



ESTUDO DA CONTRAÇÃO DOS AÇOS PERITÉTICOS DURANTE A SOLIDIFICAÇÃO NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO¹

Leonardo José Silva de Oliveira²
André Afonso Nascimento³
Marco Túlio Dias Lima⁴
Roberto Parreiras Tavares⁵

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 no molde de lingotamento contínuo na ocorrência da reação peritética e, conseqüentemente, na intensidade de contração do aço durante a solidificação. Para tanto, foi proposta uma metodologia para avaliação da contração dos aços durante a solidificação. Com base nos resultados obtidos verificou-se que o aumento no fluxo de calor provoca alterações na intensidade de contração do aço peritético. Este fato pode estar relacionado com a cinética da ocorrência da reação peritética.

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

SOLIDIFICATION SHRINKAGE OF PERITECTIC STEELS IN THE CONTINUOUS CASTING

Abstract

The 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 densities between ferrite delta and austenite phases after solidification. In present paper, the influence of mould heat extraction on the peritectic reaction and, consequently, on the shrinkage of this steel grade during solidification was evaluated. For that, a methodology to evaluate the contraction of peritectic steels was proposed. Based on the results obtained, it was 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 increased the intensity of the solidification shrinkage.

Key words: Continuous casting; Solidification; Peritectic steels.

¹ Contribuição técnica ao 41º Seminário de Aciaria – Internacional, 23 a 26 de maio de 2010, Resende, RJ, Brasil.

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

³ Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Pesquisador do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.

⁴ Membro da ABM, Técnico Metalurgista, Assistente Industrial de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.

⁵ Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, PhD; Professor Associado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da UFMG; Belo Horizonte, MG.



1 INTRODUÇÃO

Atualmente, muitos estudos estão sendo realizados com o intuito de se compreender os mecanismos de formação dos defeitos superficiais no lingotamento contínuo de placas. Para tanto, o entendimento da transferência de calor e da formação da pele solidificada no molde são de fundamental importância.

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

Uma prática comum no lingotamento dos aços peritéticos, para se evitar a formação de defeitos e irregularidades na pele de aço, é a utilização de um resfriamento moderado ao longo da solidificação no molde. Este resfriamento moderado é realizado utilizando um pó fluxante com uma tendência a cristalizar em temperaturas mais altas, inibindo a transferência de calor por radiação.

Em função desses aspectos, nesse estudo foi avaliada a influência das condições de extração de calor no molde de lingotamento contínuo na ocorrência da reação peritética e, conseqüentemente, na intensidade de contração do aço durante a solidificação. Para a realização deste estudo, foi proposta uma metodologia, baseada em métodos de extensimetria, para avaliação da contração dos aços durante a solidificação. Os sensores foram instalados em um equipamento especialmente desenvolvido para promover a solidificação do aço em situação semelhante à do lingotamento contínuo.

2 REAÇÃO PERITÉTICA

A reação peritética ocorre quando um líquido e uma fase sólida primária se transformam em uma fase sólida secundária. Em geral, a fase secundária crescerá perifericamente sobre a fase primária. Este é o fato pelo qual a reação leva o nome de peritética.⁽¹⁾ A Figura 1 apresenta um desenho esquemático do mecanismo proposto para a evolução da reação peritética durante a solidificação.

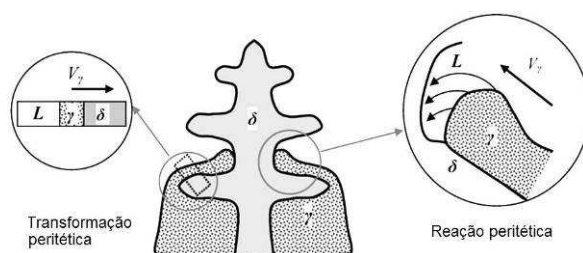


Figura 1 – Mecanismo de solidificação dos aços peritéticos.⁽²⁾

A reação peritética processa-se em dois estágios: a reação peritética e a transformação peritética. No primeiro instante da reação, existe uma rápida transformação da ferrita delta (δ -Fe) para austenita (γ -Fe) no ponto peritético, ou seja, as fases ferrita delta, líquido e austenita coexistem em um ponto. Depois, o crescimento da austenita procede até uma completa aniquilação da ferrita delta, através da difusão, e supõe-se que este processo seja bastante lento.⁽³⁾

A reação peritética ocorre em torno de 1.493°C e é afetada fortemente pela taxa de resfriamento, devido à rápida difusão do carbono. Foi mostrado experimentalmente, por meio de solidificação direcional e observações

microestruturais, que a temperatura da reação peritética diminui com o aumento da taxa de resfriamento. A uma taxa de resfriamento muito alta, a transformação peritética ocorre muito rapidamente.⁽⁴⁾

A variação volumétrica originada pela mudança da estrutura cristalina, cúbica de corpo centrado (CCC) para cúbica de face centrada (CFC), 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, pó fluxante inadequado, além de outras, pode provocar o aparecimento de defeitos superficiais e subsuperficiais nas placas.

A transformação peritética e a contração atingem intensidades máximas para aços peritéticos com teores de carbono entre 0,11% e 0,17%. Para estes aços, a espessura da pele de aço solidificada é bastante desigual, devido à competição entre os fenômenos de contração, originada pela mudança de estrutura cristalina (ferrita- δ /austenita), e de expansão, promovida pela pressão ferrostática. A Figura 2 apresenta gráficos mostrando o efeito da contração em função do teor de carbono (2a) e a contração como um efeito direto no fluxo de calor (2b).

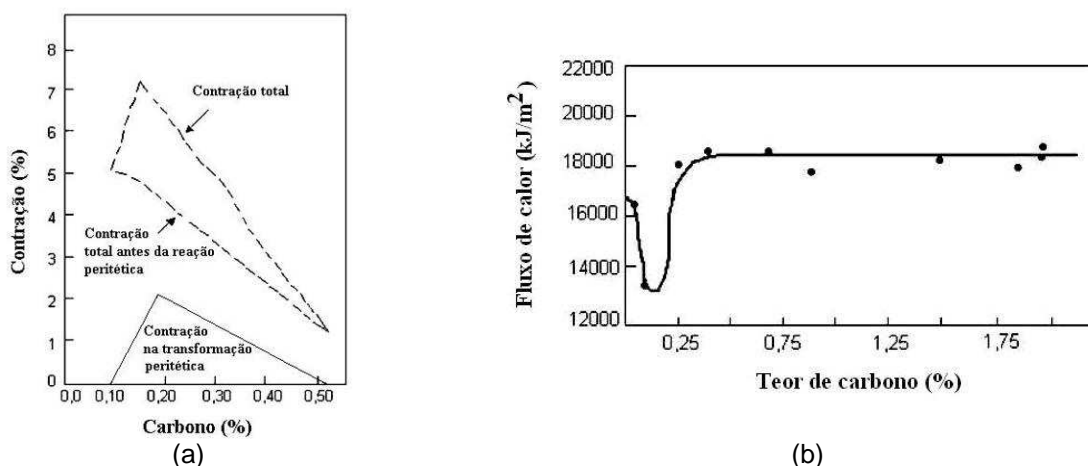


Figura 2 – Efeito do teor de carbono na contração do aço (a) e no fluxo de calor (b).⁽⁵⁾

Na Figura 2 (a) observam-se as contrações calculadas antes e após a reação peritética e a resultante da reação. As contrações mostradas provocam uma tendência à formação de depressões na superfície da placa levando à redução do fluxo de calor no molde, como visto na Figura 2 (b). Esse fato acaba gerando uma formação não uniforme da pele de aço no molde.

A pele de aço solidificada de uma maneira não uniforme resulta, em virtude do seu contato de forma intermitente com o molde de lingotamento contínuo, em uma redução da extração de calor. A redução da extração de calor no molde origina uma estrutura cristalina com grãos grosseiros e, de acordo com Mintz et al.,⁽⁶⁾ essas regiões são mais susceptíveis a trincas a quente. A Figura 3 apresenta uma ilustração esquemática mostrando a diferença de estrutura cristalina na pele de aço solidificada entre um aço alto ou baixo carbono e um médio (peritético).

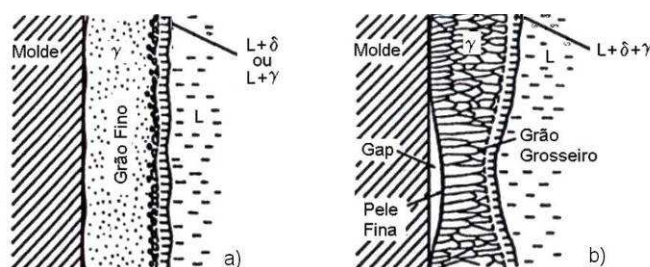


Figura 3 – Ilustração esquemática da estrutura cristalina da austenita na pele de aço solidificada: (a) aço baixo e alto carbono; (b) aço médio carbono (peritético).⁽⁶⁾

Segundo Schimidt e Josefsson,⁽⁷⁾ uma maior tendência à formação de trincas a quente está associada à presença de uma estrutura cristalina com grãos austeníticos mais grosseiros. Entretanto, de acordo com Mintz et al.,⁽⁶⁾ o tamanho de grão tem pouca influência na origem da trinca existente na superfície da placa, mas está diretamente relacionado com a sua propagação para profundidades críticas.

Outro aspecto é que a resistência do conjunto ferrita delta e austenita será definida pelo comportamento da fase mais fraca, neste caso pela ferrita delta. Isto é importante para a integridade dos aços peritéticos durante a solidificação no molde quando a pele formada deve suportar as tensões térmicas, as tensões devido à contração, dentre outras. Durante a solidificação, a baixa resistência da ferrita pode fazer com que ela não resista a estas tensões podendo causar trincas e, em certos casos, rompimento de pele.⁽⁸⁾ A ferrita, por outro lado, tem elevado grau de plasticidade, particularmente na região peritética. A austenita possui alta resistência e baixa plasticidade se comparada com a ferrita. Isto significa que durante a deformação pode ocorrer a concentração preferencial da deformação em uma fase, causando a trinca.⁽⁹⁾

De fato a reação peritética é muito importante quando se trata do lingotamento dos aços. Contudo a abordagem relativa à sua ocorrência, na maioria das vezes, leva em consideração aspectos de equilíbrio obtidas via diagramas. Durante a solidificação no molde as taxas de extração de calor são muito elevadas sendo que uma abordagem de equilíbrio pode induzir a erros. A altas taxas de resfriamento, as frações de equilíbrio podem ser alteradas modificando completamente a interpretação de contração referente à reação peritética. Assim, propõe-se a utilização de uma metodologia para avaliar o grau de contração em condições de extração de calor mais próximas possíveis das impostas no molde, buscando entender como a extração de calor afeta a contração dos aços peritéticos.

3 DESCRIÇÃO DA MONTAGEM EXPERIMENTAL

A solidificação do aço foi realizada utilizando um aparato especialmente desenvolvido.^(10,11) Ele é composto de um tubo de cobre refrigerado à água que é imerso no aço previamente fundido em um forno de indução sob atmosfera inerte. A solidificação ocorre ao redor do tubo refrigerado que, além de remover o calor, é responsável pela amostragem da camada sólida. 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 o teste. A Figura 4 apresenta um desenho esquemático do sistema desenvolvido.

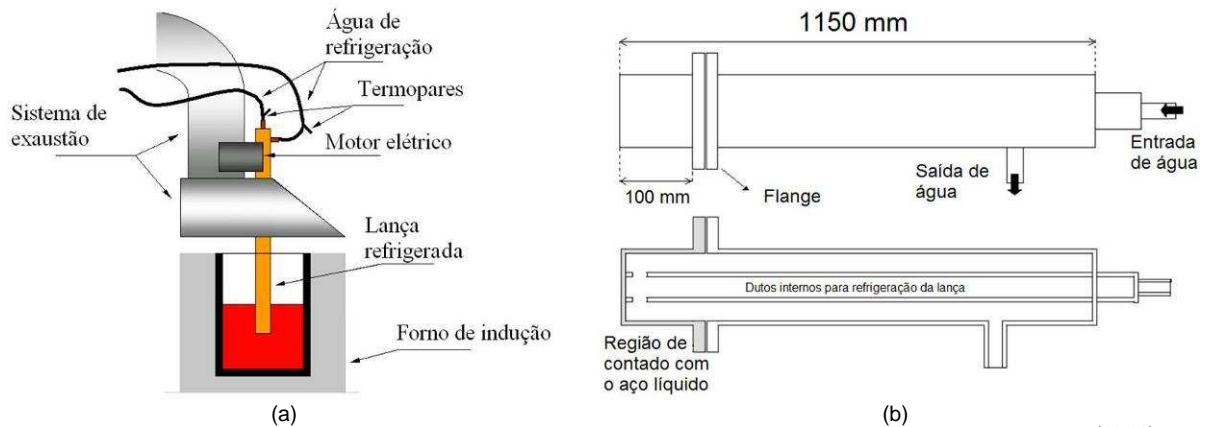


Figura 4 – Desenho esquemático do aparato (a) detalhamento da lança refrigerada (b).^(10,11)

No forno, a carga líquida de aço/pó fluxante é preparada e um motor elétrico, controlado remotamente, é utilizado para imergir e remover a lança de cobre no banho, por um período de tempo pré-determinado.

4 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA INTENSIDADE DE CONTRAÇÃO

Para avaliar a contração do aço durante a solidificação foi proposta a utilização de sensores do tipo *strain-gage*, comumente usados para avaliar micro deformações. O sensor foi instalado na parede interna do amostrador para medir a intensidade de contração do aço, pois, entende-se que, ao se solidificar o aço gera uma força compressiva no amostrador. A Figura 5 apresenta um desenho esquemático da montagem e do tipo de sensor utilizado.

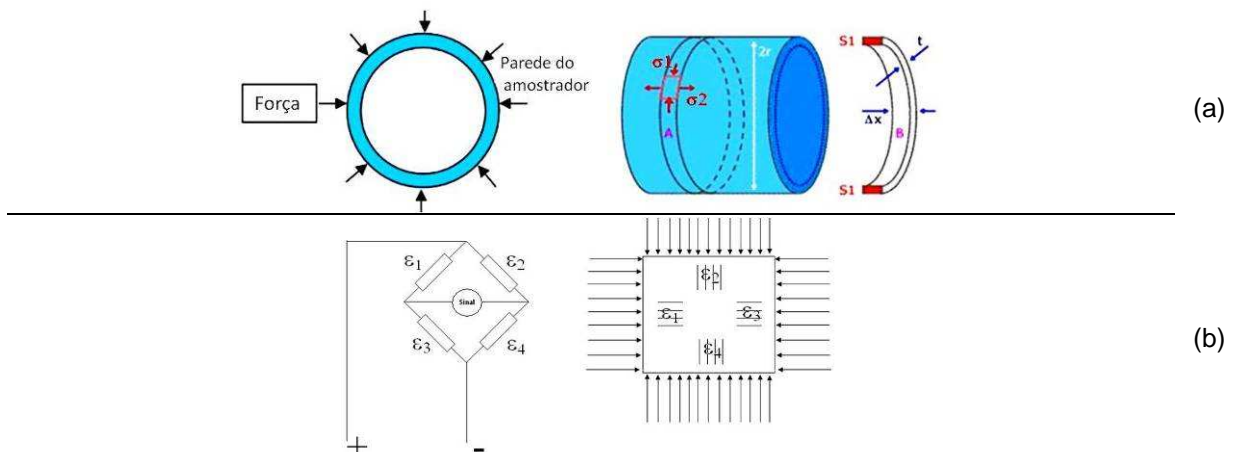


Figura 5 – Diagrama de forças durante a solidificação do aço em torno do amostrador de cobre (a) e desenho esquemático de um “strain-gage” de ponte completa (b).

Considerando que, em um cilindro de parede fina, as forças que atuam em suas paredes são distribuídas ao longo da direção longitudinal e da circunferência. Assim, as tensões medidas pelo sensor durante a compressão do amostrador são as σ_1 e σ_2 , conforme diagrama da Figura 5 (a). Para tanto, os sensores foram instalados na parede interna do amostrador seguindo a orientação destas forças.

Como o amostrador foi introduzido no aço/pó fluxante líquidos, mesmo sendo refrigerado, é possível que a dilatação térmica do cobre interfira na medição. Assim, para se evitar a interferência da dilatação térmica, um extensômetro de ponte



completa foi utilizado. Este sensor utiliza o arranjo de quatro elementos resistivos, conforme visto no desenho esquemático apresentado na Figura 5 (b).

Considerando o arranjo proposto, o efeito da dilatação volumétrica do cobre, causada pela temperatura do aço líquido, pode ser desprezada, pois, a dilatação deve atuar igualmente em todas as direções do amostrador. Assim, as tensões geradas no sistema podem ser descritas conforme equações a seguir:

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

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_M + \varepsilon_T \quad \varepsilon_2 = +\varepsilon_M + \varepsilon_T \quad \varepsilon_3 = -\varepsilon_M + \varepsilon_T \quad \varepsilon_4 = +\varepsilon_M + \varepsilon_T \quad (2)$$

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

Nas equações acima, e é a deformação do amostrador; ε índice 1, 2, 3 e 4 são a deformação medida em cada elemento resistivo; c é uma constante e ε índice M e T são as deformações de origem térmica e mecânicas do sistema.

Conforme as relações mostradas nas equações 1, 2 e 3, os efeitos da dilatação térmica se anulam devido ao arranjo dos elementos resistivos, resultando somente no sinal referente à força de contração do aço durante a solidificação.

5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O primeiro passo consiste em se carregar o forno com o aço que será avaliado. Depois que a carga foi fundida, tanto a temperatura quanto a composição química foram ajustadas para os valores objetivados. Em seguida imergiu-se o amostrador de cobre utilizando três diferentes vazões de água de refrigeração.

Dois aços de composição química diferentes foram utilizados e para cada aço foi utilizado um pó fluxante de composição química específica. A Tabela 1 apresenta a composição química dos aços e a Tabela 2 apresenta a composição química dos pós fluxantes. Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros utilizados nos testes.

Tabela 1 – Composição química dos aços

Aço	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
A4	0,49	0,60	0,15	0,0170	0,0010	0,002	0,020	0,010	0,020	0,002

Tabela 2 – Composição química dos pós fluxantes

Pó Fluxante	Aplicação	Composição (% w/w)								
		CaO	SiO ₂	Na ₂ O	F-	K ₂ O	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO
P1	Peritético	38,7	32,7	5,39	6,52	0,37	4,89	0,46	0,23	3,31
P2	Alto carbono	28,4	29,9	12,00	4,18	0,52	3,83	0,30	0,05	0,42

Tabela 3 – Condições de teste

Aço	Vazão de água (l/min)	Tempo de imersão (s)	Pó fluxante
A3	16, 20 e 27	60	P1
A4	16, 20 e 27	60	P2

Durante os testes de solidificação a contração foi medida usando o sensor de deformação. Os sinais do sensor foram obtidos utilizando um sistema de aquisição de dados. O aço alto teor de carbono foi utilizado como base de comparação devido a sua diferença de comportamento durante a solidificação.



6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 6 apresenta as curvas típicas de variação do ΔT ($T_{saída} - T_{entrada}$) da água de refrigeração. A Figura 6 é referente a testes em triplicata realizados com a vazão de 27 l/min para a composição A3 e A4.

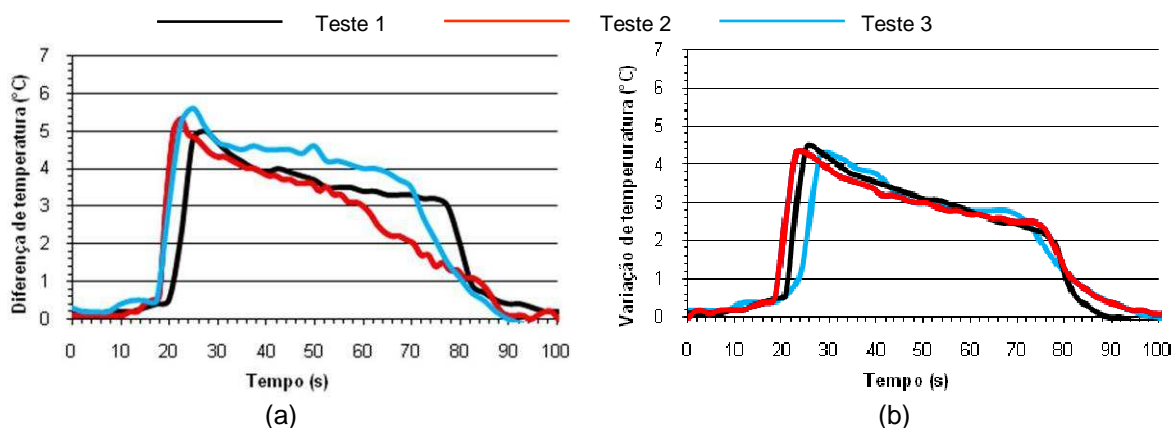


Figura 6 - Diferença de temperatura de entrada e saída da água de refrigeração com o tempo de teste: (a) aço A3 vazão 27 l/min e (b) Aço A4 vazão 27 l/min.

Baseando-se nos valores da variação da temperatura da água de refrigeração, calculou-se a extração de calor, utilizando-se a equação (4).

$$q = Q/A = (m C_p \Delta T)/A \quad (4)$$

Na equação (4), m é a vazão de massa 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 (m^2).

A Tabela 4 apresenta os valores obtidos para o ΔT 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 vazão de água.

Tabela 4 – Variação de temperatura máxima e fluxo de calor para cada condição de teste

Aço	ΔT máximo (K)	q máximo (kW/m^2)	q médio (kW/m^2)	Vazão de água (l/min)
A3	7,0	1567	1007	16
	6,1	1707	1036	20
	5,3	2002	1239	27
A4	5,8	1299	857	16
	4,8	1343	911	20
	4,3	1625	1129	27

Conforme Tabela 4, a variação na vazão da água de refrigeração implica em um aumento na extração de calor, conforme esperado. É também esperado que, com o aumento da extração de calor haja um aumento na espessura solidificada, pois a força motriz para o avanço da frente de solidificação é a extração de calor.

A Figura 7 apresenta uma micrografia da amostra obtida após os 60 segundos de imersão nas vazões de 16 l/min, 20 l/min e 27 l/min para o aço peritético A3.

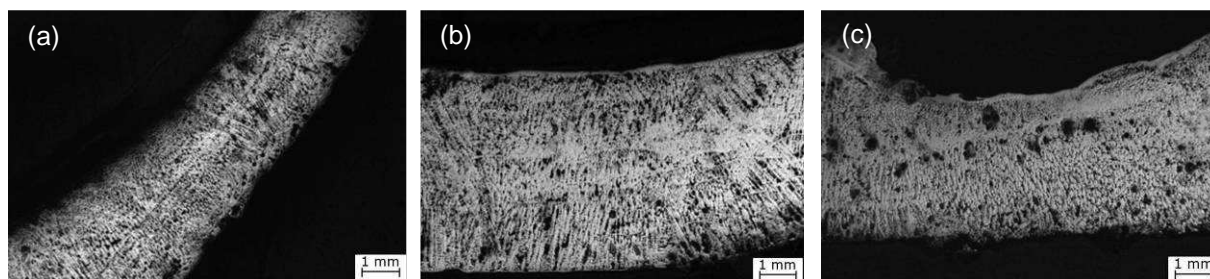


Figura 7 – Micrografia das amostras do aço A3 com ataque de ácido pícrico saturado: (a) 16 l/min, (b) 20 l/min e (c) 27 l/min.

Para se conhecer a variação de espessura em função da vazão de água, foram realizadas medidas da espessura da camada de aço formadas durante o processo de solidificação. A Figura 8 apresenta os valores das espessuras desta camada, medida em cada amostra, para cada nível de vazão. Foram realizadas para cada amostra cinco medidas de espessura em posições ao longo da circunferência da amostra na metade da sua altura.

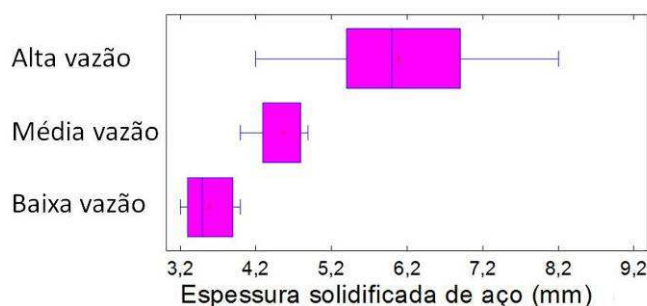


Figura 8 – Espessura da camada solidificada de aço para aço A3.

A Figura 8 mostra que há um aumento da espessura da camada de aço solidificada com o aumento da vazão de teste. Os valores apresentados na figura 8 mostram também que, para a vazão de água mais elevada, há uma tendência da pele de aço se tornar 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.

As alterações na morfologia da pele podem ser visualizadas nas micrografias da Figura 7. Além das variações de espessura da camada solidificada a altas vazões, ela se torna bastante irregular. Tanto a variação de espessura quanto a morfologia irregular podem favorecer a formação de defeitos, pois as irregularidades funcionam como concentradores de tensão e a variação de espessura causa alteração da resistência mecânica da camada solidificada.

A alteração de extração de calor mostra um efeito significativo na espessura e 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 comportamento durante a solidificação de cada um. Para isso, realizou-se uma simulação, utilizando termodinâmica computacional, com o intuito de entender a trajetória de solidificação dos aços em estudo. A Figura 9 apresenta a variação da fração de fases com a temperatura para cada composição.

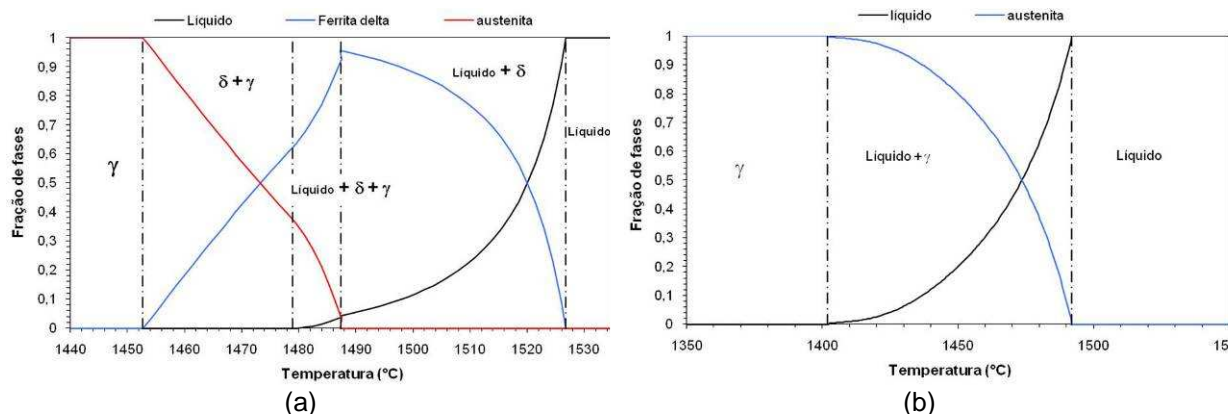


Figura 9 – Variação da fração de fases durante a solidificação: (a) aço A3 e (b) aço A4.

Conforme visto na Figura 9, os aços A3 e A4 apresentam uma grande diferença de comportamento durante a solidificação. É possível observar o comportamento de um aço peritético para o aço A3 e de um alto carbono para o aço A4. Para o aço A3, durante a solidificação, a primeira fase sólida a se formar é a fase ferrita delta (δ), que aumenta de proporção à medida que a temperatura diminui. Quando a temperatura atinge aproximadamente 1.487°C, começa ocorrer o desaparecimento simultâneo do líquido e da ferrita com conseqüente formação da austenita (γ), 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 desta faixa de temperatura, as fases presentes são a ferrita delta e a austenita. Para o aço A4, o primeiro sólido a se formar é a austenita, que vai aumentando sua proporção até que o aço esteja totalmente sólido, não havendo nenhum outro tipo de reação.

Durante a realização dos testes de solidificação o sensor de deformação realizou as leituras referentes a cada teste. A Figura 10 apresenta exemplos dos resultados de tensão medidos durante os testes de solidificação dos aços A3 e A4 para uma vazão de 27 l/min.

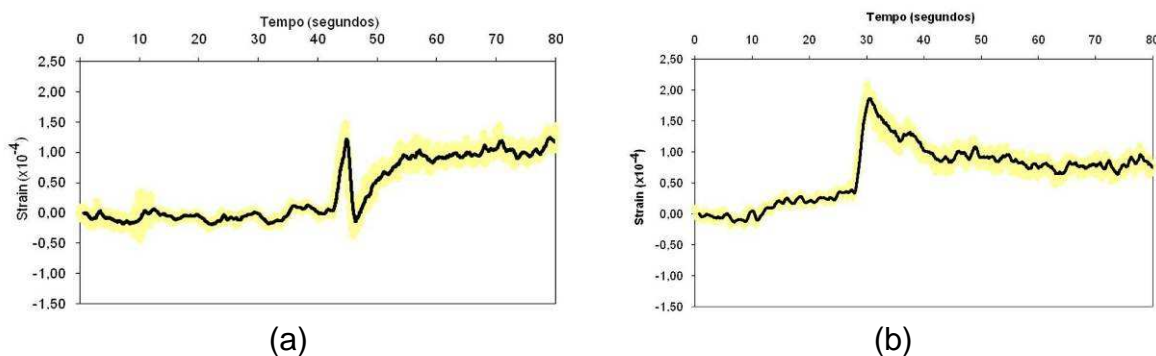


Figura 10 - Variação de tensão durante a solidificação medida pelo extensômetro para uma vazão de 27 l/min e tempo de imersão de 60 segundos: (a) aço A3 e (b) aço A4.

Como observado na Figura 10, o sistema respondeu fornecendo uma variação de sinal ao longo do teste. Nos gráficos, 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 a temperatura de *liquidus* é alcançada, 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 no estado sólido. A variação volumétrica causada pela redução de temperatura do líquido durante a solidificação, apesar de relevante para o processo de lingotamento contínuo, 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 os dois aços se comportaram de maneira diferente quando se alterou a vazão de água no teste, ou seja, os aços apresentam 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 11.

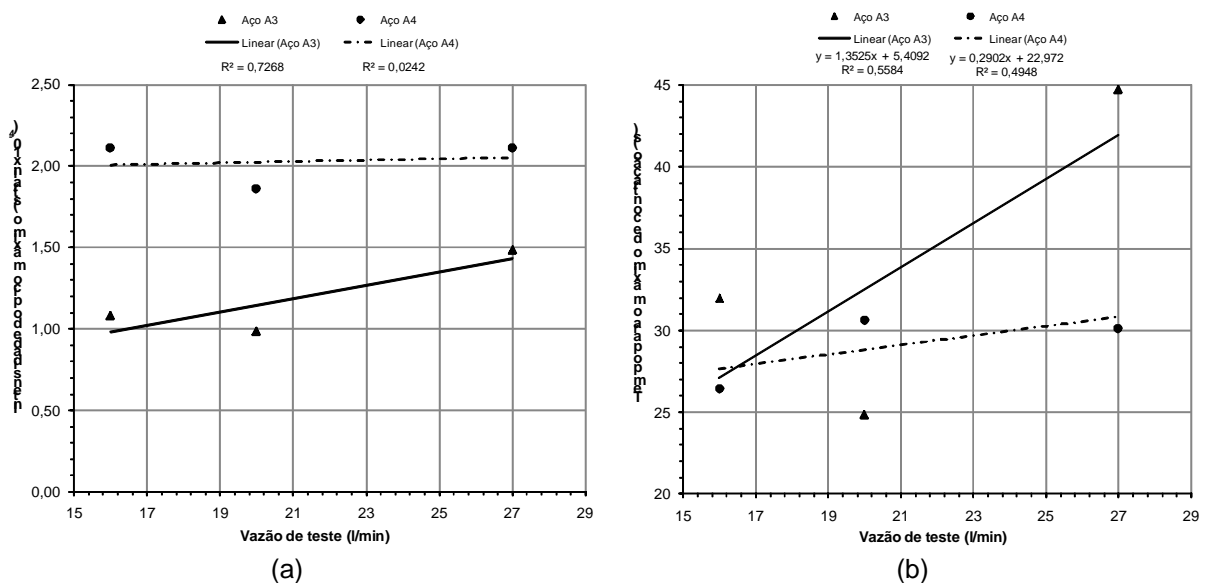


Figura 11 - Variação da intensidade do pico de contração (a) e do tempo para ocorrência do máximo de contração (b) com a vazão de água durante o teste.

Os dados apresentados nas Figuras 11 (a) mostram que existe uma correlação entre a vazão de água (extração de calor) e o máximo de contração para o aço A3, o que não ocorre para o aço A4. Para o aço A3, verifica-se que com o aumento da extração de calor a intensidade de contração também aumenta.

Conforme Figura 11 (b) 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 extração de calor o tempo para a ocorrência do pico de contração é retardado. Neste caso, ambos os aços apresentaram este comportamento, entretanto, o aço A3 apresenta um maior atraso em relação ao aço A4.

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 Fredrickson,⁽¹⁾ tem uma forte relação com velocidade de resfriamento.

Como a solidificação é um processo cinético, a alteração da 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, inevitavelmente, fora das condições previstas para o equilíbrio.

Sobre a contração dos aços peritéticos, estudou Mondragón et al.⁽¹²⁾. Eles 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 12 apresenta a variação da contração em função da fração de sólidos calculada por estes autores.

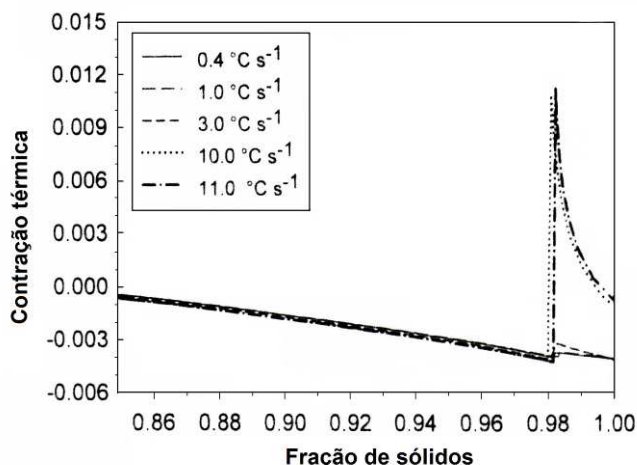


Figura 12 – Relação entre a contração térmica e a fração solidificada para diferentes taxas de resfriamento.⁽¹²⁾

Conforme Figura 12, há um progressivo aumento da contração principalmente para taxas de resfriamento maiores que 3°C s^{-1} . Considerando taxas de solidificação maiores, 10°C s^{-1} e 11°C s^{-1} a contração é particularmente superior e ocorre para fração de sólido perto de 0,98. Esta fração de sólido está de acordo com a ocorrência da reação peritética (Figura 9 a).

Os resultados obtidos neste estudo estão de acordo com as previsões teóricas levantadas por Mondragón et al.⁽¹²⁾ Neste caso, entende-se que o aumento na 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 quantidade de contração.

Finalmente, entende-se que associando uma maior intensidade de contração com a condição morfológica da pele solidificada (mais irregular) entende-se que o aumento da extração de calor irá afetar significativamente a sensibilidade destes aços em relação à formação de trincas. Neste caso, deve-se trabalhar com níveis de extração de calor moderados para a solidificação dos aços peritéticos. É importante também, controlar todas as variáveis que afetam a extração de calor, 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.

7 CONCLUSÕES

A metodologia proposta para a avaliação da contração do aço durante a solidificação se mostrou promissora. Durante os testes de solidificação foi possível medir a intensidade de contração do aço.



A partir dos testes de solidificação realizados verificou-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 propagação de trincas na pele formada.

Utilizando a metodologia proposta, a contração do aço peritético foi estudada em três níveis diferentes de extração de calor. Com base nos resultados obtidos verificou-se que o aumento na 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. Ambos 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*, Mar. 1976, pp. 77-86.
- 2 STEFANESCU, D. M. Microstructure Evolution during the Solidification of Steel. *ISIJ International*, v. 46, n. 6, 2006, p. 786–794.
- 3 DHINDAW, B. K.; ANTONSSON, T.; TINOCO, J.; FREDRIKSSON, H. Characterization of peritectic reaction in medium-alloy steel through microsegregation and heat-of-transformation studies. *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 35A, setembro de 2004, pp. 2869-2879.
- 4 MATSUURA, K., et al. A solid-liquid diffusion couple study of a peritectic reaction in iron-carbon system. *ISIJ International*, v.33, n.5, p.583-587, 1993.
- 5 VALDARES, C. A. G. *Curso de Lingotamento Contínuo de Placas*. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006.
- 6 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.
- 7 SCHIMDT, L., JOSEFSSON, A. Formation and avoidance of transverse cracks in continuously cast slabs From curved-mould machines. *Scand. J. Metall.* v. 3, n. 5, p. 193-9, 1974.
- 8 ROYZMAN, S. E. Continuous casting of peritectic steel. In: *Steel Technology International 2000*. London: Sterling Publications. 1999. p. 82, 84, 86-87.
- 9 HARA, M.; KIKUCHI, H.; HANAO, M.; KAWAMOTO, M. MURAKAMI, T. WTANABE, T. High speed continuous casting technologies of peritectic medium thickness steel slabs. *La Revue de Métallurgie*. abril, 2002.
- 10 OLIVEIRA, L. J. S., et. al. *Comportamento dos aços peritéticos durante a solidificação no molde de lingotamento contínuo*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2008. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).
- 11 OLIVEIRA, L. J. S. de; TAVARES, R. P. Simulação em laboratório da solidificação dos aços no molde de lingotamento contínuo. In: 40º Seminário de Aciaria – Internacional. Brasil: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, São Paulo, SP, 2009.
- 12 MONDRAGÓN, J. J. R.; TREJO, M. H.; ROMÁN, M. J. C.; SOLÍS, H. T. Description of the hypo-peritectic steel solidification under continuous cooling and crack susceptibility. *ISIJ International*, v.48, n.4, p.454-460, 2008.