo mecanismo de radiação.

Com o passar do tempo, ocorre a nucleação e o crescimento de fases cristalinas que irão inibir o fluxo de calor por radiação. Assim, as temperaturas medidas do sistema tendem a se estabilizar em valores mais baixos. Esta explicação se sustenta pelas características dos filmes de pó fluxante, pois foi observado, por meio da análise térmica diferencial e difração de raios-X, que as amostras apresentam menor grau de cristalinidade nos primeiros segundos de teste.

Para melhor interpretação dos resultados, utilizou-se os valores da variação da temperatura da água de refrigeração, medidos nos testes piloto, para calcular o fluxo de calor total, conforme a equação (5). Para avaliar a extração de calor foram utilizados os valores médios de temperatura do patamar. A Figura 9 apresenta os valores do fluxo de calor global calculado em função da temperatura média obtida durante os testes de solidificação/cristalização e a média global do fluxo de calor obtido em todos os testes realizados.

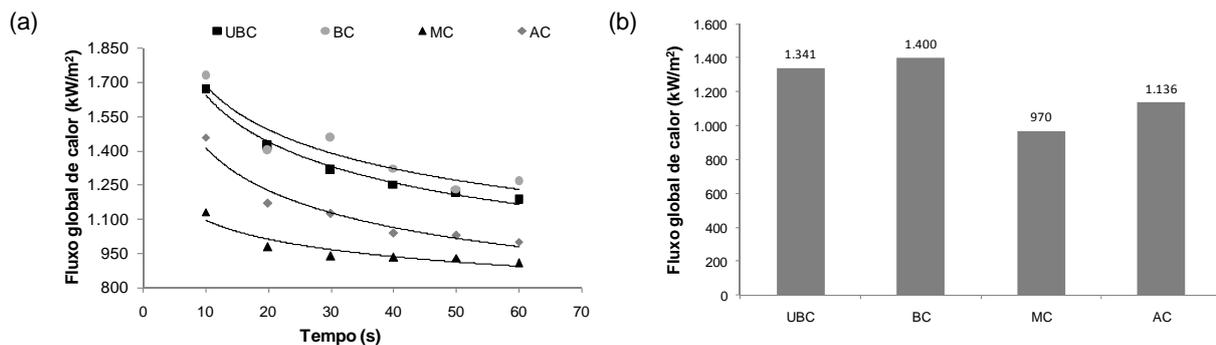


Figura 9. Fluxo global de calor calculado (a). Média do fluxo de calor global calculado (b).

A Figura 9 mostra como varia a extração de calor durante o tempo de imersão do amostrador. De maneira geral, nos primeiros 10 segundos de imersão ocorre uma extração de calor mais intensa com posterior redução à medida que se aumenta o tempo de imersão. Este fato replica a observação feita com relação à variação da temperatura da água de refrigeração do sistema (Figura 5).

Ainda, conforme Figura 9, o fluxo de calor é mais intenso para pós os fluxantes UBC e BC atingindo valores intermediários para o pó fluxante AC e o menor valor para o pó fluxante MC. Considerando a aplicação dos pós fluxantes, este resultado mostra que eles atuam na extração de calor conforme esperado. Aços com ultra baixo e baixo teores de carbono devem ser lingotados com fluxo de calor mais elevado, em contra partida, os demais devem ter a extração de moderada a baixa.

Ainda sob o ponto de vista de utilização, pode-se comparar os pós fluxantes UBC e BC. Estes pós podem ser considerados, em termos de fluxo de calor, semelhantes. Na verdade os filmes formados a partir destes insumos apresentam espessura e grau de cristalinidade parecidas. Nesta ótica, infere-se que o pó fluxante UBC pode ser utilizado para o lingotamento de aços BC, no que compete o fluxo de calor. O contrário não é verdadeiro devido aos teores de carbono do pó fluxante BC ser mais elevado, o que pode contaminar os aços UBC.

A Tabela 4 apresenta um resumo dos valores do fluxo de calor e das



condições dos filmes solidificados obtidos nos testes piloto, bem como a cristalinidade média obtida na análise térmica diferencial.

Tabela 4. Resumo dos valores do fluxo de calor e das condições dos filmes solidificados

	UBC	BC	MC	AC
Fluxo de calor (KW/m ²)	1.341	1.400	970	1.136
Espessura média do filme (mm)	2,3	2,8	3,0	2,5
Cristalinidade ^(*) (%)	17	15,4	60	41
Temperaturas na ATD (°C)	710	707	700	680
Temperatura de Cristalização (°C)	1.117	1.128	1.200	1.097

(*) Média do percentual de fases cristalinas dos filmes obtidos nos tempos de inserção de 10 a 60 segundos (Tabela 3).

Além de avaliar comparativamente os pós fluxantes estudados é necessário compreender como as propriedades deste insumo afetam o fluxo de calor no molde. Neste sentido, foram feitas algumas correlações a partir dos dados apresentados na Tabela 4. A Figura 10 apresenta a variação do fluxo de calor em função da basicidade (CaO/SiO₂) e da temperatura de cristalização de cada pó fluxante.

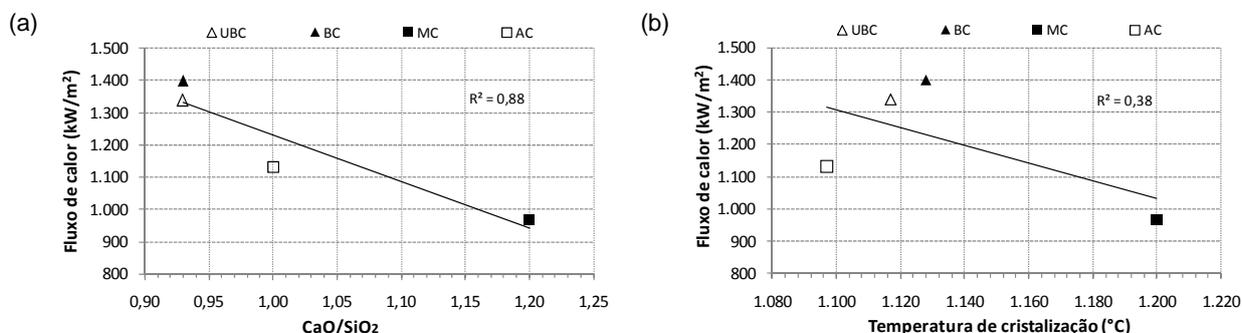


Figura 10. Variação do fluxo de calor com a basicidade (a) e com a temperatura de cristalização (b).

Conforme Figura 10 (a), a composição química do pó fluxante tem uma relação importante com a extração de calor. Com o aumento da basicidade ocorre uma redução significativa no fluxo de calor global. Entretanto, a temperatura de cristalização calculada não apresenta uma correlação aceitável com o fluxo de calor, conforme Figura 10 (b). Em alguns casos o cálculo da temperatura de cristalização não leva em conta todos os elementos que constituem o pó fluxante.

Como se entende que o grau de cristalização dos filmes de pó fluxante é um fator chave para a extração de calor no molde, traçou-se a relação entre a variação do fluxo de calor e a cristalinidade do filme, conforme Figura 11.

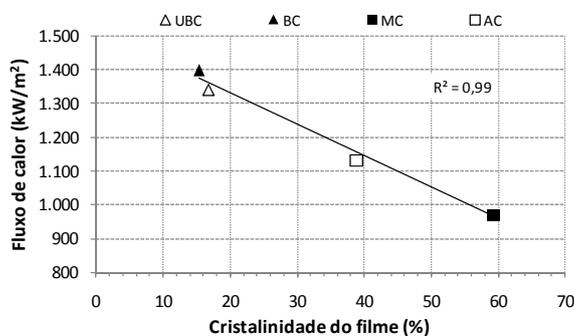


Figura 11. Variação do fluxo de calor em função da cristalinidade do filme de pó fluxante solidificado.

A Figura 11 mostra que a cristalinidade do filme de pó fluxante apresenta uma forte correlação com o fluxo de calor. Com o aumento do percentual de fases



cristalinas no filme solidificado ocorre a redução no fluxo de calor global.

Intuitivamente, entende-se que a temperatura de cristalização é uma propriedade que está diretamente ligada à condição de cristalinidade do filme de pó fluxante solidificado. Para avaliar esta relação, a Figura 12 apresenta a variação da cristalinidade do filme de pó fluxante com a temperatura de cristalização e com a basicidade do fluxante.

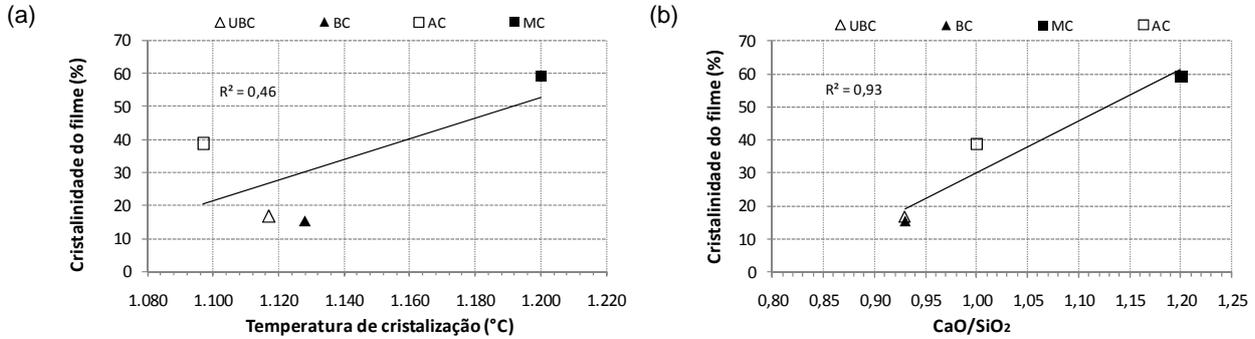


Figura 12. Variação da cristalinidade do filme de pó fluxante solidificado em função da temperatura de cristalização (a) e em função da basicidade do fluxante (b).

Com base nas informações apresentadas na Figura 12, pode-se afirmar que as temperaturas de cristalização avaliadas por meio de modelos empíricos não são uma aproximação correta do grau de cristalinidade dos filmes de pó fluxante, devido à baixa correlação. Em contra partida, a relação CaO/SiO_2 apresenta correlação com o percentual de fases cristalinas formadas nos filmes de pó fluxante.

De fato, a cristalização dos pós fluxantes irá depender das condições termodinâmicas, fortemente influenciadas pela composição química e pelas condições cinéticas, diretamente relacionadas com a extração de calor. As temperaturas de cristalização, obtidas em condições laboratoriais, são medidas a taxas de resfriamento da ordem de $10^\circ C/min$ a $60^\circ C/min$. No lingotamento contínuo as taxas de resfriamento são em torno de $600^\circ C/min$ no molde. Estas diferenças são definitivas na cinética de formação dos filmes de pó fluxante solidificados.

Conforme proposto, a Figura 13 apresenta a variação da resistência térmica total ao fluxo de calor em função do tempo de imersão em cada teste piloto.

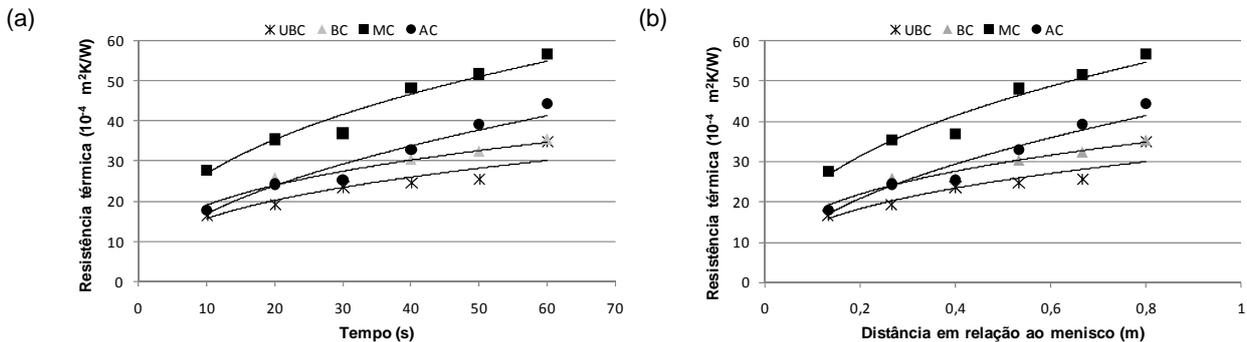


Figura 13. Variação da resistência térmica ao fluxo de calor em função do tempo (a) e da distância em relação ao menisco (b).

A Figura 13 (a) mostra que a resistência térmica exercida pelo pó fluxante aumenta com o tempo. Seguindo a tendência observada, a menor variação de resistência ocorre com o pó fluxante UBC e a maior ocorre para o pó fluxante MC. Como não há alterações significativas entre as temperaturas do pó fluxante líquido,



medidas antes de cada teste, e a espessura dos filmes formados, entende-se que este efeito seja um efeito direto da evolução do grau de cristalização dos filmes.

De maneira a se fazer uma analogia ao fluxo de calor no molde real de lingotamento contínuo, pode-se considerar que os tempos de imersão da lança de 10 a 60 segundos referem-se a uma posição em relação ao menisco. Considerando que o filme de pó fluxante acompanhe o tempo de residência da placa no interior do molde, para um molde de 800 mm e uma velocidade de lingotamento de 0,8 m/min, redesenhou-se outra figura considerando as resistências térmicas em função da distância em relação ao menisco. A Figura 13 (b) apresenta estes resultados. Os valores calculados neste trabalho podem ser uma referência para o aprimoramento de modelos de transferência de calor e solidificação.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, foi possível avaliar o comportamento de cristalização dos pós fluxantes e a interferência desse fenômeno na transferência de calor. Considerando a indicação de aplicação, os pós fluxantes atuam no controle da extração de calor conforme esperado. Pós fluxantes destinados ao lingotamento de aços UBC e BC apresentaram menor resistência ao fluxo térmico, propiciando taxas de extração de calor mais elevadas. Em contra partida, os demais pós fluxantes propiciaram taxas de extração de calor de moderada a baixa.

Ainda sob o ponto de vista de utilização, foi possível comparar os pós fluxantes UBC e BC. Estes pós podem ser considerados, em termos de extração de calor, semelhantes. Nesta ótica, infere-se que o pó fluxante UBC pode ser utilizado para o lingotamento de aços BC, no que compete o fluxo de calor. O contrário não é verdadeiro devido ao teor de carbono do pó fluxante BC ser mais elevado, o que pode contaminar os aços UBC. Neste sentido, a composição do pó fluxante UBC estudado pode ser considerada multiuso. Isto pode levar ganhos de escala na produção do fluxante, melhor organização da área operacional e menor possibilidade de erros devido à troca de insumos durante a operação.

Observou-se também que o maior grau de cristalização refere-se ao pó fluxante indicado para aços MC, fator importante para a redução da transferência de calor na interface placa/molde e garantia da boa qualidade superficial deste produto.

Com relação às propriedades físicas dos pós fluxantes, não se observou correlação entre a temperatura de cristalização e o fluxo de calor no processo piloto de lingotamento contínuo. Entretanto, o grau de cristalização do filme de pó fluxante apresentou uma correlação direta com a extração de calor. Com o aumento da cristalinidade dos filmes ocorre uma redução significativa na quantidade de calor removido nos testes de solidificação/cristalização piloto.

Com base nas propriedades dos pós fluxantes, pode-se afirmar que as temperaturas de cristalização, avaliadas por meio de modelos empíricos ou ensaios de laboratório em situação de baixa taxa de resfriamento, não refletem corretamente o grau de cristalinidade dos filmes de pó fluxante. Neste caso, mais importante que conhecer a temperatura de cristalização é avaliar o potencial de cristalização dos filmes em situações reais de solidificação.

REFERÊNCIAS

- 1 BADRI, A.; et alli. A mold simulator for continuous casting of steel: Part 1 – The development of a simulator. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 36B, junho, 2005. p.355-371.



42º Seminário de Aciaria Internacional

42nd Steelmaking Seminar - International

15 a 18 de maio de 2011 / May 15th - 18th, 2011



- 2 NATARAJAN, T.T.; et alli. Mold simulator: a tool to study initial solidification. In: **Aist. Iron and Steel Technology Conference, 2004**, Nashville. Proceedings. Warrendale: Association for Iron and Steel Technology. 2004. v.2. 1013-1025 p.
- 3 RIBOUD, P.V.; LARRECQ, M. Lubrication and heat transfer. In: **Continuous Casting Mould. Steelmaking Proceedings**, ISS-AIME, vol. 62, 1979, pp. 78-87.
- 4 OLIVEIRA, L. J. S. **Comportamento dos aços peritéticos durante a solidificação no molde de lingotamento contínuo**. 2009. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2009.
- 5 OLIVEIRA, L. J. S.; et alli. Comportamento de cristalização dos filmes de pós fluxantes no molde de lingotamento contínuo. In: **41º Seminário de Aciaria – Internacional**. Brasil: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, Resende, RJ, 2010.
- 6 FOKIN, V. M.; ZANOTTO, E. D.; YURITSYN, N. S.; SCHMELZER, J. W. P.. Homogeneous crystal nucleation in silicate glasses: a 40 years perspective. **Journal of Non-Crystalline Solids**, 352 (2006) 2681-2714p.
- 7 SARASWAT R.; et alli. The effect of mould flux properties on thermo-mechanical behaviour during billet continuous casting. **ISIJ International**, Vol. 47 (2007), No. 1, pp. 95–104