

# METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DA CONTRAÇÃO DOS AÇOS PERITÉTICOS EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE EXTRAÇÃO DE CALOR

Leonardo José Silva de Oliveira <sup>1</sup>

André Afonso Nascimento <sup>2</sup>

Marco Túlio Dias Lima <sup>3</sup>

Roberto Parreiras Tavares <sup>4</sup>

## Resumo

No lingotamento contínuo, os aços peritéticos são os que apresentam uma maior incidência de defeitos superficiais na placa, devido, principalmente, à presença de irregularidades na pele, que se dão pela contração que ocorre em função da diferença de fator de empacotamento entre a ferrita delta e a austenita. Neste sentido, buscou-se avaliar a influência da extração de calor ao longo da reação peritética e, conseqüentemente, na intensidade de contração do aço durante a solidificação. Para tanto, é proposta uma metodologia para avaliação da contração dos aços peritéticos durante a solidificação. Com base nos resultados obtidos, verifica-se que o aumento no fluxo de calor provoca alterações na intensidade de contração desse aço. Esse fato pode estar relacionado com a cinética da ocorrência da reação peritética.

**Palavras-chave:** Lingotamento contínuo; Solidificação; Aços peritéticos.

## EXPERIMENTAL METHODOLOGY TO EVALUATE THE CONTRACTION OF PERITECTIC STEELS UNDER DIFFERENT HEAT EXTRATION CONDITIONS

### Abstract

Peritectic steels show the highest surface defect index leading to irregularities along the shell during the continuous casting, that occur due to a difference of packing densities between ferrite delta and austenite phases after solidification. In the present paper, the influence of mould heat extraction on the peritectic reaction and, consequently, on the shrinkage of this steel during solidification was evaluated. For that, a methodology to evaluate the contraction of peritectic steels is proposed. Based on the results obtained, it is observed that the heat extraction may be a significant effect on the intensity of contraction of the peritectic steels. According to the results, higher heat extraction rates increase the intensity of the solidification shrinkage. This may be related to the kinetic of the peritectic reaction.

**Key words:** Continuous casting; Solidification; Peritectic steels.

## I INTRODUÇÃO

Dentre as diferentes qualidades de aço produzidas, os aços peritéticos são os que apresentam uma maior incidência de defeitos superficiais devido à presença de irregularidades na pele, que se dão, principalmente, pela contração que ocorre em função da diferença do fator de empacotamento entre a ferrita delta e a austenita.

A reação peritética ocorre quando um líquido e um sólido primário transformam-se em um sólido secundário. Em geral, a fase secundária cresce perifericamente à fase primária. Este é o fato pelo qual a reação tem nome de peritética.<sup>(1)</sup> Em aços peritéticos, o processo ocorre em dois estágios: a reação peritética e a transformação peritética. No primeiro instante da reação,

<sup>1</sup>Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas. Av. Pedro Linhares Gomes, 5431, Bairro Usiminas, Cep 35160-900, Ipatinga, MG, Brasil. E-mail: leonardo.oliveira@usiminas.com

<sup>2</sup>Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas. Av. Pedro Linhares Gomes, 5431, Bairro Usiminas, Cep 35160-900, Ipatinga, MG, Brasil. E-mail: andre.nascimento@usiminas.com

<sup>3</sup>Membro da ABM, Técnico Metalurgista, Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas. Av. Pedro Linhares Gomes, 5431, Bairro Usiminas, Cep 35160-900, Ipatinga, MG, Brasil. E-mail: marco.dias@usiminas.com

<sup>4</sup>Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Mestre, Doutor, Professor Associado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Av. Antônio Carlos, 6627, Cep 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: rtavares@demet.ufmg.br

existe uma rápida transformação da ferrita delta para austenita no ponto peritético, ou seja, as fases ferrita delta, líquido e austenita coexistem em um único ponto. Depois, o crescimento da austenita ocorre até a completa aniquilação da ferrita delta, através da difusão.<sup>(2)</sup>

A variação volumétrica originada pela mudança da estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), da ferrita delta, para cúbica de face centrada (CFC), da austenita, presente na reação peritética, é um fator importante que, somado a determinadas condições operacionais, tais como o desalinhamento das máquinas de lingotamento contínuo, flutuações do nível de aço no molde e pó fluxante inadequado, pode provocar o surgimento de defeitos superficiais e subsuperficiais nas placas.

A transformação peritética atinge intensidade máxima em aços com teores de carbono entre 0,11% e 0,17%. Nesta composição, a espessura solidificada é bastante desigual, devido à competição entre os fenômenos de contração, originada pela mudança de estrutura cristalina (ferrita- $\delta$ /austenita), e de expansão, promovida pela pressão ferrostática. As contrações provocam uma tendência à formação de depressões na superfície da placa, levando à redução do fluxo de calor no molde.

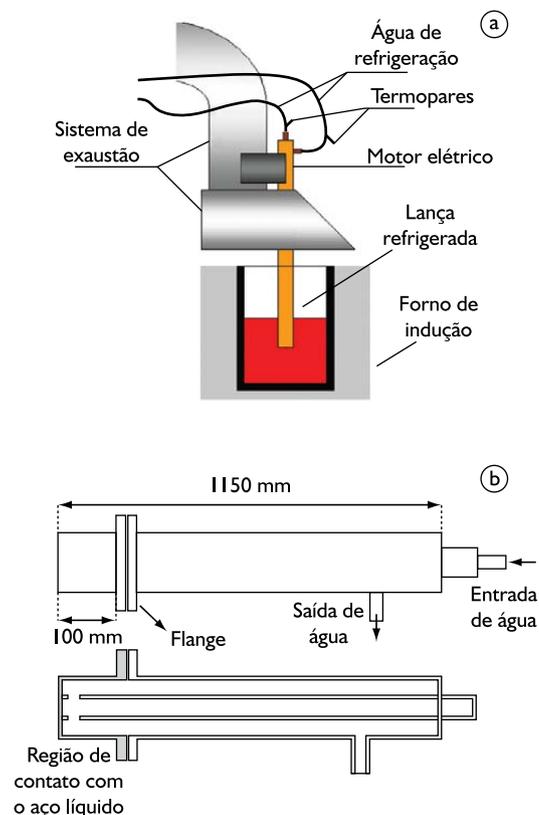
A redução da extração de calor no molde origina uma estrutura cristalina com grãos grosseiros. Segundo Schmidt e Josefsson,<sup>(3)</sup> uma maior tendência à formação de trincas a quente está associada à presença de uma estrutura com grãos austeníticos grosseiros. Entretanto, de acordo com Mintz, Yú e Jonas,<sup>(4)</sup> o tamanho de grão tem pouca influência na origem de trincas superficiais na placa, mas está diretamente relacionado com a sua propagação para profundidades críticas.

Outro aspecto a ser considerado é o de que a resistência do conjunto ferrita delta e austenita será definida pelo comportamento da fase mais fraca, neste caso, pela ferrita delta. Isso é importante para a integridade dos aços peritéticos durante a solidificação no molde, quando a pele formada deve suportar as tensões térmicas e as tensões devido à contração. A baixa resistência da ferrita pode fazer com que ela não resista às tensões causando trincas.<sup>(5)</sup>

De fato, a reação peritética é muito importante quando se trata do lingotamento dos aços. Assim, propõe-se neste trabalho a utilização de uma metodologia experimental para avaliar o comportamento dos aços peritéticos em condições de extração de calor as mais próximas possíveis das impostas no molde, buscando entender como a extração de calor afeta a solidificação e a contração desses aços.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para investigar o processo de solidificação de aços peritéticos, utilizou-se um aparato laboratorial especialmente desenvolvido,<sup>(6)</sup> composto de um tubo de cobre refrigerado à água. O tubo de cobre é imerso no aço/pó fluxante, previamente fundidos em um forno de indução sob atmosfera inerte, para a formação e amostragem da camada sólida. A Figura 1 apresenta um desenho esquemático do sistema desenvolvido.

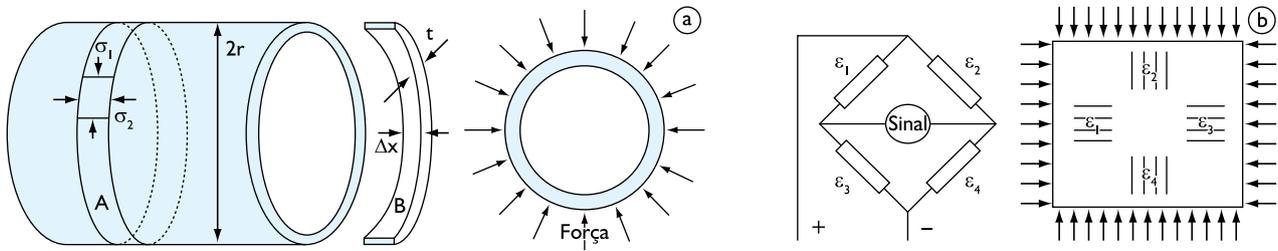


**Figura 1.** Desenho esquemático do aparato (a) e detalhamento da lança refrigerada (b).<sup>(6)</sup>

O aparato é equipado com um medidor de vazão e termopares, para medirem a temperatura de entrada e saída da água. Um motor elétrico é utilizado para imergir e remover a lança de cobre no banho, em período de tempo pré-determinado.

Para avaliar a contração do aço durante a solidificação, utilizaram-se sensores do tipo *strain-gage*, usados para avaliar microdeformações. O sensor foi instalado na parede interna do amostrador, pois se entende que, ao se solidificar, o aço gera uma força compressiva no amostrador. A Figura 2 apresenta um desenho esquemático da montagem e do tipo de sensor utilizado.

Em um cilindro de parede fina, as forças que atuam em suas paredes são distribuídas ao longo das direções longitudinal e circunferencial. Assim, as tensões medidas pelo sensor durante a compressão do amostrador são as  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ , conforme apresentado no diagrama da Figura 2a. Como o amostrador foi introduzido no aço/pó líquidos, é possível que a dilatação térmica interfira na medição. Assim, para evitar-se a interferência da dilatação térmica, foi utilizado um *strain-gage* de ponte completa. Esse sensor utiliza um arranjo de quatro elementos resistivos (desenho



**Figura 2.** Diagrama de forças durante a solidificação do aço em torno do amostrador de cobre (a) e desenho esquemático de um *strain-gage* de ponte completa (b).

da Figura 2b). No arranjo proposto, o efeito da dilatação térmica pode ser desprezado, pois, como ela ocorre igualmente em todas as direções do amostrador, apenas as deformações mecânicas são medidas pelo sensor (Equações 1 a 3).

$$e = c((\varepsilon_1 - \varepsilon_2) + (\varepsilon_3 - \varepsilon_4)) \quad (1)$$

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_M + \varepsilon_T \quad \varepsilon_2 = +\varepsilon_M + \varepsilon_T \quad (2)$$

$$\varepsilon_3 = -\varepsilon_M + \varepsilon_T \quad \varepsilon_4 = +\varepsilon_M + \varepsilon_T$$

$$e = c(-4\varepsilon_M) \quad (3)$$

Nas Equações 1 a 3,  $e$  é a deformação do amostrador;  $\varepsilon$ , com índices 1, 2, 3 e 4, são as deformações medidas em cada elemento resistivo;  $c$  é uma constante e  $\varepsilon$ , com índices M e T, são as deformações de origens térmica e mecânica do sistema.

Os testes de solidificação foram realizados utilizando um pó fluxante comercial específico para lingotamento de aços peritéticos. A Tabela 1 apresenta a composição química do aço. A Tabela 2 apresenta a composição química do pó fluxante. Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros utilizados nos testes.

A opção de se utilizar o pó fluxante durante o teste de solidificação teve o intuito de manter a condição da interface aço/amostrador de cobre o mais próximo possível da industrial. Durante o teste de solidificação, o amostrador de cobre entra em contato inicialmente com a camada de pó fluxante líquido, que forma um filme sólido ao redor do amostrador. O filme de pó fluxante funciona como substrato para a solidificação do aço exercendo a resistência térmica ao fluxo de calor.

**Tabela 1.** Composição química do aço

Aço	Composição (% p/p)									
	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Ni	Cr	Ti
A3	0,11	1,30	0,16	0,0002	0,0005	0,005	0,019	0,013	0,023	0,002

**Tabela 2.** Composição química do pó fluxante

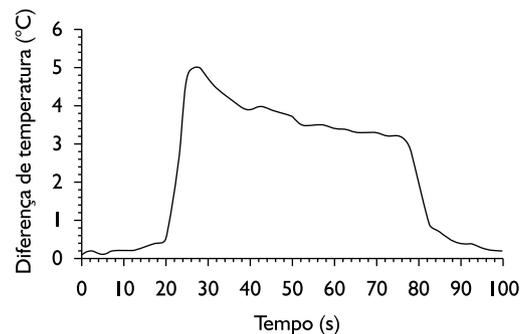
Aplicação	Composição (% p/p)									
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	F	K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	C
Peritético	38,7	32,7	5,39	6,52	0,37	4,89	0,46	0,23	3,31	7,43

**Tabela 3.** Condições de teste

Aço	Vazão de água (L/min)	Tempo de imersão (segundos)
A3	16, 20 e 27	60

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta a variação típica da temperatura da água medida na entrada e saída do amostrador, durante os testes de solidificação.



**Figura 3.** Diferença de temperatura de entrada e saída da água de refrigeração com o tempo de teste para vazão 27 L/min.

Baseando-se nos valores da variação da temperatura da água de refrigeração, pode-se calcular a extração de calor, utilizando a Equação 4.

$$q = \frac{Q}{A} = \left( \frac{m C_p \Delta T}{A} \right) \quad (4)$$

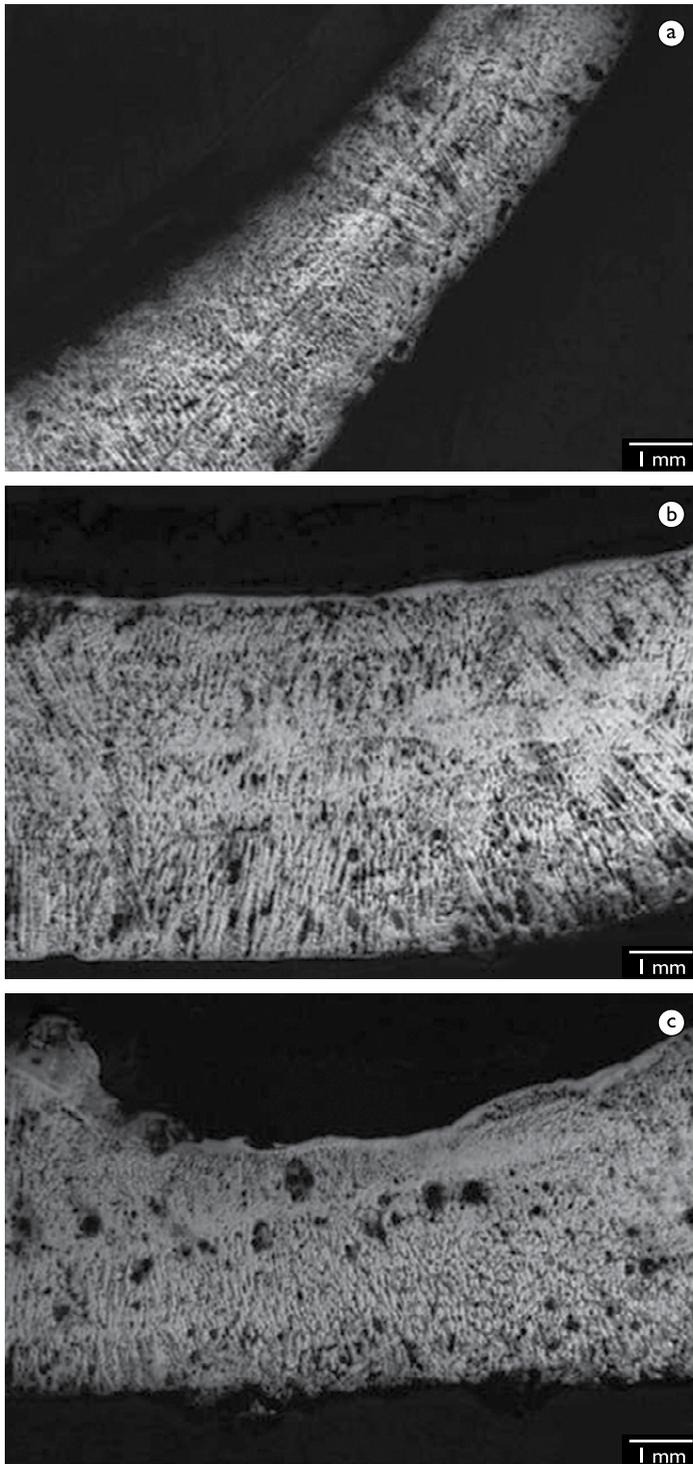
Na Equação 4,  $m$  é a vazão mássica de água (kg/s),  $C_p$  é o calor específico da água (4.178 J/kg K à temperatura de 300 K),  $\Delta T$  é a variação da temperatura da água (K) e  $A$  é a área do amostrador que foi introduzida no metal líquido (m<sup>2</sup>).

A Tabela 4 apresenta os valores obtidos para o  $\Delta T$  máximo da água de refrigeração, os valores da extração de calor referentes à variação máxima de temperatura e a extração de calor média, para cada teste realizado.

**Tabela 4.** Variação de temperatura máxima e fluxo de calor para cada teste

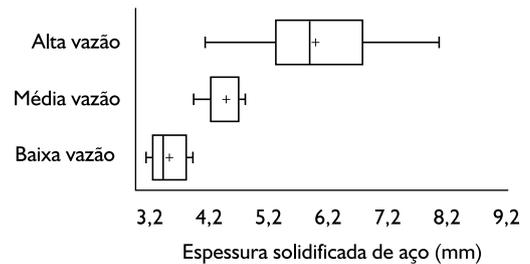
Aço	$\Delta T$ máx. (K)	$q$ máx. (kW.m <sup>-2</sup> )	$q$ méd. (kW.m <sup>-2</sup> )	Vazão de água (L/min)
	7,0	1.567	1.007	16
A3	6,1	1.707	1.036	20
	5,3	2.002	1.239	27

Conforme apresentado na Tabela 4, o aumento na vazão da água de refrigeração implica em um incremento na extração de calor, conforme esperado. Era também esperado que, com o aumento da extração de calor, houvesse um aumento na espessura solidificada, pois a força motriz para o avanço da frente de solidificação é a extração de calor. A Figura 4 apresenta micrografias das amostras obtidas após solidificação do aço A3.



**Figura 4.** Micrografia das amostras do aço A3: a) 16 L/min; b) 20 L/min; e c) 27 L/min.

Para se conhecer a espessura solidificada em função da vazão de água, foram realizadas medidas da espessura da camada de aço formada durante a solidificação. A Figura 5 apresenta os valores medidos em cada amostra, para cada nível de vazão. Para cada amostra foram realizadas cinco medidas de espessura em posições ao longo da circunferência da amostra, na metade de sua altura.

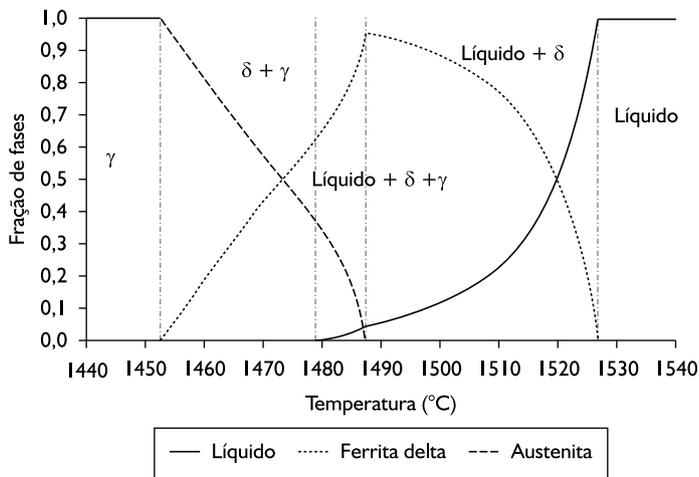


**Figura 5.** Espessura da camada solidificada de aço para aço A3.

A Figura 5 mostra que há um aumento da espessura da camada de aço solidificada com o aumento da vazão de teste. Os valores apresentados mostram também que, para alta vazão, há a tendência de que a espessura da pele de aço se torne mais irregular, ou seja, maior é a dispersão nas medidas de sua espessura. Em contrapartida, com vazões moderada e baixa, a espessura da pele formada é mais homogênea.

As alterações na morfologia da pele podem ser visualizadas nas micrografias da Figura 4. Além das variações de espessura solidificada, em altas vazões a pele de aço torna-se bastante irregular. Tanto a variação de espessura quanto a morfologia irregular podem favorecer a formação de defeitos, pois as irregularidades podem funcionar como concentradores de tensão. Assim, a variação na intensidade de extração de calor mostra um efeito significativo na morfologia solidificada. É necessário então, buscar o entendimento do efeito da extração de calor na contração, durante a solidificação.

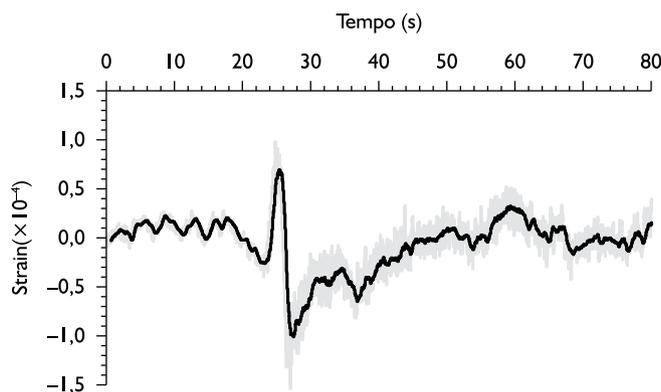
De certo modo, para se interpretar os resultados de contração dos aços é necessário entender o seu comportamento durante a solidificação. Para isso, realizou-se uma simulação, utilizando termodinâmica computacional, com o intuito de entender a trajetória de solidificação do aço em estudo. A Figura 6 apresenta a variação da fração de fases com a temperatura, para a composição do aço A3.



**Figura 6.** Variação da fração de fases durante a solidificação do aço A3.

Conforme apresentado na Figura 6, a primeira fase sólida a se formar é a fase ferrita delta ( $\delta$ ), que aumenta de proporção com a diminuição da temperatura. Quando a temperatura atinge aproximadamente 1.487°C, ocorre o desaparecimento simultâneo do líquido e da ferrita, com a consequente formação de austenita ( $\gamma$ ), em uma reação peritética. É possível observar também que a reação peritética não ocorre em uma temperatura invariante, mas sim numa faixa que vai de 1.487°C a 1.478°C. Isto é resultado da presença dos elementos de liga no aço. Abaixo dessa faixa de temperatura, as fases presentes são a ferrita delta e a austenita.

Durante a realização dos testes de solidificação o sensor de deformação realizou as leituras referentes a cada teste. A Figura 7 apresenta um exemplo de resultado de tensão medido durante o teste de solidificação do aço A3.



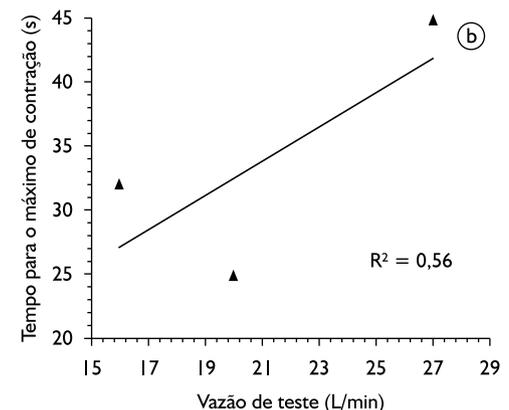
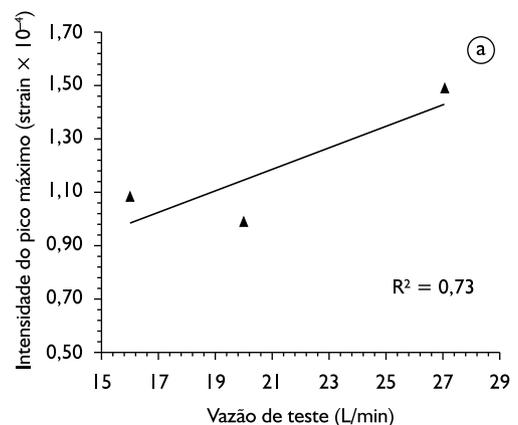
**Figura 7.** Variação de tensão durante a solidificação medida pelo extensômetro para uma vazão de 20 L/min e tempo de imersão de 60 segundos.

Como observado na Figura 7, a resposta do sistema forneceu uma variação de sinal ao longo do teste. No gráfico, os 20 primeiros segundos são referentes ao tempo de descida da lança. De uma maneira geral, durante a solidificação, inicialmente há uma variação volumétrica devido à diminuição da temperatura. Quando é alcançada a temperatura *liquidus*, ocorre uma variação

de volume devido à mudança de estado (início da solidificação) e, por fim, existe uma variação volumétrica no sólido, causada pelas transformações de fase. A variação volumétrica causada pela redução de temperatura do líquido não é possível de ser medida usando o extensômetro, pois o líquido não tem resistência para causar deformações no amostrador de cobre. Assim, entende-se que o sensor de contração foi capaz de medir a contração devido à solidificação e mudanças de fase.

Com relação aos resultados de contração obtidos experimentalmente, observou-se que o aço se comporta de maneira diferente quando se alterou a vazão de água, ou seja, o aço apresentou respostas distintas com a alteração do fluxo de calor. As diferenças observadas referem-se à intensidade de contração máxima e ao tempo para a sua ocorrência. Estas observações são apresentadas na Figura 8a e b.

Os dados apresentados na Figura 8a mostram que existe uma correlação positiva entre a vazão de água (extração de calor) e o máximo de contração para o aço A3.



**Figura 8.** Variação da intensidade do pico de contração (a) e do tempo para ocorrência do máximo de contração (b) com a vazão de água durante o teste.

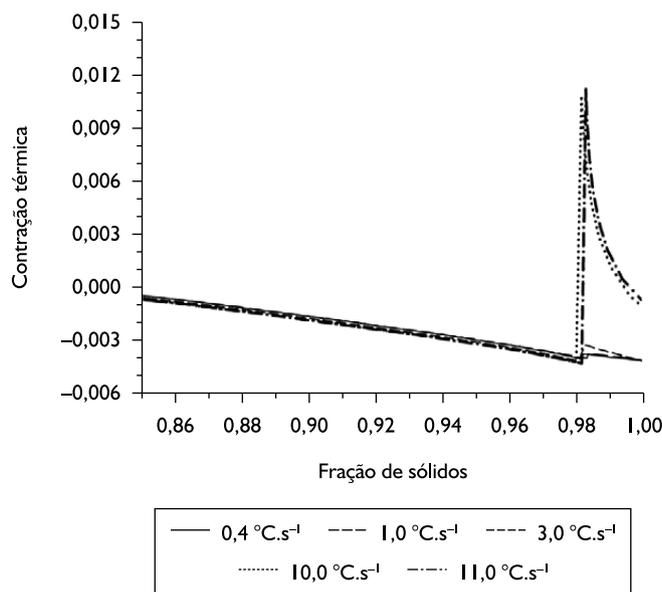
Conforme Figura 8b, o tempo para a ocorrência dos picos de contração tem uma relação com o aumento da vazão de teste. Ou seja, quando se aumentou a velocidade de extração de calor, o tempo para a ocorrência do pico de contração é retardado.

Vale ressaltar que o objetivo da Figura 8 não é apresentar uma função que indique a relação entre as variáveis e sim apresentar uma tendência do incremento da extração de calor na ocorrência da reação peritética. Conforme apresentado na Tabela 4, a variação do fluxo de calor das vazões 16 L/min e 20 L/min para 27 L/min é muito grande. Quando ocorre essa alteração há uma variação tanto na intensidade de contração quanto no tempo para a ocorrência do pico de contração.

Tanto a variação da intensidade de contração quanto o tempo para ocorrência do pico de contração, observadas para o aço A3, podem estar relacionadas à cinética de ocorrência da reação peritética que, segundo Fredriksson,<sup>(1)</sup> tem uma forte relação com a velocidade de resfriamento.

Como a solidificação é um processo cinético, a alteração da velocidade de extração de calor pode efetivamente causar um efeito importante na intensidade de contração dos aços peritéticos, pois definirá as velocidades de formação e crescimento das fases sólidas. As avaliações comumente utilizadas para a contração ou transformação de fases do aço em processos de solidificação levam em conta as relações de equilíbrio. No caso do lingotamento contínuo, existem altas taxas de extração de calor; logo, a pele irá se solidificar fora das condições previstas para o equilíbrio.

Sobre a contração dos aços peritéticos, Mondragón et al.<sup>(7)</sup> utilizaram, em conjunto, modelos de solidificação (termodinâmicos e cinéticos) e de contração para simular o comportamento de aços hipo-peritéticos (C entre 0,1% e 0,16%), considerando diferentes condições de resfriamento. A Figura 9 apresenta a variação da contração em função da fração de sólidos, calculada por esses autores.



**Figura 9.** Relação entre a contração térmica e a fração solidificada para diferentes taxas de resfriamento.<sup>(7)</sup>

Na Figura 9, observa-se um progressivo aumento da contração térmica principalmente para taxas de resfriamento maiores que  $3^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ . Considerando taxas de solidificação ainda maiores, de  $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$  e  $11^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ , a contração térmica é particularmente superior e ocorre para a fração de sólido perto de 0,98. Essa fração de sólido está de acordo com a ocorrência da reação peritética (Figura 6a).

Os resultados obtidos ajustam-se às previsões teóricas levantadas por Mondragón et al.<sup>(7)</sup> Neste caso, entende-se que o aumento na taxa de transferência de calor durante a solidificação dos aços peritéticos afeta as relações entre as fases e a ocorrência da reação peritética e, com isso, a intensidade de contração.

Finalmente, associando à intensidade de contração com a condição morfológica da pele solidificada (mais irregular), entende-se que o aumento da taxa de extração de calor irá afetar a suscetibilidade dos aços peritéticos à formação de trincas. Neste caso, deve-se controlar a taxa de extração de calor e todas as variáveis de processo que a afetem, principalmente a velocidade de lingotamento e a qualidade do pó fluxante. O aumento da velocidade de lingotamento e/ou a troca indevida de pós fluxantes podem aumentar a extração de calor, favorecendo a formação de defeitos superficiais devido ao incremento de contração.

## 4 CONCLUSÕES

A partir dos testes de solidificação realizados verifica-se que, quando os aços peritéticos são submetidos a altas taxas de extração de calor, a espessura da pele solidificada apresenta grandes variações de espessura, o que é ruim em termos de comportamento termomecânico. A variação de espessura ao longo da pele solidificada pode gerar concentrações de tensão, favorecendo a nucleação e a propagação de trincas na pele formada.

Utilizando a metodologia proposta, é estudada a contração do aço peritético em três níveis diferentes de extração de calor. Com base nos resultados obtidos verifica-se que o aumento na taxa de extração de calor provoca um aumento na intensidade de contração durante a solidificação do aço peritético. Este fato pode estar relacionado, principalmente, com a cinética de ocorrência da reação peritética.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que a utilização de altas taxas de extração de calor no lingotamento contínuo dos aços peritéticos não é uma prática recomendada, pois, além de causar variações na espessura solidificada da pele, aumenta a tensão mecânica devido ao incremento na intensidade de contração do aço. Os resultados podem ter, como consequência, o favorecimento da ocorrência de trincas superficiais, prejudicando a qualidade do produto lingotado.

## REFERÊNCIAS

- 1 FREDRIKSSON, H. The mechanism of peritectic reaction in iron-base alloys. *Metal Science*, v. 10, p. 77-86, Mar. 1976.
- 2 DHINDAW, B. K. et al. Characterization of peritectic reaction in medium-alloy steel through microsegregation and heat-of-transformation studies. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 35, n. 9, p. 2869-79, Sep. 2004.
- 3 SCHMIDT, L.; JOSEFSSON, A. Formation and avoidance of transverse cracks in continuously cast slabs from curved-mould machines. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, v. 3, n. 5, p. 193-9, 1974.
- 4 MINTZ, B.; YUE, S.; JONAS, J. J. Hot ductility of steels and its relationship to the problem of transverse cracking during continuous casting. *International Materials Reviews*, v. 36, n. 5, p. 187-217, 1991.
- 5 ROYZMAN, S. E. Continuous casting of peritectic steel. In: STEEL TECHNOLOGY INTERNATIONAL 2000. London: Sterling, 1999. p. 82, 84, 86-87.
- 6 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 Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- 7 MONDRAGÓN, J. J. R. et al. Description of the hypo-peritectic steel solidification under continuous cooling and crack susceptibility. *ISIJ International*, v. 48, n. 4, p. 454-6, 2008.

Recebido em: 30/09/2011

Aceito em: 11/01/2011