



RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS OPERACIONAIS E TRINCAS SUPERFICIAIS LONGITUDINAIS EM PLACAS DE AÇOS PERITÉTICOS PRODUZIDAS POR LINGOTAMENTO CONTÍNUO¹

Gustavo Esposti Henrique²
Jayme Alves de Souza Junior³
Henrique Silva Furtado⁴
José Roberto de Oliveira⁴
Estéfano Aparecido Vieira⁴

Resumo

Durante o processo de lingotamento contínuo dos aços, a incidência de trincas longitudinais é muito comum nos graus de composição peritética. Isto ocorre principalmente devido a contração existente dada a diferença do fator de empacotamento entre a ferrita “ δ ” e a austenita “ γ ” durante o processo de solidificação. Neste trabalho a partir de dados industriais da empresa Arcelor Mittal Tubarão – Serra ES, estudou-se a influência de alguns parâmetros operacionais sobre a incidência das trincas longitudinais. Tentou-se correlacionar a incidência de trinca com o tipo de pó fluxante, velocidade de lingotamento e dimensões da placa. Os resultados trazem conclusões de grande interesse e mostram que é possível aperfeiçoar o processo através do controle destas variáveis. Por exemplo, altas taxas de extração de calor aumentam a taxa de contração do aço favorecendo a formação de trincas.

Palavras-chave: Lingotamento contínuo; Trincas a quente; Aços; Peritéticos.

RELATIONSHIP BETWEEN OPERATIONAL PARAMETERS AND SURFACE LONGITUDINAL CRACKS IN PLATES OF PERITETIC STEEL, PRODUCED THROUGH CONTINUOUS CASTING

Abstract

In continuous casting of steels, longitudinal cracks incidence are very common in peritectic composition. This effect occurs mainly due the shrinkage that is function of packing factor difference between ferrite “ δ ” and austenite “ γ ” in solidification process. In this work from industrial data of the Arcelor Mittal Tubarão – Serra – ES, it was studied some parameter influence on the longitudinal cracks formation. It was tried to correlate crack formation with the flux type, casting speed and width of the plates. The results show conclusions with high relevance. Then it is possible to make improvements in the process through the control of those variables. For example, high rates of heat extraction increase the shrinkage rate of the steel so cracks are more favorable.

Key words: Continuous casting; Hot cracks; Steel; Peritectic.

¹ Contribuição técnica ao 43º Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2012, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Tecnólogo em Metalurgia e Materiais – IFES.

³ Mestrando em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Arcelor Mittal – Tubarão – Vitória - ES

⁴ Doutor em Metalurgia e Materiais – IFES. estefanovieira@ifes.edu.br



1 INTRODUÇÃO

Um dos principais desafios das grandes indústrias siderúrgicas é a redução do custo final de seu produto sem o comprometimento da qualidade. Esta prática se deve ao fato da grande concorrência *que valoriza as* empresas que oferecerem produtos com menor custo, desejável qualidade, além de responsabilidade ambiental e social. A produção mundial de aço em 2011 foi de aproximadamente 1,1 bilhões de toneladas e o Brasil respondeu por aproximadamente 32 milhões de toneladas. No mundo, o lingotamento contínuo de aços é o principal processo utilizado para a solidificação de aços e. Em 2011 cerca de 96,7% da produção total Brasileira foi através deste processo.⁽¹⁾

Este trabalho apresenta um estudo acerca *da ocorrência de defeito “trinca superficial longitudinal” (TSL) que pode ocorrer em placas produzidas via lingotamento contínuo*, que gera custo adicional ao processo de produção de placas. Seu desenvolvimento foi realizado tendo como base de informações, os dados de processo de cada placa produzida na “*máquina de lingotamento contínuo número dois*” (LC2) da *ArcelorMittal Tubarão* no período de 01/01/2006 à 16/11/2006, totalizando 91000 placas de aço. Neste caso, foi estudada a incidência (TSL) e sua relação com alguns parâmetros de processo do lingotamento contínuo. A Figura 1 apresenta um típico exemplo de TSL, *que geralmente ocorre nas faces largas das placas*.



Figura 1 – Trinca superficial longitudinal.⁽²⁾

Para que a placa de aço com TSL possa seguir seu destino programado (venda ou laminador de tiras a quente) é necessário passar por um processo de acabamento que elimine o defeito encontrado. Este é denominado escarfagem e é realizado durante o condicionamento da placa conforme mostra a Figura 2. No entanto, a escarfagem gera custo adicional na produção, que varia com a quantidade e intensidade das trincas presente na placa, ou seja, com o grau de dificuldade de remoção do defeito.



Figura 2 – Processo de escarrafagem para remoção de defeitos nas placas.⁽³⁾

A TSL é um defeito grave que pode levar ao sucateamento da placa, caso não se consiga sua remoção. Ela pode ocorrer em comprimentos que variam de 50 mm até 12m e profundidades entre 3 mm a 20 mm. Este defeito possui a característica de se originar nos momentos iniciais da solidificação do aço no molde. O mecanismo de formação proposto atribui a origem deste defeito à extração irregular de calor no molde.⁽⁴⁾ Neste caso, durante a solidificação do aço líquido, a superfície interna da placa já solidificada atinge uma faixa de temperatura no qual o aço possui baixa ductilidade junto à frente de solidificação. Simultaneamente, tensões de tração, decorrentes da contração de solidificação agem ao longo da espessura da placa, mais intensamente próximo ao centro da face larga. A extração irregular de calor agrava este processo gerando pontos de maior fragilidade onde a tensão é concentrada além do limite de resistência do material.

A TSL ocorre mais freqüentemente nos aços onde a concentração de ligas, principalmente o teor de carbono, favorece a reação peritética ($\delta + L \leftrightarrow \gamma$). Esta reação onde o líquido (L) reage com a fase cúbica de corpo centrada (δ) formando a fase cúbica de face centrada (γ), provoca uma elevada contração volumétrica, aumentando assim os níveis de tensões na superfície da placa em solidificação.

A minimização da TSL, bem como o retrabalho posterior da placa, é feito com um controle rigoroso de alguns parâmetros de processo que têm relação direta com o defeito. Assim, o objetivo deste trabalho foi correlacionar a incidência deste defeito com as algumas variáveis de processo.

A Figura 3 apresenta a diferença de densidade entre as fases ferrítica (δ) e austenítica (γ), em função da concentração de carbono no aço.⁽⁵⁾ Como pode ser observado existe uma faixa de carbono onde esta diferença é significativa, ou seja a reação peritética é mais intensa. Devido a este fenômeno, os aços nesta faixa de carbono são mais propensos a formação de TSL, além de acidentes operacionais como os rompimentos de pele.⁽⁶⁾

Este defeito superficial pode ainda se agravar em decorrência de condições operacionais desfavoráveis, como desalinhamento da máquina de lingotamento contínuo, flutuações do nível de aço no molde, valores de superaquecimento do aço líquido acima do especificado e pó fluxante inadequado além de outros.⁽⁶⁾

A transformação peritética impõe contrações volumétricas que podem atingir valores máximos de 4% em aços com teores de carbono em torno de 0,1%C. Estas, como dito anteriormente, podem provocar a formação de rugosidades que são pontos de concentração de tensões, conseqüentemente nucleadores de trincas. Para estes aços, conforme mostra a Figura 4a, a espessura da pele solidificada é



bastante desigual, devido à competição entre os fenômenos de contração e o de expansão, este último promovido pela pressão ferrostática. De fato, a Figura 4b mostra que o “gap” originado pela contração volumétrica provoca uma redução na transferência de calor entre o aço e o molde, permitindo o reaquecimento da parte da placa que está sob o efeito do “gap”, o que torna a pele de aço solidificada nesta região menos espessa do que em suas extremidades, devido à redução considerável da transferência de calor com o molde, e permite o aumento do tamanho do grão austenítico, tornando-o mais grosseiro, fato que provoca uma redução da resistência mecânica neste local e deixa a região mais susceptível a ocorrência de trincas.⁽⁶⁾

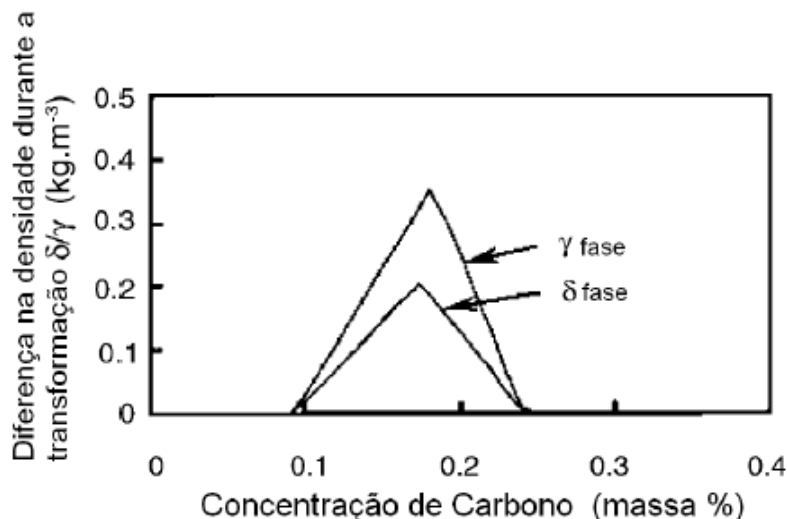
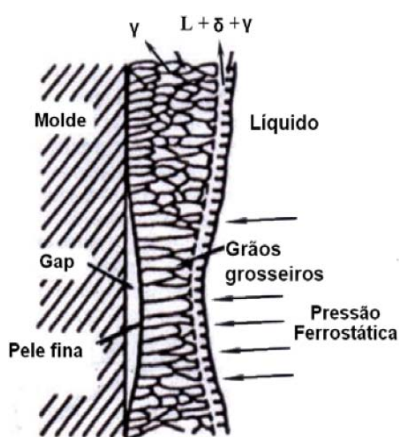
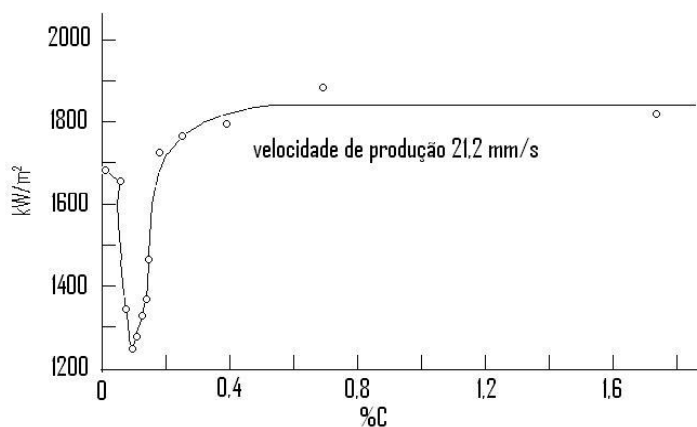


Figura 3 – Diferença de densidade entre as fases ferrita delta (δ) e austenita (γ), com a variação de carbono no aço.⁽⁵⁾



(a)



(b)

Figura 4 – Transferência de calor no molde. (a) Ilustração esquemática apresentando a formação do gap pela contração volumétrica.⁽⁷⁾ (b) Variação do fluxo médio de calor no molde em função da concentração de carbono do aço.⁽⁸⁾

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho baseou-se no estudo da incidência de TSL e sua correlação com os parâmetros do processo de fabricação, a fim de explicar o porquê



da frequência de tal defeito. Conforme já dito antes, escolheram-se os dados operacionais da máquina de lingotamento contínuo LC2 da Arcelor Mittal Tubarão. Dentro de um universo produtivo, foi feita a identificação das placas que apresentaram o defeito de TSL. Neste caso, foi realizada uma divisão das placas de aço a serem analisadas em categorias quanto à porcentagem de carbono, sendo a categoria 18C a de maior interesse neste trabalho, pois é nela que se situa o intervalo de %C que ocorre a reação peritética (Tabela 1). A quantidade de placas analisadas para esta categoria foi de 28.451 de um universo de 91.000 placas.

Tabela 1 - Divisão das placas de aço em categorias quanto à %C

CATEGORIA	FAIXA DE %C CORRESPONDENTE	QUANTIDADE DE PLACAS ANALISADAS	%
030C	%C \leq 0,030	22022	24,2
078C	0,030 < %C \leq 0,0779	36340	39,9
18C	0,078 \leq %C \geq 0,18	28451	31,3
23C	0,18 < %C \geq 0,2349	2835	3,1
55C	0,235 \leq %C \leq 0,5453	1352	1,5

No universo estudado, podemos observar que 31,1% da produção referem-se a placas do tipo 18C. Além disso, a Figura 5 mostra que do total de placas produzidas, 451 apresentaram o defeito TSL e destes 403 ou 89,4% correspondem a placas da categoria do tipo 18C.

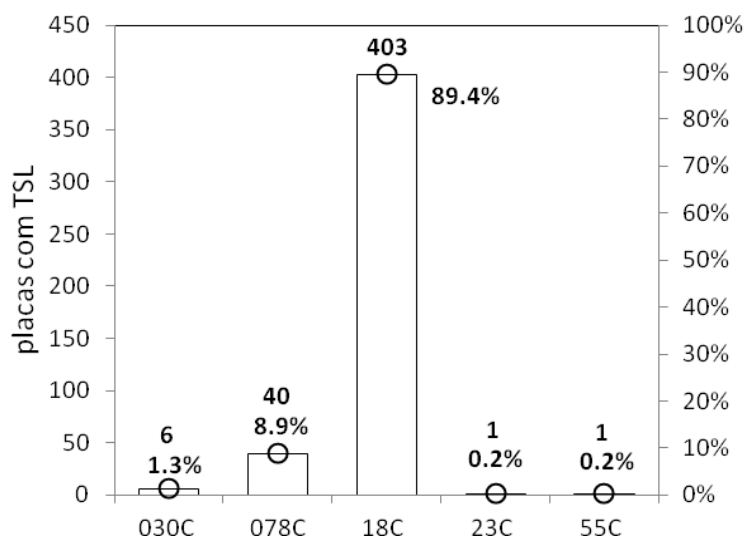


Figura 5 – Influência da porcentagem de carbono na incidência do defeito TSL.

Relacionando a quantidade de ocorrências de TSL com a quantidade de placas produzidas, em especial, dentro da categoria dos aços médio carbono peritéticos, é possível analisar a influência de alguns parâmetros operacionais na incidência de TSLtais como: i) dimensão da placa (largura); ii) velocidade de lingotamento [m/min]; iii) tipo de pó fluxante.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro parâmetro que foi relacionado com o índice TSL foi largura da placa. A Figura 6 mostra que o índice de TSL é 19 vezes maior quando a largura



média passa de 1.250 mm para 1.850 mm. Este resultado está consistente com a literatura, haja visto que o aumento da largura promove uma maior contração da pele solidificada (maior volume solidificado), que como apresentado anteriormente pode ser bastante irregular dada a natureza peritética do aço em questão. Além disto, devido ao maior contato placa- molde, espera-se um aumento nas tensões de atrito. Desta forma, estes efeitos combinados parecem provocar um aumento na incidência da TSL.⁽⁹⁾

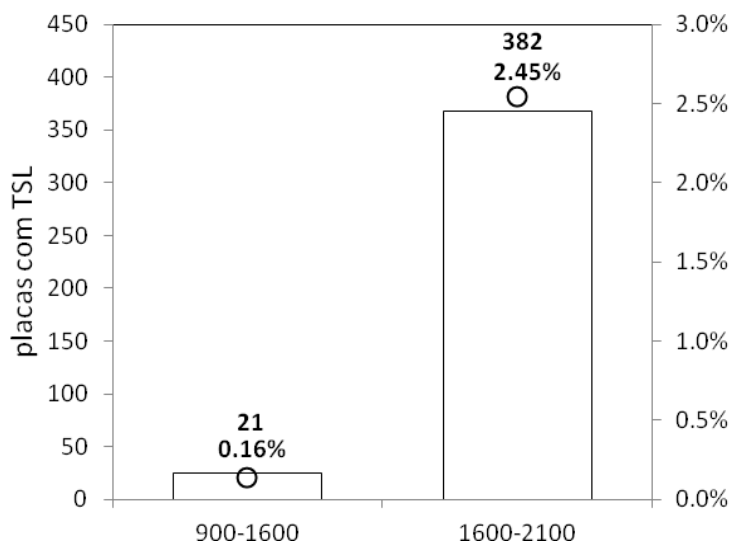


Figura 6 – Influência da largura das placas no índice TSL.

Já na Figura 7 os resultados mostram que uma maior velocidade de lingotamento (até um determinado limite) parece favorecer a redução do índice TSL. Contudo, este resultado não pode ser analisado isoladamente. Na verdade, a velocidade de lingotamento a ser escolhida é também função do tipo de pó fluxante e este, dentre outras propriedades, possui valores de viscosidade e de coeficiente de transferência de calor específicos, os quais afetam diretamente a propensão à formação das TSL nas placas de aço.

Em princípio um fluxante apropriado (e largamente utilizado em aços peritéticos) deveria apresentar características físico-químicas apropriadas à formação de um filme cristalino, que fosse capaz de reduzir a transferência de calor do aço líquido para o molde por radiação e ao mesmo tempo provocar uma boa lubrificação da interface placa-molde, de forma a reduzir as tensões de atrito. Baseado nestas premissas, o resultado da Figura 7 sugere que a maior ocorrência de TSL em velocidades de lingotamento baixas possa estar associada à maior contração volumétrica decorrente do elevado tempo de residência do aço líquido no molde, o que provocaria um aumento significativo nas tensões de tração. Além disto, pode-se supor também uma baixa eficiência em relação à lubrificação do molde, o que geraria um aumento nas tensões de atrito. Por outro lado os resultados desta figura levam a conclusão de que as propriedades do pó fluxante utilizado na sua determinação estão mais adequadas à velocidades de lingotamento entre 1 m/min e 1,5 m/min. Nesta faixa ambas a transferência de calor e a viscosidade estariam otimizadas para eliminar o risco de ocorrência de TSL.

A Figura 8a mostra um resultado muito interessante apresentado por Schwerdtfeger⁽⁹⁾ onde foram testados dois tipos de pós fluxantes para aços peritéticos. Pode-se destacar que o resultado do uso do fluxante A de maior viscosidade (0,80 Pa.s) em baixas velocidades de lingotamento resultou em um



menor índice de TSL, ou seja, inverso ao comportamento apresentado pelo fluxante B (de menor viscosidade), assim como do resultado da Figura 7.

O aumento da velocidade de lingotamento para um dado pó fluxante implica em uma camada cristalina menor e uma pele de aço mais delgada, ou seja, um aumento na taxa de extração de calor. Da mesma forma, as tensões de atrito placa-molde devem ser intensificadas. Ambos os fenômenos favorecem a formação de TSL. Contudo, o resultado da Figura 7 e do fluxante de baixa viscosidade da figura 8a apresentam comportamentos opostos ao descrito. Isto sugere que estes fluxantes devem apresentar características físico-químicas mais adequadas às velocidades maiores, propriedades estas que devem reduzir a rugosidade na frente de solidificação enquanto melhoram a lubrificação da interface placa-molde.

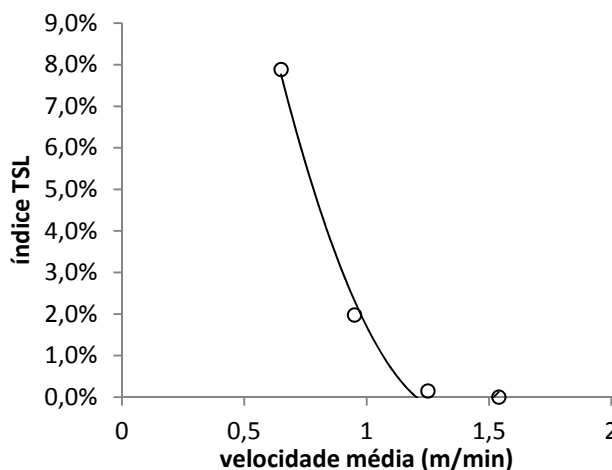


Figura 7 – Influência da velocidade de lingotamento no índice TSL.

Por outro lado, o resultado do fluxante A de Schwerdtfeger⁽⁹⁾ (Figura 8a), assim como o apresentado por Garcia et al.⁽⁸⁾ (Figura 8b) apresentam comportamento semelhante ao descrito anteriormente, ou seja, quanto maior a velocidade de lingotamento mais freqüente é a formação de TSL. Neste caso, pode estar ocorrendo um aumento da rugosidade da frente de solidificação e/ou uma deterioração da lubrificação da interface placa-molde devido a maior viscosidade do pó fluxante.

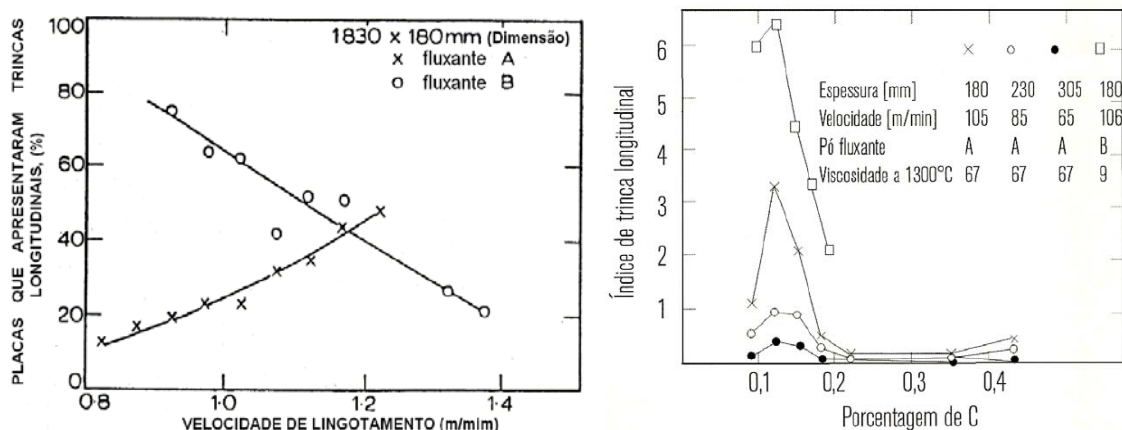


Figura 8 – Efeito da velocidade de lingotamento no índice de TSL (a) comparação entre dois fluxantes com diferentes viscosidades à 1300°C, fluxante A (0,80 Pa.s), fluxante B (0,15 Pa.s).⁽⁹⁾ (b) Efeito da concentração de carbono nas trincas longitudinais.⁽⁸⁾



Em resumo, se as características cristalinas dos materiais fluxantes utilizados nos resultados das Figuras 7, 8 e 9 forem semelhante, então o fator relevante destes casos para a formação da TSL seria a redução do atrito placa molde, decorrente de diferentes habilidades de lubrificação, ou seja fluxantes de alta viscosidade lubrificariam melhor em baixas velocidades de lingotamento enquanto os de baixa viscosidade seriam mais apropriados para altas velocidades de lingotamento.

Neste trabalho, dois diferentes tipos de pós fluxantes para aço peritético foram estudados. Conforme mostra a Figura 9, foi observada a ocorrência de um maior Índice de TSL para as placas em que se utilizou o fluxante tipo B, que apresenta um menor valor de viscosidade quando comparado com o fluxante tipo A. Estes resultados estão consistentes com o apresentado anteriormente, sugerindo que a variável relevante seria a lubrificação da interface placa-molde, uma vez que a uniformidade da transferência de calor, que minimiza a rugosidade na frente de solidificação estaria garantida pela característica cristalina do fluxante peritético.

Assim, baseando-se na velocidade de lingotamento, coeficiente de transferência de calor e viscosidade do fluxante, conclui-se que o controle da incidência de TSL depende, dentre outros, da escolha de um tipo de fluxante que possua propriedades que se relacione de forma harmônica com os parâmetros do processo de lingotamento contínuo e com a composição química do aço. Na maioria das vezes, esta relação é obtida de forma empírica nas indústrias, obviamente levando-se em conta alguns princípios básicos já consolidados ao longo de muitos estudos nesta área. Assim, a escolha dos parâmetros de processo não dependem da análise de uma única variável, e no caso do fluxante tipo B deste trabalho, trata-se de um pó “flex” desenvolvido para trabalhar numa faixa de carbono mais ampla melhorando o desempenho da máquina de lingotamento como um todo.

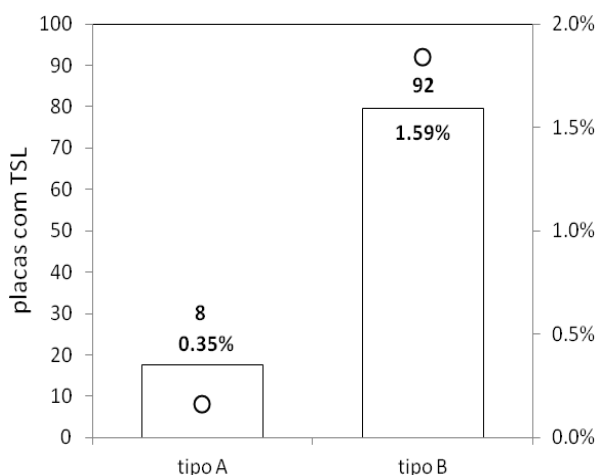


Figura 9 – Efeito da viscosidade do pó fluxante para aço peritético no índice de TSL. Tipo A - 0,22 Pa.s e Tipo B - 0,07 Pas.

É importante ressaltar que a capacidade de promover uma extração de calor suave e uniforme não depende da viscosidade do fluxante, mas da sua capacidade de formar um filme sólido com característica cristalina que reduz a transferência de calor por radiação. De fato, como pode ser observado na Figura 10, independente se a viscosidade é baixa ou elevada, reduzidas taxas de extração de calor promovem uma menor frequência de TSL. Uma vez garantida esta propriedade, a viscosidade passa a ser a variável importante, como apresentado anteriormente.

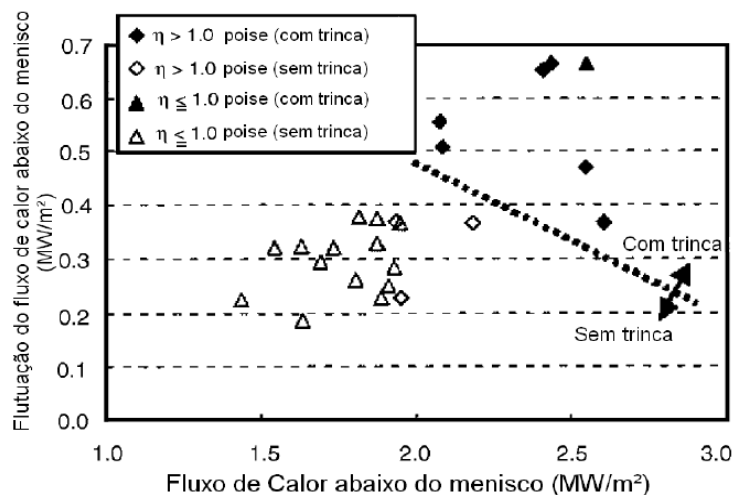


Figura 10 – Efeito o fluxo de calor na ocorrência de TSL

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos na Arcelor Mittal Tubarão são coerentes com o previsto teoricamente, bem como estão de acordo com os resultados obtidos por outros autores. Assim, neste trabalho as conclusões mais relevantes são:

As placas produzidas com largura entre 1.600 mm e 2.100 mm apresentaram maiores Índices de TSL que as produzidas com largura entre 900 mm e 1.600 mm.

O comportamento do Índice de TSL foi decrescente com o aumento da velocidade de lingotamento. Notou-se que na produção das placas com a utilização do pó fluxante para aço peritético de menor viscosidade obteve-se maior valor de Índice de TSL.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Cia Siderúrgica *Arcelor Mittal Tubarão*, Serra-ES pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- 1 Instituto Aço Brasil. IBS, 2011. Instituto Brasileiro de Siderurgia – Estatísticas: www.acobrasil.org.br/site/portugues/index.asp. Acesso em 07/11/2011.
- 2 FURTADO, H. S. **Lingotamento Contínuo de Placas: Capítulo 8 - Controle de Qualidade de Placas**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, p. 194 -195, 2005.
- 3 RIZZO, E. M. S. **Introdução aos processos de lingotamento dos aços**: São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006.
- 4 FURTADO, H. S. **Lingotamento Contínuo de Placas: Capítulo 8 - Controle de Qualidade de Placas**: São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, p. 194 -195, 2005.
- 5 EMI, T.; FREDRIKSSON, H. **High-speed continuous casting of peritectic steels**. Stockholm, Sweden: Elsevier, 3 - 9 p, 2005.
- 6 BARBOSA, F. A.; ANDRADE, S. O. C. **Lingotamento Contínuo de Placas: Capítulo 9 - Ductilidade dos Aços a Altas Temperaturas**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. 206; 221; 222 p.



- 7 RIZZO, E. M. S. **Introdução aos processos de lingotamento dos aços: São Paulo:** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006. p. 10; 19 - 21; 32; 57; 89; 98; 113 - 116.
- 8 GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A.; CHEUNG, N. **Lingotamento Contínuo dos Aços. São Paulo:** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006.
- 9 SCHWERDTFEGGER, K. **Course on Continuous Casting and Solidification of Steels.** Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil: UFMG, p 132 - 135, 2002.