

AVALIAÇÃO DA TAXA DE FUSÃO DE FLUXANTES PARA LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE AÇOS ⁽¹⁾

Maria Carolina Campello Bezerra⁽²⁾
Cláudio Antônio Goulart Valadares⁽³⁾
José Deodoro Trani Capocchi⁽⁴⁾

Resumo

Para a garantia de um bom desempenho dos fluxantes para lingotamento contínuo de aços no molde, a avaliação da taxa de fusão é uma importante ferramenta, já que, se adequada, colabora para a disponibilidade de escória líquida suficiente para alimentar o intervalo existente entre a placa de aço em solidificação e o molde, garantindo a perfeita lubrificação. Neste trabalho é demonstrada uma nova concepção de forno elétrico no qual são colocados dois cadinhos vazados contendo fluxante *in natura*. Um dos cadinhos é utilizado para avaliação da amostra de referência. O desenvolvimento das reações de fusão do fluxante com o aumento da temperatura resulta em uma escória que, em função de sua fluidez, gera o escorrimento da massa fundida a uma taxa característica, a qual é registrada em um gráfico de massa x temperatura. Desta forma, conhecendo-se o desempenho do fluxante considerado referência na máquina de lingotamento contínuo, é demonstrada a eficiência do uso deste equipamento para avaliação da taxa de fusão, a influência da fonte e teor de carbono, possibilitando a avaliação de diferentes alternativas de composição para aplicação, quando houver variação em qualquer parâmetro da máquina de lingotamento contínuo que ocasione interferência na taxa de fusão dos fluxantes.

Palavras-chave: Fluxante, Velocidade de Fusão e Lingotamento Contínuo.

(1) *Contribuição Técnica a ser apresentada no XXXVI Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais – 16 a 18 de maio de 2005 – Vitória ES.*

(2) *Técnica em Cerâmica, Engenheira de Produção Química, Gerente de Produto da Carbox Resende Química Ind Com Ltda. Mestranda do Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.*

(3) *M.Sc, CQE/ASQ, Engenheiro Metalurgista, Diretor Técnico da Carbox Resende Química Ind Com Ltda*

(4) *Professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.*

1 INTRODUÇÃO

Desde a década de 1960, os fluxantes são utilizados para lingotamento contínuo de aços, com o objetivo principal de lubrificar a interface existente entre a pele do aço em solidificação e o molde, além de controlar a taxa de transferência de calor através do filme de escória do fluxante posicionado nesta interface, proporcionar isolamento térmico, prevenção de oxidação da superfície do aço e absorção de inclusões. A Figura 1 ilustra as principais funções do fluxante no molde durante a solidificação do aço.

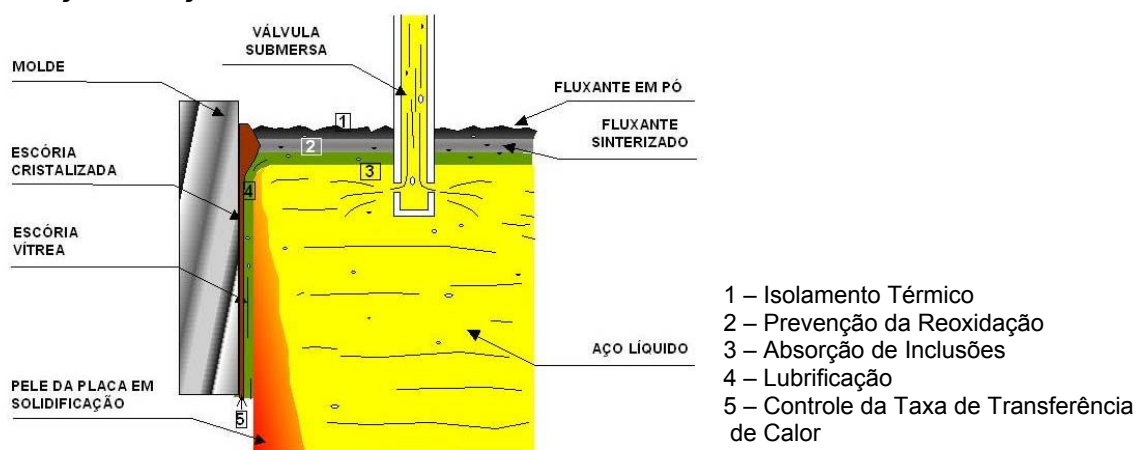


Figura 1. Funções do Fluxante no Lingotamento Contínuo de Aços⁽¹⁾

Quando o fluxante *in natura* é adicionado sobre o aço líquido no molde, o mesmo é aquecido até a temperatura em que há o início da geração das reações de fusão do mesmo⁽²⁾ gerando a formação de uma piscina de escória líquida, a qual deve ser suficiente para alimentar o intervalo existente entre a pele do aço em solidificação e o molde, garantindo a lubrificação.

O controle da taxa de fusão determina a habilidade do fluxante em manter uma piscina de escória líquida com uma espessura estável no molde sob condições adversas de lingotamento.⁽³⁾ Sob condições instáveis como durante a partida de máquina, a variação de velocidade de lingotamento ou a troca de tubo submerso, o fluxante deve rapidamente fornecer novo líquido para lubrificação.

A velocidade de fusão depende da composição do fluxante, ponto de fusão, tamanho e forma do grão, do tipo e quantidade de carbono adicionado, e da presença de agentes exotérmicos no fluxante.^(3, 4)

O carbono livre utilizado na formulação do fluxante controla a taxa de fusão, pois suas partículas mantêm separadas as partículas das outras matérias-primas, atuando como uma barreira, reduzindo assim a sua sinterização e, por consequência, a taxa de fusão, como mostra a Figura 2.

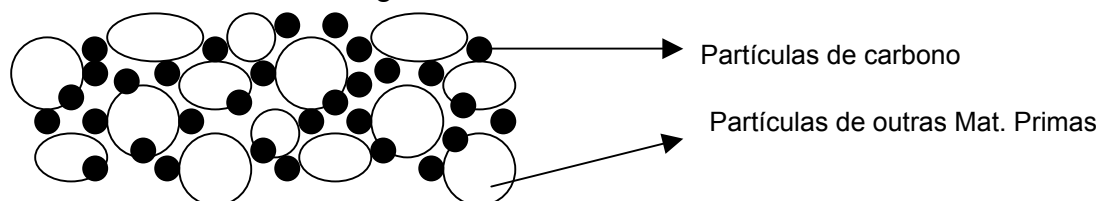


Figura 2. Diagrama esquemático de grãos de fluxante separados por partículas de carbono

Quanto ao tipo de carbono, dois parâmetros são importantes, a saber: a distribuição do tamanho de grãos e a temperatura de combustão.⁽²⁾

Vários testes têm sido desenvolvidos para simular a avaliação da taxa de fusão do fluxante no molde de lingotamento contínuo. Dentre os testes citados na literatura, destaca-se a avaliação da taxa de fusão do fluxante através da verificação visual das reações de fusão e do tempo de fusão do fluxante submetido a um aquecimento a elevada temperatura quando posicionado em navículas de porcelana. A Figura 3 ilustra este ensaio, no qual mede-se a distancia do corrimento do líquido formado na navícula em função do tempo.

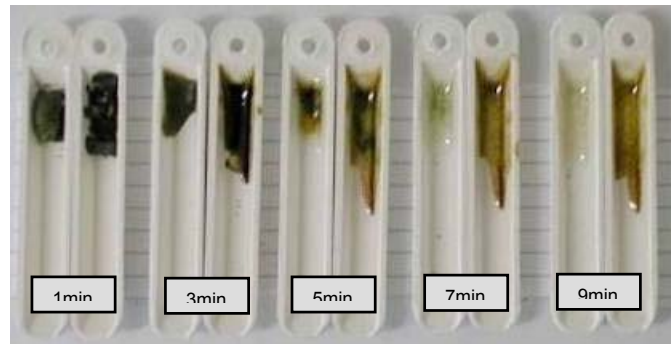


Figura 3. Ensaio de Navículas para Avaliação da Velocidade de Fusão

Kawamoto et al.⁽⁵⁾ determinaram a taxa de fusão, utilizando o aparelho ilustrado na Figura 4. A taxa de fusão é avaliada através de medida da variação da profundidade da escória líquida no decorrer do tempo. O ensaio requer 1 t de aço líquido. Este teste é considerado um dos mais representativos, porém, é um teste caro e que requer longo tempo para execução.⁽⁴⁾

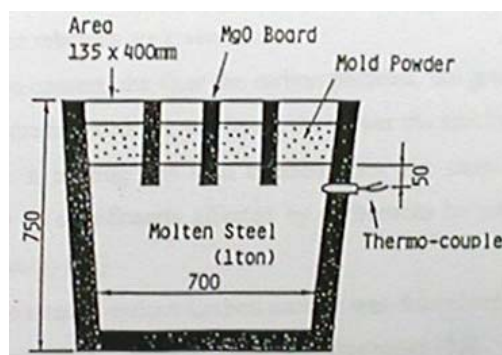


Figura 4. Diagrama esquemático do aparelho desenvolvido por Kawamoto et al. utilizado para avaliar a taxa de fusão em fluxantes⁽⁴⁾

Com base no teste desenvolvido por Hasselstrom,⁽⁶⁾ foi desenvolvido um equipamento para avaliação da velocidade de fusão em escórias, onde a amostra sólida é colocada no interior de um cadinho afunilado, com furo na parte inferior, e que é aquecida a altas temperaturas, controlando-se a taxa de aquecimento. O cadinho com a amostra fica suspenso em uma célula de carga. À medida que ocorre perda de massa, a célula de carga vai registrando os dados relacionando-os com a temperatura. Trata-se de um ensaio comparativo. O objetivo deste trabalho é apresentar o equipamento desenvolvido para avaliação da taxa de fusão de duas amostras simultaneamente, garantindo que ambas sejam submetidas às mesmas condições de ensaio.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi conduzido através da avaliação de uma base de fluxante sem carbono, utilizado para lingotamento de aço baixo carbono.

O equipamento utilizado consiste de um forno elétrico de resistência fabricado sob encomenda da Carbox, que contem doze elementos para aquecimento de carbeto de silício, posicionados seis de cada lado da câmara. Na parte externa e superior do forno, são posicionadas duas células de carga para controlar o peso de cada um dos cadinhos utilizados. Os cadinhos cerâmicos são suspensos por meio de hastes cerâmicas e pendentas da célula de carga. O termopar é posicionado entre os dois cadinhos. Os dados de temperatura e massa obtidos do termopar e da célula de carga, respectivamente, são transferidos para o sistema de aquisição de dados. O cadinho posicionado a esquerda refere-se ao Processo 1, e o cadinho posicionado a direita, ao Processo 2. A Figura 5 ilustra o equipamento.

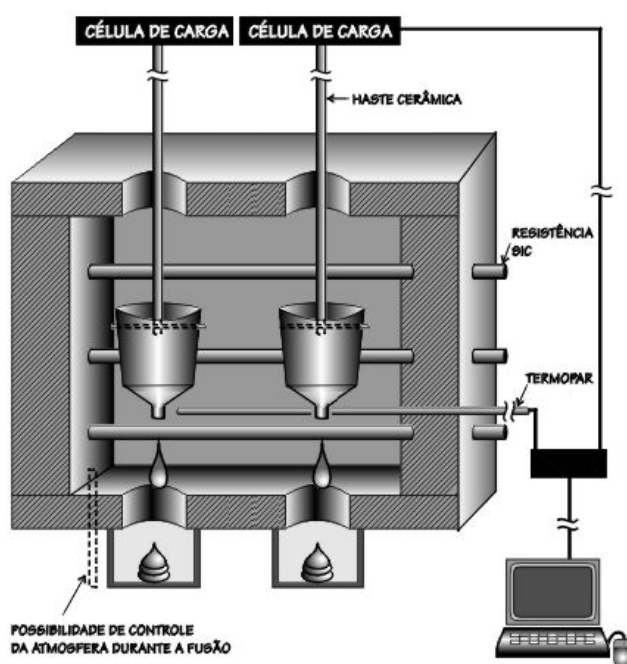


Figura 5. Diagrama esquemático do equipamento para avaliação da taxa de fusão

A massa das amostras colocadas dentro dos cadinhos é de 10 g. À medida em há o aumento da temperatura, os dados de perda de massa são registrados pela célula de carga. No momento em que o material começa a fundir, dá-se o gotejamento da amostra fundida. As gotas são coletadas em recipientes posicionados na parte externa e inferior do forno.

Para execução das avaliações, foi definido o seguinte regime de aquecimento: até a temperatura de 600°C, o forno é aquecido com a potência total das resistências e com a taxa de aquecimento de aproximadamente 100°C/min. A partir desta temperatura, a taxa de aquecimento é de 20°C/min.

Os cadinhos utilizados foram desenvolvidos especialmente para este ensaio. Trata-se de cadinho de porcelana, afunilado, com diâmetro externo superior de 32,0mm e diâmetro da extremidade inferior para vazamento de 5,0mm. A Figura 6 mostra (a) fotografia de cadinho e haste prontos para serem em suspensos a partir

da célula de carga; (b) a vista externa do forno; (c) vista interna do forno com os cadinhos.

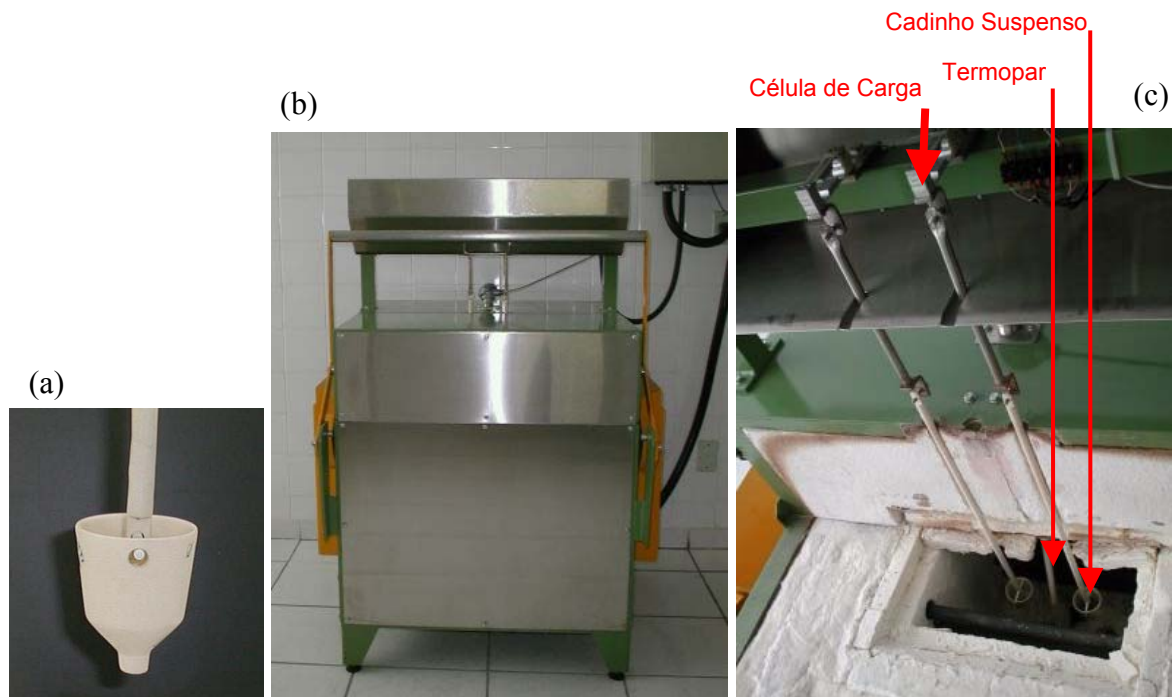


Figura 6. (a) Cadinho afunilado e haste, prontos para serem posicionados no forno; (b) Vista externa do forno, (c) Vista interna do forno com os cadinhos.

Um “software” específico para tratamento dos dados de temperatura e variação de massa foi desenvolvido de modo a facilitar a verificação da temperatura em que ocorre a primeira gota de material fundido, da temperatura em que ocorre o término da fusão e da taxa de escoamento do fluxo fundido. São gerados gráficos de massa (g) (ordenada) versus temperatura ($^{\circ}\text{C}$) (abscissa). A Figura 7 ilustra a tela típica de apresentação dos dados gerados no ensaio.

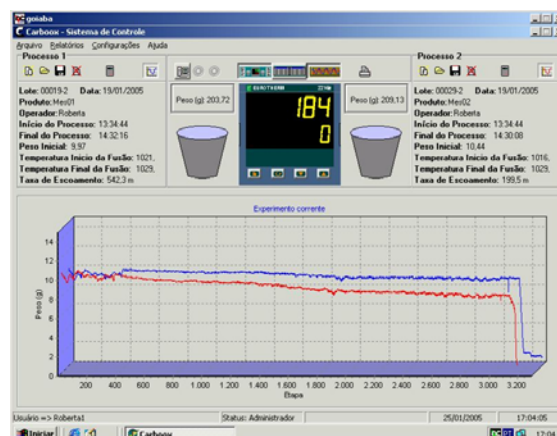


Figura 7. Exemplo da tela de apresentação dos resultados

A amostra considerada base neste ensaio, consiste de uma mistura de matérias-primas típicas para formulação de fluxante, a saber: carbonato de sódio (Na_2CO_3), fluorita, (CaF_2) e wollastonita, ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$).

A composição química da amostra base e suas principais propriedades estão descritas a seguir, na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química (porcentagem em massa), viscosidade e “break temperature” da amostra 1 (considerada base neste ensaio)

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	F ⁻	Fe ₂ O ₃	MgO	C livre	Ct	ppc(*)
34,0	24,5	4,3	11,80	0,15	8,60	1,09	7,17	0,0	1,98	8,44

(*) perda por calcinação

Obs.: O teor de carbono encontrado refere-se ao carbono proveniente de carbonato.

Viscosidade a 1300°C: 0,91Poise

“Break Temperature”: 971,7°C (temperatura na qual ocorre um aumento brusco da viscosidade durante o resfriamento).

A partir da composição acima, foi efetuada adição de carbono para avaliar a sua influência na taxa de fusão. As fontes de carbono utilizadas neste trabalho foram negro de fumo e coque de petróleo, cujas composições químicas estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2. Composição química (porcentagem em massa) das fontes de carbono utilizadas

	<i>Coque de Petróleo</i>	<i>Negro de Fumo</i>
Materiais Voláteis	3,39	2,63
Carbono Fixo	95,87	96,70
Cinzas	0,62	0,51

A Tabela 3 contem as composições preparadas para avaliação. Todas as composições foram preparadas através da pesagem de cada uma das matérias-primas, e posterior homogeneização a seco.

Tabela 3. Descrição das composições preparadas para avaliação

<i>Amostra</i>	<i>Descrição</i>	<i>Fonte de Carbono</i>
Amostra 2	Amostra 1 acrescida de 2% de carbono	Negro de Fumo
Amostra 3	Amostra 1 acrescida de 2% de carbono	Coque de Petróleo
Amostra 4	Amostra 1 acrescida de 4% de carbono	Negro de Fumo
Amostra 5	Amostra 1 acrescida de 4% de carbono	Coque de Petróleo
Amostra 6	Amostra 1 acrescida de 6% de carbono	Negro de Fumo
Amostra 7	Amostra 1 acrescida de 6% de carbono	Coque de Petróleo
Amostra 8	Amostra 1 acrescida de 8% de carbono	Negro de Fumo
Amostra 9	Amostra 1 acrescida de 8% de carbono	Coque de Petróleo

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Amostra 1, sem carbono, foi considerada referência neste projeto. Em todos os ensaios realizados, a mesma foi colocada no cadinho da esquerda (Processo 1). A Tabela 4, mostra as médias aritméticas e os respectivos desvios-padrão da temperatura inicial de gotejamento, da temperatura final de gotejamento e da taxa de escoamento de 10 ensaios feitos com a amostra padrão (Amostra 1).

Tabela 4. Resultados médios de 10 determinações obtidos na avaliação da Amostra 1.

	Temperatura Inicial (°C)	Temperatura Final (°C)	Taxa de Escoamento (mg/s)
Média aritmética	1035,8	1054,6	399,6
Desvio padrão	2,19	3,25	27,3

Após a avaliação dos resultados de média e desvio padrão, verifica-se que a variação encontrada permite efetuar a comparação com os resultados obtidos com as amostras preparadas com adição de carbono. Os resultados ainda demonstraram que o equipamento desenvolvido apresenta elevada repetitividade de resultados.

A Tabela 5 mostra os resultados obtidos com as amostras contendo carbono através do negro de fumo e a Tabela 6 mostra os resultados das amostras com adição de coque de petróleo.

Tabela 5. Resultados obtidos na avaliação das amostras com adições de carbono através de Negro de Fumo

Teor de Carbono (%)	Temperatura Inicial (°C)	Temperatura Final (°C)	Taxa de Escoamento (mg/s)
0 ^(*)	1035,8	1054,6	399,6
2	1099,0	1108,2	127,8
4	1091,4	1306,0	19,3
6	1066,7	1385,7	13,6
8	1081,1	1328,7	11,0

Tabela 6. Resultados obtidos na avaliação das amostras com adições de carbono através de Coque de Petróleo

Teor de Carbono (%)	Temperatura Inicial (°C)	Temperatura Final (°C)	Taxa de Escoamento (mg/s)
0 ^(*)	1035,8	1054,6	399,6
2	1040,2	1053,9	388,0
4	1067,3	1375,5	26,4
6	1097,5	1324,5	16,2
8	1094,1	1391,8	12,6

^(*) Os resultados obtidos com a amostra contendo 0% de carbono, referem-se aos resultados médios obtidos com a Amostra 1 (Tabela 4).

As Figuras 8 (a) e (b) mostram, respectivamente: (a) curva dos resultados contidos na Tabelas 5 e (b) curva dos resultados contidos na Tabela 6.

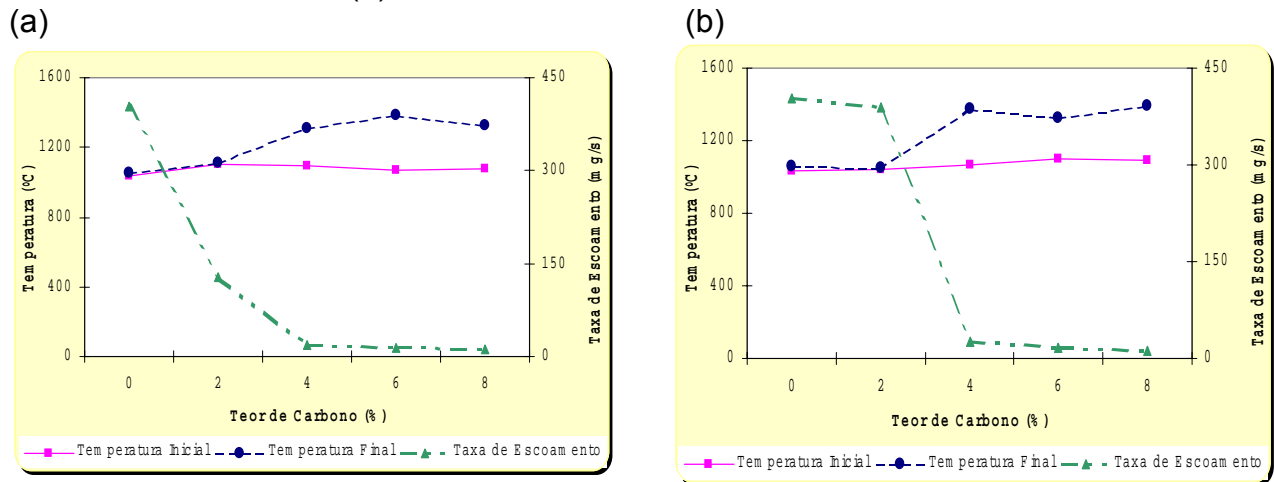


Figura 8. -Curvas mostrando os efeitos da adição de carbono obtidos com adição de carbono através do Negro de Fumo (a) e através do Coque(b)sobre a temperatura inicial de gotejamento, a temperatura final de gotejamento e sobre a taxa de escoamento.

A taxa de fusão avaliada neste estudo pelas temperaturas de início, fim de gotejamento e pela taxa de escoamento, foi gradativamente reduzida em virtude da adição de carbono tanto pelo coque quanto pelo negro de fumo, devido a função que o carbono possui em manter os grãos cobertos da mistura de fluxante atuando como uma barreira para a coalescência das gotículas formadas durante a liquefação do fluxo.

Pode-se perceber que, a adição de negro de fumo apresentou maior influência no retardamento desta taxa que a adição de coque, o que vem de encontro a estudos anteriores,^(5, 7) conforme demonstrado na Figura 9.

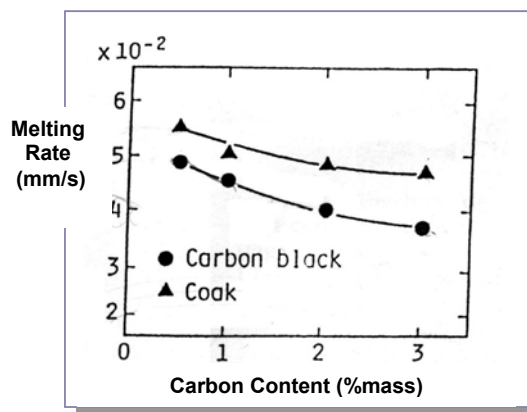


Figura 9. Efeito do teor de carbono na taxa de fusão⁽⁷⁾

O negro de fumo trata-se de uma material carbonáceo finamente dividido, produzido através da decomposição térmica controlada de hidrocarbonetos aromáticos. É muito utilizado na fabricação de borrachas e plásticos onde uma de suas vantagens é o excelente poder de tingimento.⁽⁸⁾

Para o caso dos fluxantes, esta característica é explorada de modo a garantir que os grãos dos materiais isentos de carbono sejam perfeitamente recobertos de modo a controlar de maneira mais efetiva a taxa de fusão.

Dependendo da aplicação do fluxante, uma mistura das fontes de carbono pode ser efetuada de modo a alcançar um comportamento específico.

4 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que o equipamento desenvolvido apresentou resultados satisfatórios para ser utilizado como uma ferramenta confiável para avaliação da taxa de fusão de fluxantes para lingotamento de aços.

A adição de carbono tanto proveniente do coque quanto do negro de fumo, refletiu na redução da taxa de fusão dos materiais.

Conforme esperado, a taxa de fusão das amostras contendo negro de fumo foi mais lenta que as amostras contendo coque de petróleo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 BRANION R.V. Mould flux for continuous casting. **Proceeding of Steelmaking Conference**, v.69, p. 95-106, 1986.
- 2 PINHEIRO, C.A.; SAMARASEKERA, I.V.; BRIMACOMBE, J.K. Mould flux for continuous casting of steel – Part X . **Iron and Steelmaker**, v. 22, n.7, p. 41-43, July 1995.
- 3 BRANION R.V. **Mould flux for continuous casting**. Course sponsored by ISS (Iron and Steel Society), King of Prussia, Pennsylvania, United States, published by ISS, October 1994.
- 4 MILLS, K. **Mold powder for continuous casting**. Course sponsored by IAS,(Instituto Argentino de Siderurgia), San Nicolas, Argentina, published by IAS, August 2003.
- 5 KAWAMOTO, M.; NAKAJIMA, K.; KANAZAWA, T.; NAKAI, K. Designs principles of mold fluxes for high speed continuous casting. **ISIJ International**, v. 34, n.7, p. 593-598, 1994.
- 6 HASSELSTROM, P.; LINDEFELT, H. On the formation of a lubricating film from mould powders used in continuous casting. In: IRON AND STEEL CONGRESS, 4., 1992, London. **Proceedings...** Sponsored by London: The Metals Society1992. p.23-31.
- 7 McDAVID, R.M.; THOMAS, B.G. Flow and thermal behavior of the top surface flux/powder layers in continuous casting molds. **Metallurgical and Materials Transaction B**, vl. 27B, n. 4, p. 672-685, Aug. 1996.
- 8 A PHELPS DODGE INDUSTRIES COMPANY. Disponível em: www.columbianchemicals.com.br/plastico.asp. Acesso em: 25 fev. 2005.

EVALUATION OF MELTING RATE OF MOULD FLUXES FOR CONTINUOUS CASTING OF STEEL⁽¹⁾

Maria Carolina Campello Bezerra⁽²⁾
Cláudio Antônio Goulart Valadares⁽³⁾
Jose Deodoro Trani Capocchi⁽⁴⁾

Abstract

In order to assure good performance of the mould flux for continuous casting of steel, the evaluation and control of melting rate is an important tool, since this property is related to the availability of liquid slag to fill in the gap between the solidified steel and the copper mould wall that assure a perfect lubrication. This paper presents an apparatus designed for testing the melting rate of mould fluxes it is an electric resistance furnace in which two perforated at the bottom crucibles contain flux samples *in natura*. One of the crucibles is used for the reference sample. As the temperature increases and the melting of the flux takes place liquid slag starts dropping from the crucible which is attached to a load cell. Weight losses and temperature are simultaneously recorded and a plot of mass (grams) versus temperature (degree Celsius) is produced. The effect of the carbon content of the flux mixtures on the melting rate has been investigated.

Key-words: Mould Flux, Melting Rate and Continuous Casting

-
- (1) Paper to be presented during the 36th Seminar on Melting, Refining and Solidification of Metals – May 16 to 18, 2005 – Vitória, ES.
 - (2) Ceramics technician, Bel. Chemical Engineering (Production), Manager of Products of Carbox Resende Química Ind Com Ltda., M.Sc. student of the Graduation Program of Metallurgical and Materials Engineering of the Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
 - (3) M.Sc, CQE/ASQ, Metallurgical Engineer, Technical Director of Carbox Resende Química Ind Com Ltda
 - (4) Full Professor of the Department of Metallurgical and Materials Engineering of the Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.