

SIMULAÇÃO EM LABORATÓRIO DA SOLIDIFICAÇÃO DOS AÇOS NO MOLDE DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO¹

Leonardo José Silva de Oliveira²
Roberto Parreiras Tavares³

Resumo

Neste estudo, foi desenvolvido um aparato laboratorial com o objetivo de estudar o comportamento dos aços peritéticos durante a solidificação inicial no molde de lingotamento contínuo visando ao entendimento dos mecanismos de formação da "pele" de aço e da transferência de calor. Este aparato é constituído por um amostrador de cobre refrigerado à água, onde a solidificação ocorre após a sua imersão no aço líquido, previamente fundido em forno de indução. Duas qualidades diferentes de aços foram avaliadas. Os testes de solidificação foram realizados utilizando-se diferentes vazões de água e pó fluxante. As amostras de aço e pó fluxante foram retiradas para avaliação química e metalográfica e a extração de calor total foi calculada pela vazão e diferença de temperatura da água de refrigeração. Os resultados permitiram verificar como o fluxo de calor e a camada de pó fluxante afetam a formação da "pele" de aço. O aparato desenvolvido mostrou-se eficiente e promissor na investigação das condições iniciais de solidificação no molde.

Palavras-chave: Lingotamento contínuo; Solidificação; Molde; Simulação

LABORATORY SIMULATION OF SOLIDIFICATION OF STEELS IN CONTINUOUS CASTING MOULDS

Abstract

In the present study, an experimental apparatus was built to promote the solidification of steel to study the behavior of the peritectic steel grades during the initial solidification in continuous casting mould aiming at understanding the mechanism of steel shell formation and heat transfer. This apparatus is composed of a water cooler copper pipe sampler, where indirect solidification of steel has been carried out, after its immersion in the liquid steel molten in an induction furnace. Two types of peritectic steel grades was evaluated. The solidification tests were carried out using several water flow rates using a mould powder. The steels and mould powders samples that were obtained in this test were analyzed using chemical and metallographic techniques. The total heat extraction was calculated, using the water flow and temperature difference between the outlet and the inlet. With these results, it was possible to understand how the heat transfer and the mould flux film affect the formation of the solidified shell. The apparatus developed proved to be an interesting tool to investigate the initial conditions of solidification in the mould.

Key words: Continuous casting; Initial solidification; Mould; Laboratory simulation.

¹ *Contribuição técnica ao 40º Seminário de Aciaria – Internacional, 24 a 27 de maio de 2009, São Paulo, SP, Brasil.*

² *Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Pesquisador do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.*

³ *Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, PhD; Professor Associado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da UFMG; Belo Horizonte, MG.*

1 INTRODUÇÃO

Um dos problemas do lingotamento contínuo dos aços é a formação de trincas superficiais. Este problema está relacionado principalmente à capacidade do aço suportar as deformações geradas ao longo do processo.

Conceitualmente, existem duas regiões na máquina de lingotamento que podem ser consideradas como críticas na formação de trincas superficiais, o molde e a região de encurvamento/desencurvamento da placa. Entretanto, acredita-se que os defeitos superficiais originem-se durante a formação da “pele” solidificada no molde e que eles se propaguem nas regiões inferiores da máquina. Por isso, a solidificação do aço no molde é importante para a qualidade superficial das placas.

Vários fatores têm um efeito significativo na formação de irregularidades superficiais no molde, dentre eles destaca-se o fluxo de calor. Um fluxo de calor homogêneo é fundamental para a qualidade superficial, principalmente nos aços peritéticos, que são mais susceptíveis à ocorrência de trincas.

Os aços peritéticos apresentam uma maior suscetibilidade à ocorrência de defeitos superficiais devido à formação de uma “pele” irregular no molde, que se dá pela tendência a uma acentuada contração logo após a transformação peritética, em função da diferença de densidade entre a ferrita delta e a austenita. Outro aspecto a ser considerado é o grau de plasticidade das fases na região da reação peritética. A austenita possui alta resistência e baixa plasticidade, se comparada com a ferrita delta. Isto significa que, durante a deformação, pode ocorrer a concentração preferencial de esforços em uma única fase, causando a trinca.⁽¹⁾ Assim, um fluxo de calor irregular durante a solidificação destes tipos de aço podem introduzir tensões de origem térmica, gerando trincas superficiais ou agravando as existentes.

O conhecimento do comportamento do aço nos estágios iniciais de solidificação no molde, principalmente dos aços peritéticos, pode auxiliar no ajuste das condições operacionais, como por exemplo, na determinação das características ideais de pós fluxantes e da condição de extração de calor, de modo a reduzir a ocorrência de defeitos superficiais nas placas geradas no processo.

Este trabalho aborda o desenvolvimento e a utilização de um aparato laboratorial para simular a solidificação do aço no molde de lingotamento contínuo visando estudar as características de solidificação destes aços nos primeiros estágios de formação da pele.

2 EXTRAÇÃO DE CALOR E A SOLIDIFICAÇÃO

A solidificação do aço é um resultado direto da extração de calor. Devido à sua importância para o processo de lingotamento contínuo, os mecanismos de remoção de calor têm sido amplamente estudados e modelados para a previsão tanto da temperatura quanto da espessura da camada de aço solidificada ao longo da máquina de lingotamento.

Nos estágios iniciais de solidificação, o fluxo de calor se dá pela diferença de temperatura entre o aço e a água de refrigeração do molde. Durante o processo, o calor percorre um caminho que começa no metal líquido e vai até a água de refrigeração, que tem um aumento de temperatura na sua passagem pelo molde (ΔT). Neste caminho, existem diversos mecanismos de transferência de calor, tais como: a convecção no aço líquido, a condução na camada sólida de aço formada, a radiação/condução/convecção na interface placa/molde, a condução na placa de cobre do molde e a convecção exercida pela água de refrigeração.

A Figura 1 apresenta um desenho do molde e uma distribuição esquemática de temperaturas em cada uma das suas regiões.

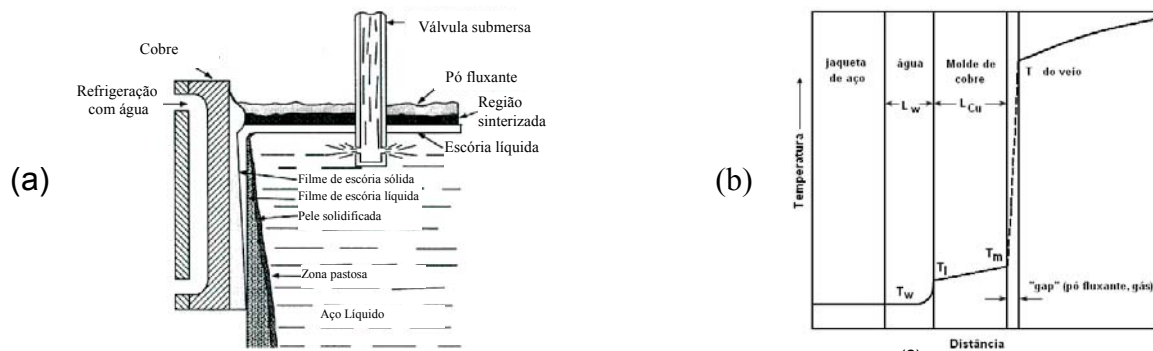


Figura 1 – (a) Desenho esquemático do molde de lingotamento contínuo⁽²⁾ e (b) da distribuição de temperatura, em um dado instante, desde o aço líquido até a água de refrigeração.⁽³⁾

Conforme Figura 1 (b), cada região do molde oferece uma resistência ao fluxo de calor, representada pelas variações de temperatura observadas ao longo do domínio. No molde de lingotamento contínuo, a primeira resistência térmica está associada à interface sólido/líquido. Nesta interface, o valor do coeficiente convectivo de transferência de calor (h) é da ordem de $10 \text{ kW/m}^2\text{K}$, para um superaquecimento de 30°C .⁽⁴⁾ Em seqüência, a “pele” de aço em solidificação apresenta-se como uma barreira crescente à remoção do calor, à medida que sua espessura aumenta a sua resistência à transferência de calor vai adquirindo uma influência cada vez maior sobre o fluxo global.

A formação do “gap” devido à contração do aço na solidificação é outra resistência à extração de calor no molde. Esta região é complexa, pois devido ao afastamento da “pele” de aço do molde, causado pela contração, e aos mecanismos de oscilação, ocorre a penetração do pó fluxante fundido nesta região.

O pó fluxante fundido, quando infiltra no “gap”, tende a se estratificar, formando camadas vítrea, cristalina e líquida. Isso porque, nesta região, ele estará submetido às baixas temperaturas do molde de cobre (temperatura de 180°C a 208°C) e às altas temperaturas da “pele” de aço (temperatura em torno de 1.350°C). Como o pó fluxante tem a característica de formar vidros, ele formará inicialmente uma fina camada vítrea nas proximidades do molde e uma camada líquida em contato com a placa. Com o tempo, as fases cristalinas irão nuclear no vidro e crescerão no líquido.⁽⁵⁾ A Figura 2 mostra uma representação esquemática do mecanismo de cristalização do pó fluxante e uma micrografia de um filme de pó fluxante obtido na interface placa/molde ao final do lingotamento.

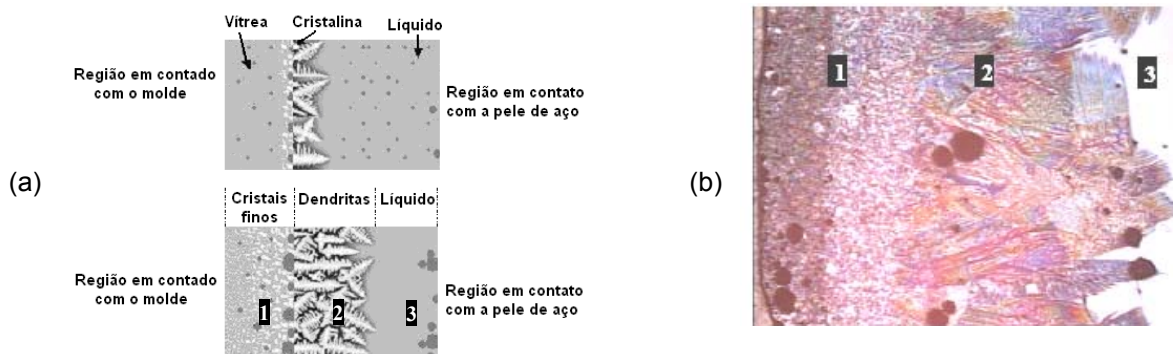


Figura 2 – (a) Ilustração do mecanismo de cristalização dos pós fluxantes na interface placa/molde⁽⁵⁾ e (b) micrografia de um filme de pó solidificado retirado no molde de lingotamento contínuo.⁽²⁾

Desta forma, o “gap” pode ser subdividido em diversas resistências térmicas, que serão representadas pelas fases dos pós fluxantes e pelo próprio vazio. As resistências associadas a esta região são descritas conforme equação 1.

$$R_{total}^{gap} = R_{Cu/sol} + R_{gl} + R_{cris} + R_{liq} \quad \therefore \quad R_{total}^{gap} = R_{Cu/sol} + (d/k)_{gl} + (d/k)_{cris} + (d/k)_{liq} \quad (1)$$

Na equação 1, a resistência da interface entre a placa de cobre do molde e a camada de fluxante é representada por $R_{Cu/sol}$, as letras d e k são as espessura e a condutividade térmica das camadas vítrea (representada pelo índice gl), cristalina (representada pelo índice $cris$) e líquida (representada pelo índice liq), respectivamente.

As últimas resistências estão associadas à placa de cobre do molde e à remoção de calor por convecção pela água de refrigeração. A primeira está relacionada com a espessura e com a condutividade térmica da placa de cobre. A segunda depende de aspectos do escoamento no interior do molde.

A Tabela 1 apresenta a magnitude das resistências térmicas nos diferentes domínios do lingotamento contínuo apresentadas por Schwerdtfeger.⁽⁶⁾

Tabela 1 – Magnitude das resistências térmicas à transferência de calor dos diferentes domínios entre o aço e a superfície fria da placa de cobre do molde no lingotamento contínuo⁽⁶⁾

Região	Dados Físicos	R, m ² kW ⁻¹	% do total
Água do molde	L = 5,0 mm, V _{água} = 10,0 ms ⁻¹ , T = 25°C	3,15 x 10 ⁻⁵	0,45
Placa de cobre	L _{Cu} = 15,0 mm, λ _{Cu} = 3,8 Wm ⁻¹ K ⁻¹	3,98 x 10 ⁻⁵	0,57
Pó fluxante	D _{flux} = 1,0 mm, λ _{sys} = 1,0 Wm ⁻¹ K	100,00 x 10 ⁻⁵	14,23
“Gas gap”	D _{gap} = 0,6 mm, T ₀ = 1200°C, T _m = 78°C	590,00 x 10 ⁻⁵	83,96
Recobrimento de níquel	D _{coat} = 5,0 mm, λ _{Ni} = 90,0 Wm ⁻¹ K ⁻¹	5,55 x 10 ⁻⁵	0,79
Total		7,03 x 10 ⁻³	100

Com relação às resistências térmicas, apresentadas na Tabela 1, a formação do filme de pó fluxante e do “gap” oferece a maior resistência ao fluxo de calor. Elas representam juntas mais de 98% da resistência total. Logo, a otimização do “gap” e do pó fluxante podem ser um diferencial na melhoria da qualidade do aço no processo de lingotamento contínuo.

Diversas variáveis influenciam a extração de calor e, conseqüentemente, a solidificação no molde, dentre elas estão os parâmetros operacionais (o superaquecimento, escoamento no molde devido à configuração da válvula submersa, lubrificação e projeto do molde) e a própria composição química do aço. No caso da formação da “pele” solidificada, uma espessura mínima é necessária na saída do molde para suportar a pressão ferrostática. Teoricamente, a espessura da “pele” solidificada na saída do molde é proporcional ao tempo de residência do aço em seu interior e à quantidade de calor extraído.

3 METODOLOGIA

Apesar da grande importância do início da solidificação do aço no molde é difícil avaliar esta etapa do processo, pois a interface placa/molde não é acessível e também 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 aparatos laboratoriais para a simulação das etapas iniciais de solidificação. Estes

aparatos laboratoriais podem ser de diferentes tipos, tais como: de imersão (“dip test”), moldes estáticos ou, até mesmo, máquinas de lingotamento piloto.^(7,8)

A maioria dos estudos realizados com equipamentos laboratoriais tem como objetivo avaliar os efeitos de parâmetros operacionais na qualidade do produto do lingotamento e no fluxo de calor. Contudo, vale ressaltar que, estes equipamentos, usados geralmente para a determinação e avaliação de fenômenos fundamentais do processo, não são simuladores reais, tendo em vista que não conseguem reproduzir a natureza dinâmica do processo de lingotamento.^(7,8)

Neste estudo, o comportamento dos aços durante a solidificação foi simulado em laboratório utilizando um aparato especialmente desenvolvido.

O aparato foi construído utilizando um tubo de cobre refrigerado à água que é imerso no aço previamente fundido em um forno de indução sob atmosfera inerte. A solidificação do aço ocorre ao redor do tubo refrigerado que, além de remover o calor e promover a solidificação, é responsável pela amostragem da “pele” solidificada. O aparato, foi equipado com um medidor de vazão, para medir a vazão de alimentação de água no sistema, e termopares, para medirem a temperatura de entrada e saída da água (ΔT da água). Estes valores foram utilizados para o cálculo do fluxo de calor durante a solidificação. A Figura 3 apresenta um desenho esquemático do sistema desenvolvido.

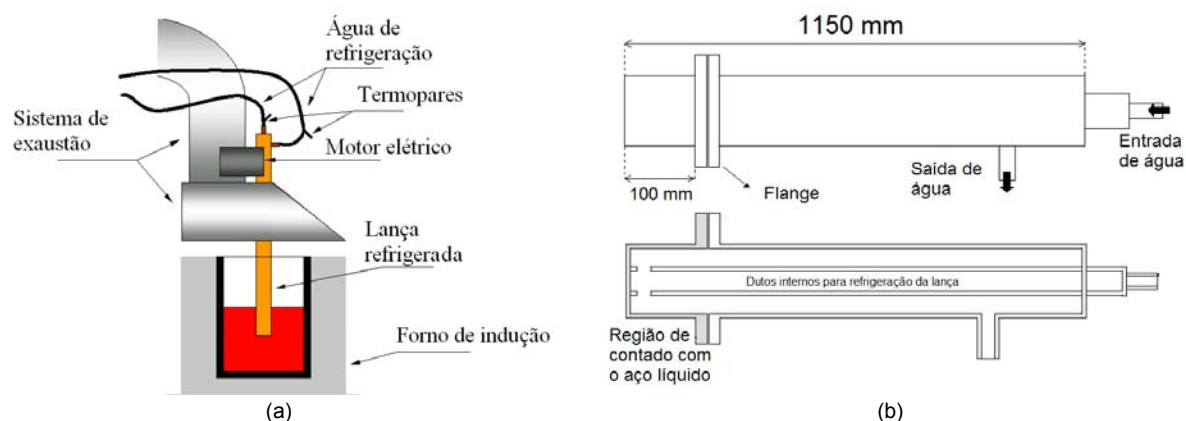


Figura 3 – (a) Desenho esquemático do sistema desenvolvido; (b) detalhamento da lança refrigerada.

Os testes foram realizados utilizando dois aços de composição peritética diferentes. Ambos os testes foram realizados com a utilização de pó fluxante sendo variada a vazão interna de água de refrigeração do amostrador em três níveis.

A Tabela 2 apresenta a composição dos aços utilizados neste estudo, a Tabela 3 apresenta a composição química do pó fluxante e a Tabela 4 apresenta os parâmetros utilizados durante cada teste de solidificação.

Tabela 2 – Composição química dos aços propostos.

Aço	Elementos de liga do aço (% em massa)									
	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Ni	Cr	Ti
A1	0,10	0,44	0,01	0,022	0,011	0,025	0,02	0,01	0,03	0,002
A2	0,15	0,13	0,01	0,009	0,025	0,021	0,04	0,02	0,01	0,002

Tabela 3 – Composição química do pó fluxante.

Pó fluxante	Aplicação	Compostos (% p/p)							Viscos. Poise	T cris °C
		CaO	SiO ₂	Na ₂ O	F ⁻	K ₂ O	Al ₂ O ₃	MgO		
P1	Peritético	28,4	29,9	12,0	4,18	0,52	3,83	0,05	1,7	1152

Tabela 4 – Condições operacionais dos testes.

Aço	Vazão de água (L/min)	Tempo de imersão	Pó fluxante	Temperatura “liquidus”	Superaquecimento
A1	20, 25 e 35	60 s	P1	1529°C	20°C
A2	20, 25 e 35	60 s	P1	1526°C	20°C

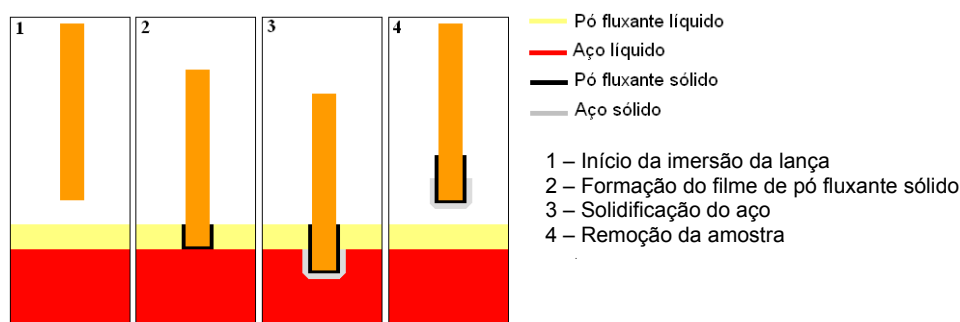
Na Tabela 3, a viscosidade foi calculada utilizando-se o método IRSID⁽⁹⁾ a uma temperatura de 1.300°C e a temperatura de cristalização foi medida utilizando-se o teste de análise térmica diferencial.

Os valores da temperatura “liquidus”, apresentados na tabela 4, foram calculadas de acordo com a equação 2.⁽¹⁰⁾

$$T_L = 1538 - (55(C\%) + 80(C\%)^2 + 13(Si\%) + 4,8(Mn\%) + 1,5(Cr\%) + 4,3(Ni\%) + 30(S\%)) \quad (2)$$

Um motor elétrico é responsável pela imersão e retirada da lança a uma velocidade constante. O pó fluxante foi adicionado sobre o aço líquido até que fosse atingida uma camada de escória líquida de 30 mm, constante em todos os testes.

A velocidade de imersão da lança foi ajustada para que, inicialmente, fosse formado um filme de pó fluxante sólido ao seu redor onde, posteriormente, o aço líquido pudesse solidificar-se, representando assim a condição de solidificação no molde de lingotamento contínuo. A Figura 4 apresenta um desenho esquemático da seqüência de eventos durante a imersão e retirada da lança.

**Figura 4** – Desenho esquemático dos instantes de imersão e emersão representando o teste.

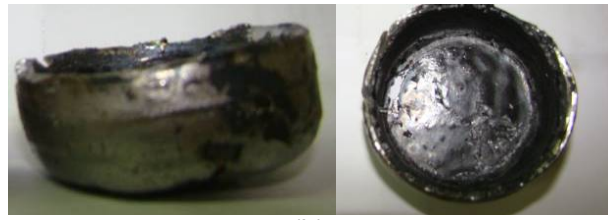
As amostras retiradas durante cada experimento foram cortadas ao longo do seu diâmetro, preparadas e caracterizadas utilizando técnicas de microscopia ótica e eletrônica de varredura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 apresenta uma fotografia do amostrador após a realização do teste, com o material ainda aderida em sua superfície, e uma vista da amostra obtida.



(a)



(b)

Figura 5 – (a) Aspecto da amostra imediatamente após o ensaio; e (b) vista da amostra obtida.

A Figura 6 apresenta as variações nos valores do ΔT ($T_{\text{saída}} - T_{\text{entrada}}$) da água de refrigeração para os testes realizados em cada nível de vazão.

Vazão 20 L/min	Vazão 25 L/min	Vazão 35 L/min
Teste 1 – Aço A1		
ΔT máximo = 8,5°C	ΔT máximo = 9,4°C	ΔT máximo = 5,7°C
q máximo = 2379 kW/m ²	q máximo = 3288 kW/m ²	q máximo = 2871 kW/m ²
Teste 2 – Aço A2		
ΔT máximo = 8,2°C	ΔT máximo = 5,8°C	ΔT máximo = 5,3°C
q máximo = 2295 kW/m ²	q máximo = 2029 kW/m ²	q máximo = 2670 kW/m ²

Figura 6 – Resultados de variação da temperatura de refrigeração da lança para os testes realizados.

Na Figura 6, os valores da variação de temperatura da água foram apresentados na forma gráfica, sendo o eixo das ordenadas o ΔT , em °C, e o eixo das abscissas o tempo de teste, em segundos. Abaixo de cada gráfico estão apresentados os valores máximos do ΔT da água e os fluxos de calor calculados para estes valores de máximo (valores calculados conforme equação 3).

$$q = Q/A = (m C_p \Delta T)/A \quad (3)$$

Na equação 3, m é a vazão de massa de água em 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 em °C e A é a área do amostrador que foi introduzida no banho em m².

De uma maneira geral, considerando os resultados de ΔT , apresentados na Figura 6, observa-se que quanto mais alta a vazão menor o ΔT da água. Isto de fato era esperado tendo em vista que, quanto maior a vazão, menor o tempo de

residência da água no interior da lança. Contudo, o fluxo de calor máximo é maior devido ao produto mC_p .

Comparando os resultados dos testes 1 e 2 não são observadas diferenças significativas em relação à variação da temperatura da água de refrigeração e ao fluxo de calor. Isto está relacionado principalmente às condições de teste, uma vez que foram utilizadas temperaturas do banho próximas e o mesmo pó fluxante e o fluxo de calor total é proporcional à diferença entre a temperatura do aço líquido e da água de refrigeração.

A Figura 7 apresenta as micrografias das amostras obtidas nos testes, sem ataque e com ataque de ácido pícrico saturado, obtidas ao microscópio ótico.

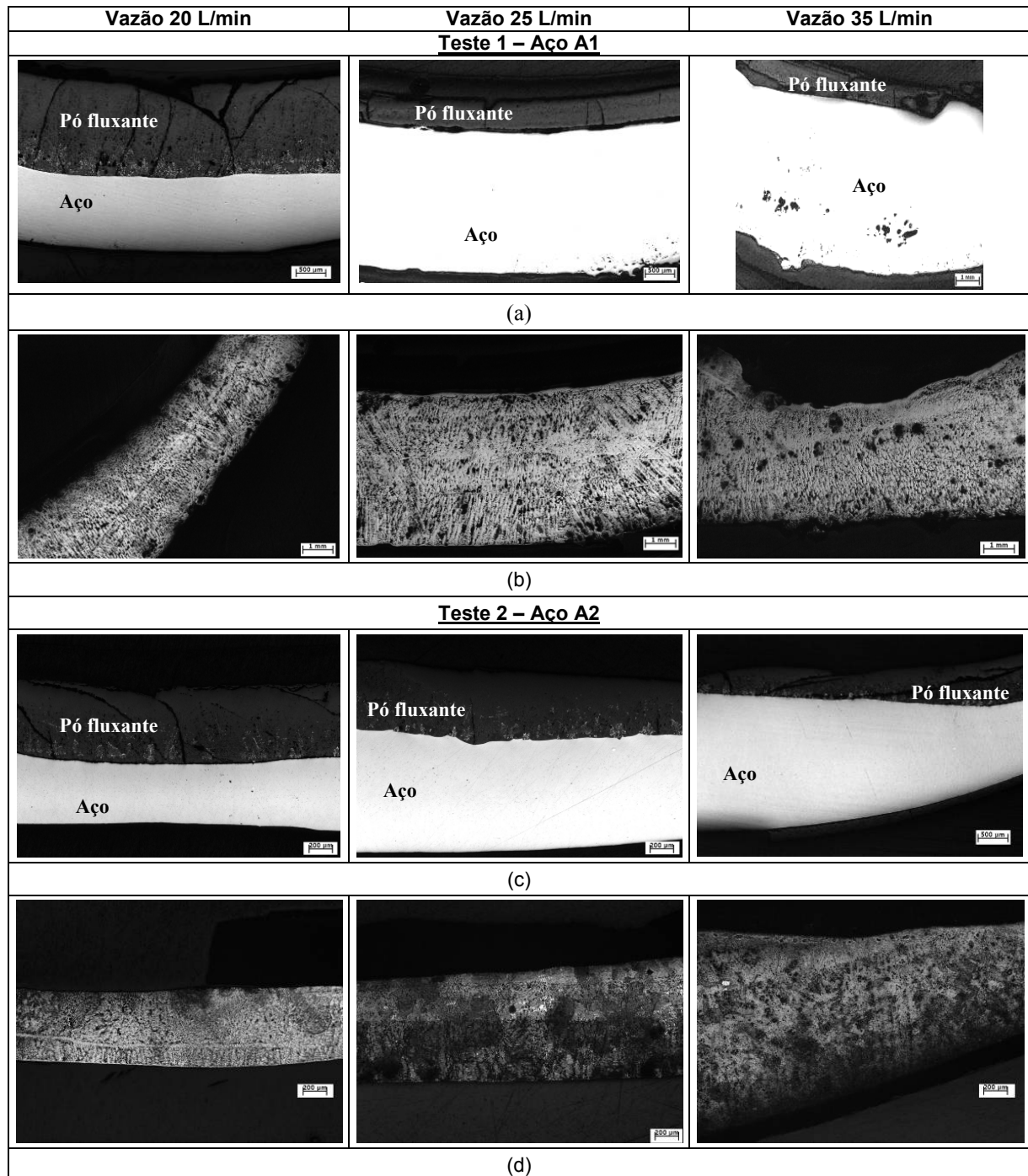


Figura 7 – Micrografias das amostras sem ataque (a) e (c) e com ataque de ácido pícrico saturado (b) e (d).

Na Figura 7, é possível observar as camadas de pó fluxante e aço solidificadas nas amostras sem ataque e a estrutura bruta de solidificação nas amostras com ataque. Observando a Figura 7, é possível notar também que as espessuras solidificadas variam em função da vazão de água utilizada.

Para se conhecer a variação de espessura em função da vazão de água, foram realizadas medidas tanto da espessura da camada de aço quanto da camada de pó fluxante formadas durante o processo de solidificação. A figura 8 apresenta os valores das espessuras destas duas camadas, realizada em cada amostra, para cada nível de vazão.

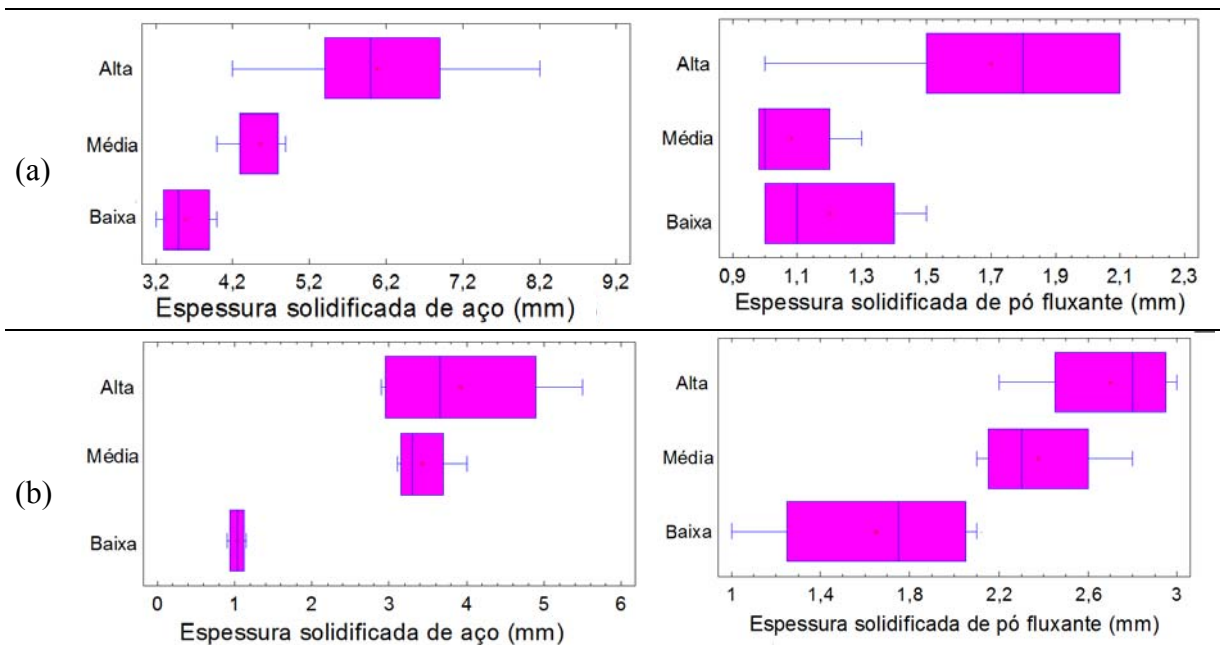


Figura 8 – Espessuras das camadas solidificadas de aço e pó fluxante para o Teste 1 (a) e para o Teste 2 (b) – vazões: alta (35,0 L/min), média (25,0 L/min) e baixa (20,0 L/min).

A Figura 8 indica uma tendência geral de aumento da espessura da camada de pó fluxante e da "pele" de aço solidificada com o aumento da vazão de água.

Os valores apresentados na Figura 8 mostram que, para a vazão de água mais elevada, a pele de aço se torna mais irregular, ou seja, maior é a dispersão nas medidas de espessura da camada de aço solidificada. Em contrapartida, com vazões moderada e baixa, a espessura da pele formada é mais homogênea. Este fato pode estar relacionado com a intensidade da ocorrência da reação peritética, que segundo Fredrickson,⁽¹¹⁾ é afetada fortemente pela taxa de resfriamento.

Outro fato importante, é que, desconsiderando os teste com alta vazão, nota-se que a espessura da camada de pó fluxante obtida influencia na espessura da pele de aço solidificada. Pois, comparando-se os resultados dos testes 1 e 2, entre si nas mesmas vazões, para uma camada de pó fluxante maior, a espessura da pele solidificada é menor. Isto demonstra a influência da resistência térmica exercida pela camada de pó fluxante na formação da pele solidificada.

Além da espessura da camada solidificada, a formação das fases cristalinas no filme de pó fluxante é determinante na extração de calor. É notório que a formação de fases cristalinas nos filmes de pó fluxante solidificados reduzem a transferência de calor devido à redução da contribuição do termo de radiação no processo de transferência de calor. Assim, a condição do filme de pó fluxante deve ser considerada para uma melhor interpretação da solidificação.

A Figura 9 apresenta exemplos de micrografias do filme de pó fluxante solidificado em regiões em contato com a parede de cobre do amostrador.

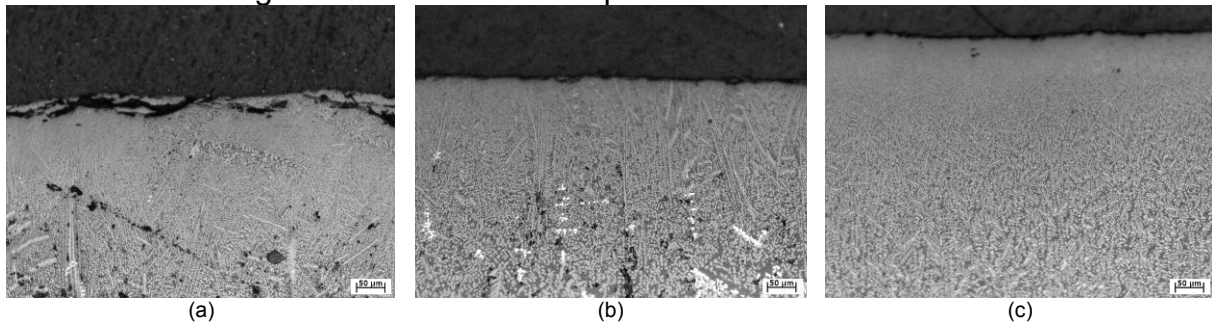


Figura 9 – Micrografias do filme de pó fluxante solidificado para as vazões de teste de 20,0 L/min (a), 25,0 L/min (b) e 35,0 L/min (c).

Como observado na Figura 9, com vazões de água mais altas a microestrutura do pó fluxante fica mais fina, ou seja, a rápida extração de calor causada pelas vazões mais elevadas inibe a rápida formação e o crescimento de fases cristalinas nos filmes de pó fluxante.

Os filmes de pó fluxante foram observados via microscópio eletrônico de varredura (MEV) e nas regiões de cristais foram realizadas análises químicas por espectrometria de dispersão de elétrons (EDS), com o intuito de se verificar a constituição das formações dendríticas observadas ao microscópio ótico.

A Figura 10 apresenta o resultado da análise por EDS e uma micrografia das camadas de pó fluxante, com um maior detalhe das dendritas formadas.

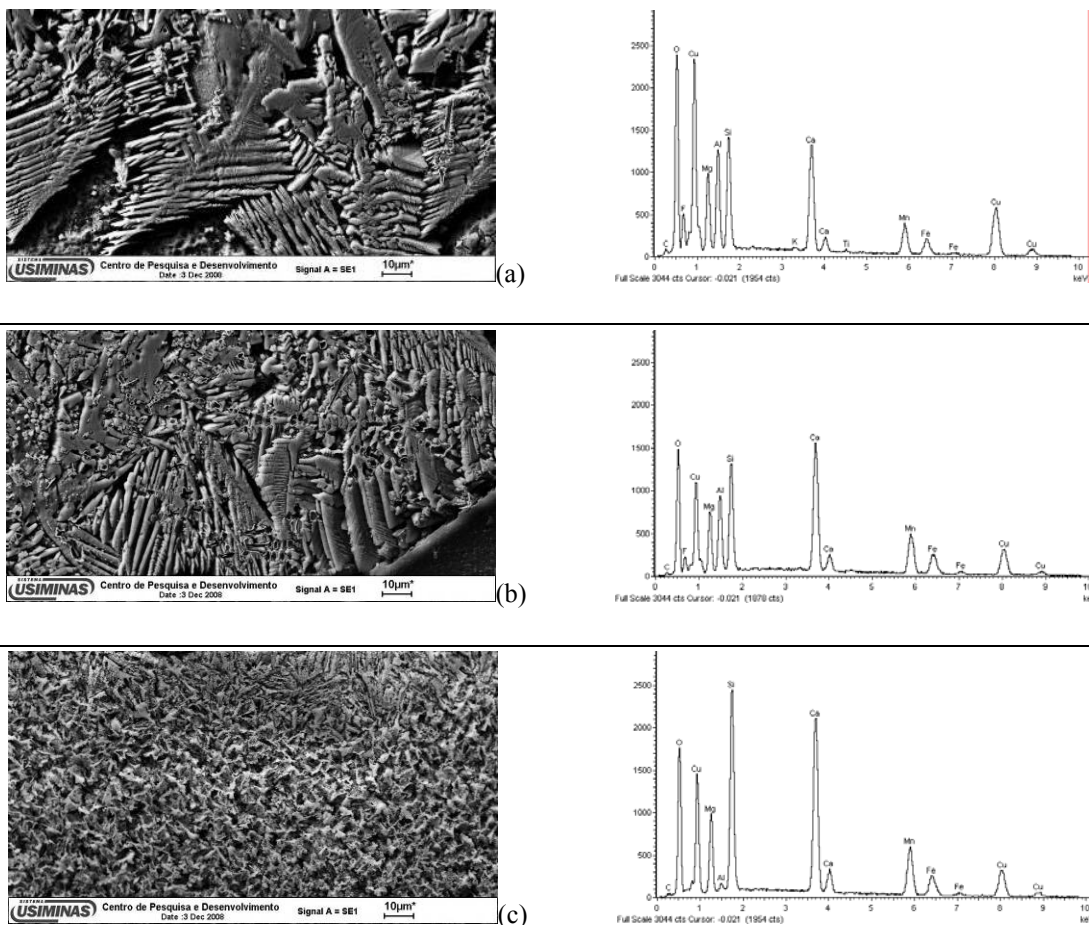


Figura 10 – Micrografias das camadas de pó fluxante e análise química via EDS para vazões de teste de 20,0 L/min (a), 25,0 L/min (b) e 35,0 L/min (c).

Na Figura 10 é observada a presença dos elementos Ca, Si, O e F nas regiões de dendrita, ou seja, estas dendritas são formadas possivelmente pela fase cristalina denominada cuspidina ($3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot \text{CaF}_2$), fases cristalinas tipicamente encontradas nos filmes de pós fluxantes comerciais.

Observando as micrografias apresentadas na Figura 7 com maior aumento, vê-se que a camada de pó fluxante forma um substrato contínuo para a solidificação da camada de aço. Com ataque é possível observar que próximo da camada de pó fluxante é formada uma fina região coquilhada a partir da qual a estrutura dendrítica se desenvolve. A Figura 11 apresenta um exemplo da interface aço/pó fluxante com e sem ataque de ácido pícrico saturado.

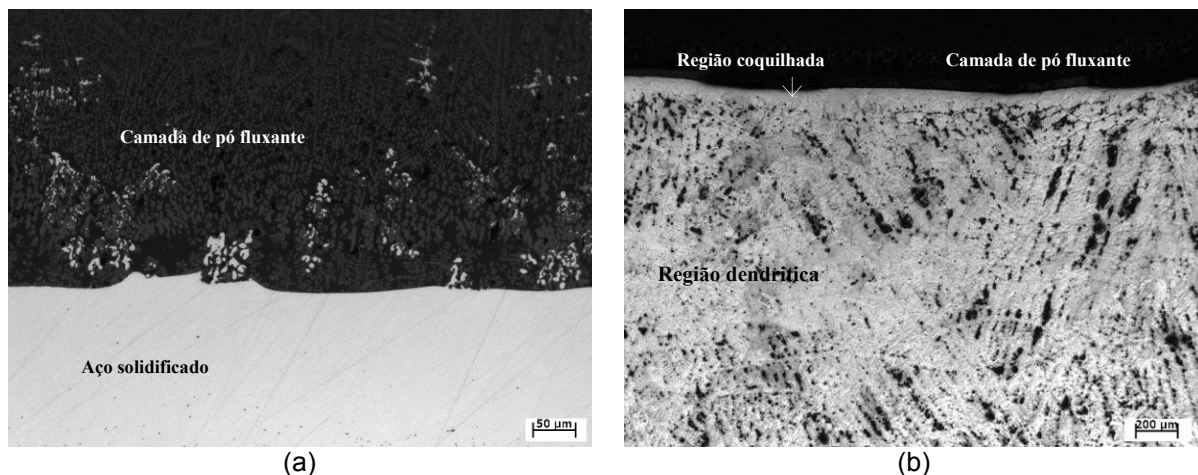


Figura 11 – Micrografia da interface aço/pó fluxante sem ataque (a) com ataque de ácido pícrico saturado (b).

Correlacionando os resultados de fluxo de calor e microestruturais foi possível observar que, de uma maneira geral, quanto maior a vazão de água, conseqüentemente, fluxo de calor mais intenso durante a solidificação do aço, maior e mais homogênea é a região coquilhada observada no aço solidificado. Tal característica mostra que o fluxo de calor exerce efetivamente uma grande influência na microestrutura da “pele” de aço solidificada.

A solidificação é um processo que está necessariamente relacionado com a nucleação e o crescimento de uma fase a partir de um superesfriamento do líquido. A estrutura de solidificação é determinada pela morfologia da interface sólido/líquido que está relacionada com o gradiente térmico, velocidade e intervalo de solidificação. Na verdade, a velocidade de solidificação afeta a evolução da frente de solidificação e, conseqüentemente, os aspectos relativos à estrutura de grãos da pele.

Uma estrutura mais fina pode ser obtida com o aumento da extração de calor, o que pode causar um benefício em relação a problemas de microsegregação. Entretanto, quando os aços peritéticos são submetidos à altas taxas de solidificação o resultado é quase sempre ruim em termos de homogeneidade da pele em formação, podendo gerar trincas e até mesmo um rompimento da pele formada. Assim, segundo a literatura⁽⁵⁾, para o lingotamento dos aços peritéticos é geralmente recomendado se reduzir o fluxo de calor para a obtenção de uma pele mais homogênea.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aparato laboratorial desenvolvido mostrou-se eficiente e promissor na investigação das condições iniciais de solidificação no molde de lingotamento contínuo. Nos testes realizados, amostras de aço e pó fluxante foram retiradas para avaliação química e metalográfica e a extração de calor total foi calculada pela vazão e diferença de temperatura da água de refrigeração. Com os resultados obtidos foi possível avaliar aspectos relativos a formação da camada de pó fluxante e da pele de aço solidificada, observando, de maneira geral, como o fluxo de calor e a resistência térmica exercida pela camada de pó fluxante afetam a espessura da pele de aço solidificada.

REFERÊNCIAS

- 1 ROYZMAN, S.E. Continuous casting of peritectic steel. In: *Steel Technology International 2000*. London: Sterling, 1999. p. 82, 84, 86-87.
- 2 OLIVEIRA, L.J.S. *Comportamento dos aços peritéticos durante a solidificação no molde de lingotamento contínuo*. 2008. Proposta de Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2008.
- 3 AISE STEEL FOUNDATION. *The making, shaping and treating of steel: casting*. 11 ed. Pittsburg: Aise Steel Foundation, 2003. 1v.
- 4 VALADARES, C.A.G. (Coord.) *Lingotamento contínuo de placas*. São Paulo: ABM, 2006.
- 5 LI, Z.; MILLS, K.; BEZERRA, M.C.C. Characteristics of mould flux films for casting MC and LC steels. In: SEMINÁRIO DE FUSÃO, REFINO E SOLIDIFICAÇÃO DOS METAIS, 35., 2004. Salvador. São Paulo: ABM, 2004. p.281-93.
- 6 SCHWERDTFEGER, K. *Enhancing fundamental knowledge and industry practice for the world Iron and Steel Industry: 5th independent model – Metallurgical approach from ladle furnace to continuous casting for slabs, squares and rounds*. Belo Horizonte: RS Consultants, 2007.
- 7 BADRI, A.; Natarajan, T.; Snyder, C.; Powers, K.; Mannion, F.; Cramb, A. A mold simulator for continuous casting of steel: Part 1 – The development of a simulator. *Metallurgical and Materials Transactions B*, v. 36, n. 3, p. 355-71, June 2005.
- 8 NATARAJAN, T.T.; et al. 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, 1013-25.
- 9 RIBOUD, P.V.; GAYER, H. Molten slags properties and their use in steelmaking process control. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOLTEN SLAGS AND FLUXES, 4., 1992, Sendai. Tokyo: ISIJ, 1992. p. 173-8.
- 10 BARBOSA, F.A. Treinamento em processo de aciaria no Centro de Pesquisa de Futtsu da Nippon Steel Corporation. Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas, 2004 (Relatório de visita técnica)
- 11 FREDRIKSSON, H. The mechanism of peritectic reaction in iron-base alloys. *Metal Science*, p. 77-86, Mar. 1976.