

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA OSCILAÇÃO DO MOLDE SOBRE A QUALIDADE DE PLACAS

Rafael Fernandes Reis ¹Everton Paço Cunha ²Alexandre de Freitas Gomes Mendonça ³

Resumo

A solidificação do aço no molde é determinante para a qualidade superficial da placa, considerando que os principais defeitos tendem a se formar nos primeiros estágios de formação da pele. Assim, diversos parâmetros do processo que afetam a solidificação no molde devem ser considerados e um deles é a oscilação do molde. A partir de amostras obtidas no processo industrial, duas técnicas para avaliar o efeito da oscilação foram desenvolvidas com base em: perfilometria a laser e metalografia. Em relação à primeira, desenvolveu-se uma análise da profundidade das marcas de oscilação. Foi comprovada a correlação da profundidade dessas marcas com o tempo de estripamento negativo. A diminuição do tempo de estripamento em 10% reduziu a profundidade média das marcas de oscilação de 0,32 para 0,28 mm, portanto 12,5%. A segunda refere-se ao ataque metalográfico, que se mostrou eficiente para visualização, via microscopia, do gancho na base da marca de oscilação. Bolhas de argônio e partículas de fluxante podem ser aprisionadas na região do gancho de oscilação, e eventualmente ocasionar defeitos nos produtos laminados. O uso das técnicas forneceu subsídios à tomada de ações visando à diminuição da profundidade do gancho e da marca de oscilação, resultando em melhoria da qualidade superficial das placas produzidas.

Palavras-chave: Oscilação do molde; Profundidade da marca de oscilação; Gancho de oscilação.

EVALUATION THE EFFECT OF OSCILLATION MOLD ON SLAB QUALITY

Abstract

Mold Steel solidification is very important for slab surface quality, considering that the main defect happens during the first stages of shell formation. Thus, many process parameters which influence mold steel solidification should be considered, and one of them is the mold oscillation. Samples of the narrow side of the slabs were obtained from the industrial process and two techniques were developed to evaluate oscillation effect: laser profilometry and metallography. Regarding to laser profilometry, it was developed an analysis method of oscillation mark depth. It was proven the correlation of the average oscillation mark depth with the negative strip time. The reduction on negative strip time by 10% decrease the oscillation mark depth of 0,32 to 0,28 mm, therefore 12,5%. The second technique regards to metallography etching based on picric acid, which showed useful to view, by optical microscopy, the hook at the base of oscillation mark. Argon bubbles and flux particles can be captured at oscillation hook region, and eventually cause defects on rolled products. The use of techniques presented in this study provided subsidies for decision making aiming the reduction of oscillation mark depth and hook, resulting in surface quality improvement of slabs produced.

Keywords: Mold oscillation; Oscillation mark depth; Oscillation hook.

I INTRODUÇÃO

O sistema de oscilação é formado por um complexo conjunto de componentes que sustentam as placas de cobre do molde, refrigeradas a água. Este sistema impõe um movimento vertical com uma frequência e amplitude

previamente estabelecidas, com o objetivo principal de induzir o escoamento de pó fluxante líquido para o *gap* e reduzir a fricção entre a pele de aço em solidificação e as placas de cobre do molde.

¹Centro de Pesquisas, Usinas Siderurgicas de Minas Gerais S.A – USIMINAS, Ipatinga, MG, Brasil. E-mail: rafael.reis@usiminas.com

²Unidade de Lingotamento, Usinas Siderurgicas de Minas Gerais S.A – USIMINAS, Ipatinga, MG, Brasil.

³Unidade de Aciaria, Usinas Siderurgicas de Minas Gerais S.A – USIMINAS, Ipatinga, MG, Brasil.



A estratégia de oscilação do molde é definida pelo conhecimento dos parâmetros de oscilação e suas relações com a qualidade da placa. Esta correlação não é trivial, uma vez que diferentes parâmetros devem ser compreendidos e muitas vezes estão diretamente ligados a outras variáveis do processo. Além disso, a escolha da melhor estratégia de oscilação deve levar em consideração as limitações do próprio equipamento.

Na Figura 1 é apresentado um exemplo ilustrativo de uma curva de oscilação senoidal, sendo a linha escura a representação da posição do molde ao longo do tempo em um ciclo de oscilação. A linha pontilhada representa a velocidade de lingotamento e a linha clara a velocidade do molde. O tempo de estripamento negativo, que por conceito, é o tempo no qual o molde se move no mesmo sentido e mais rápido que o veio em solidificação, pode ser obtido pela subtração dos pontos destacados na Figura 1 pelas setas vermelhas.

A Equação 1, descrita por Szekeres [1] e Cibulka et al. [2], apresenta o cálculo do tempo de estripamento negativo, sendo f a frequência em ciclos por minuto [cpm], s o curso total em milímetros [mm] e v a velocidade de lingotamento em metros por minuto [m/min]:

$$t_n = \frac{60}{\pi f} \cos^{-1} \frac{1000v}{\pi s f} \quad (1)$$

O tempo de estripamento negativo é um fator crítico para a definição das estratégias de oscilação e está diretamente ligado à qualidade superficial das placas produzidas no lingotamento contínuo. Conforme pode ser visualizado na Figura 2, o tempo de estripamento negativo tem relação direta com a profundidade das marcas de oscilação. Tendo em vista que marcas de oscilação são concentradores de tensão, quando mais profundas há um aumento na probabilidade de ocorrência de trincas transversais.

Cibulka et al. [2] utilizaram dois sistemas acionamento da oscilação do molde, um mecânico e outro hidráulico para avaliar a qualidade superficial. Concluiu-se que o sistema de oscilação hidráulico produziu tarugos com marcas de menor profundidade. A metodologia empregada para avaliação da profundidade das marcas foi a microscopia ótica.

Conforme Sengupta et al. [4], as marcas de oscilação são acompanhadas pelo gancho (*hook*). O gancho se apresenta na forma de uma alteração microestrutural na subsuperfície da placa com origem na base da marca de oscilação.

Na Figura 3 é apresentado, com destaque, o gancho revelado no vale da marca de oscilação, podendo-se observar, também, a linha de origem do gancho e uma bolha ou inclusão nele aderida.

Os mecanismos de formação das marcas de oscilação e do gancho estão relacionados ao encurvamento parcial ou completo do menisco na junção entre o aço líquido e a placa de cobre. Na região do gancho pode ocorrer o aprisionamento de escória líquida de pó fluxante, inclusões e bolhas de gás, acarretando em problemas de qualidade superficial, tais como: esfoliamento (*slivers*) e gota fria (*blisters*) nos processos subsequentes de laminação.

Kadli et al. [5] estudaram o efeito da variação do nível de aço no molde de lingotamento de placas e suas consequências na formação de esfoliamento, sendo recomendado além do controle de nível, a busca pela menor profundidade das marcas de oscilação, especificação correta do fluxante e controle do fluxo de calor no molde.

Yang et al. [6] propõem um mecanismo de formação das marcas de oscilação a partir de simulações físicas e matemáticas, baseando-se nos campos de pressão na região do menisco. Conforme Figura 4, durante o tempo de estripamento negativo com o módulo de velocidade do molde mais elevado (t_3), tem-se o maior campo de tensões na região do menisco.

Neste contexto, se faz necessário não somente o aprimoramento das estratégias de oscilação com vistas à melhoria da qualidade superficial, mas também o desenvolvimento de técnicas e metodologias para avaliar o quanto a estratégia adotada reflete nas características morfológicas observadas na placa (profundidade e espaçamento das marcas de oscilação e ganchos formados).

Assim, este trabalho apresenta os resultados do uso de técnicas para avaliação, tanto das marcas, quanto dos ganchos de oscilação de forma a dar subsídios à melhoria da qualidade superficial das placas produzidas na Usiminas.

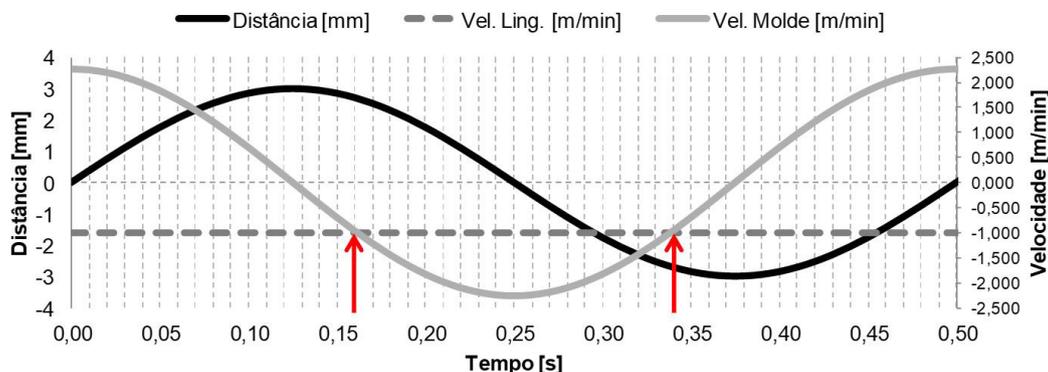


Figura 1. Representação gráfica para o cálculo do tempo de estripamento negativo.

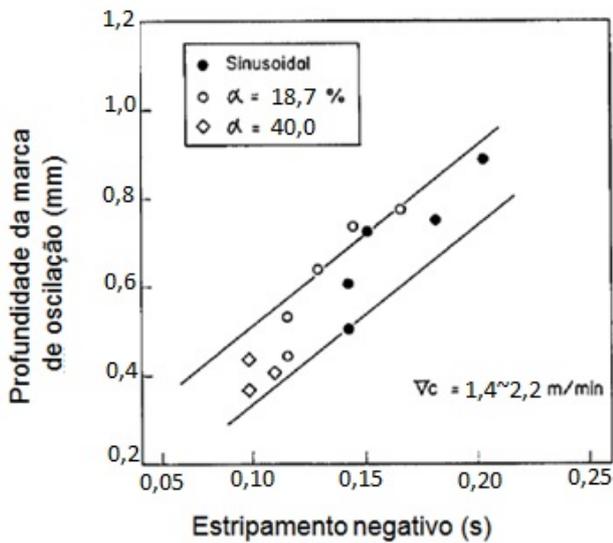


Figura 2. Efeito do tempo de estripamento negativo na profundidade das marcas de oscilação [3].

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A estratégia de oscilação adotada no presente trabalho é apresentada na Figura 5. Nesta estratégia a amplitude foi mantida constante e a frequência crescente a partir de certa velocidade de lingotamento. Por consequência, de acordo com a Equação 1, as variações na frequência implicam em alterações no tempo de estripamento negativo.

A partir de corridas devidamente acompanhadas e utilizando a estratégia de oscilação proposta, amostras foram retiradas nas faces estreitas de placas com intuito de submetê-las a análise de perfilometria a laser e metalográfica.

As amostras obtidas foram submetidas à decapagem ácida com intuito de se remover a camada de carepa aderida na superfície da placa. São apresentadas na Figura 6 fotografias de aspecto de uma amostra antes (a) e após (b) a decapagem.

Para análise da profundidade das marcas de oscilação foi utilizado perfilômetro a laser desenvolvido no Centro de Tecnologia Usiminas. O laser utilizado nestas leituras foi o

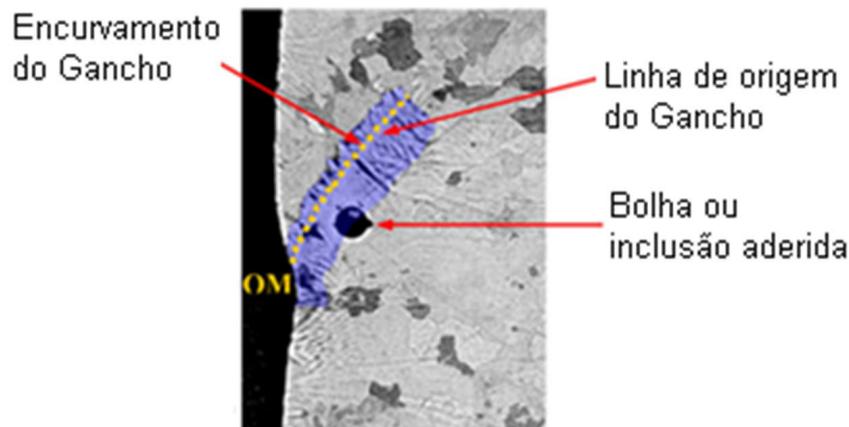


Figura 3. Gancho no vale da marca de oscilação [4].

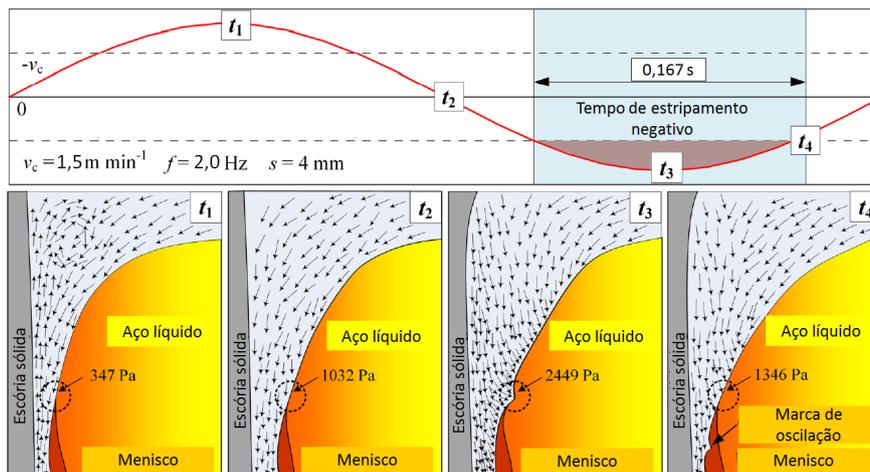


Figura 4. Avaliação do campo de pressão no menisco durante o ciclo de oscilação [6].

ANL2300RA. Este laser trabalha a uma distância de 30 mm do corpo de prova e do seu ponto central de medição. A faixa de medição entre ± 3 mm é garantida.

É mostrado na Figura 7 o aparato utilizado para análise de perfilometria (a) a laser da superfície e um exemplo de perfil 3D obtido (b).

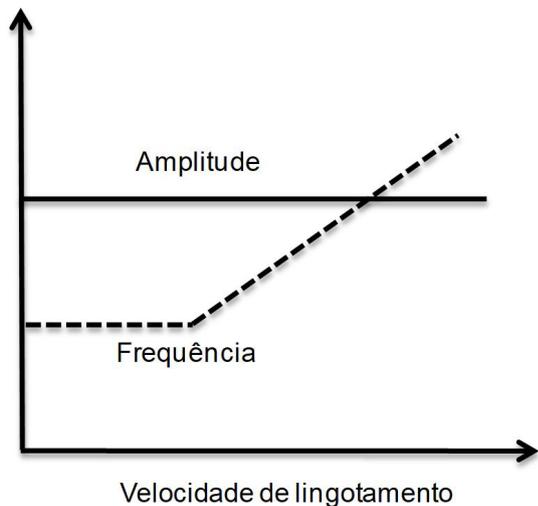


Figura 5. Estratégia de oscilação adotada.

De forma genérica, a metodologia de cálculo para a profundidade média é apresentada na Equação 2.

$$\bar{P} = \frac{(P_i - V_i) + (P_{i+1} - V_i)}{2} \quad (2)$$

A identificação dos picos e vales foi realizada via análise numérica dos pontos gerados em cada medição, conforme mostrado na Equação 2 e na Figura 8. Se o ponto de máximo está acima da linha média tem-se um pico e o mínimo abaixo da linha média trata-se de um vale. Esta lógica numérica foi a base para o desenvolvimento de um software para análise dos dados. O critério estabelecido consiste no cálculo da média local desde o primeiro par de picos (P_1 e P_2) e seu respectivo vale (V_1) até o último par de picos do perfil (P_i e P_{i+1}) e também o vale (V_i). Desta forma, foi calculada a média global da profundidade das marcas de oscilação de cada amostra a partir das médias locais.

Em cada amostra foram realizadas sessenta e cinco medições lineares para obtenção dos perfis topográficos da amostra, conforme apresentado na Figura 8. Tais medições geraram cerca de 2.500 pontos por perfil.

Após a varredura por perfilometria a laser, as amostras foram cortadas, embutidas e preparadas para ataque metalográfico. A solução de ataque consistiu na diluição de 5 g de ácido pícrico saturado em 500 ml de

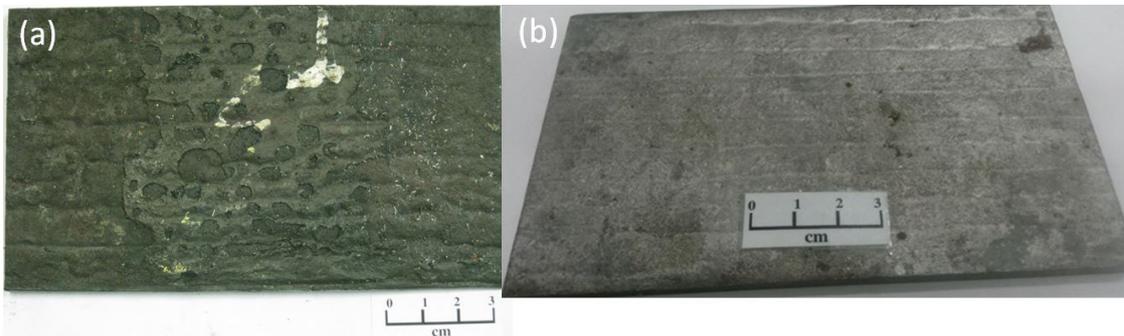


Figura 6. Aspecto da amostra antes (a) e após decaimento ácido (b).

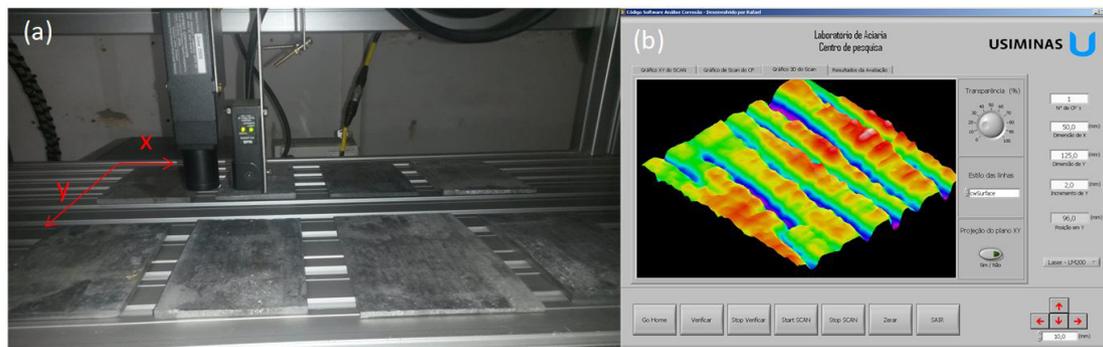


Figura 7. Perfilômetro a laser (a) e exemplo de perfil 3D obtido (b).

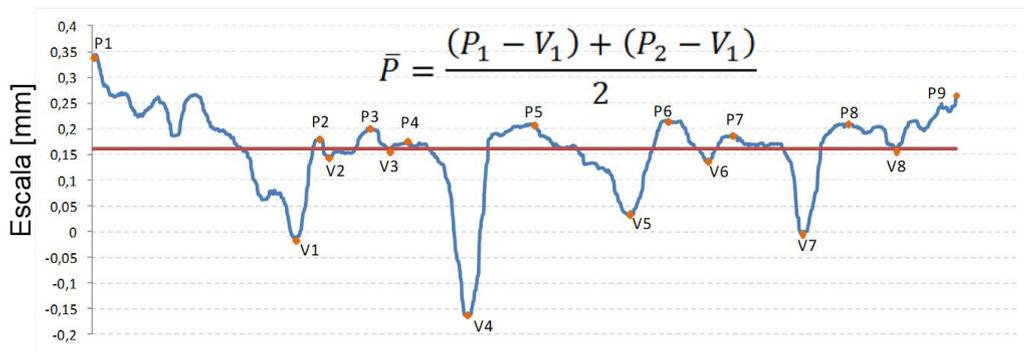


Figura 8. Exemplo de perfil obtido via perfilometria a laser.

água destilada e posterior adição de 10 ml de detergente neutro. O detergente tem a função de diminuir a tensão superficial da solução, aumentando o contato com a amostra. A temperatura da solução foi entre 55 e 60°C e o tempo de ataque foi de 5 minutos.

Após ataque, as amostras foram observadas utilizando técnicas de microscopia ótica e eletrônica de varredura.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 9 são apresentados os resultados agrupados por tempo de estripamento negativo, evidenciando o efeito deste parâmetro na profundidade das marcas de oscilação.

O teste de hipóteses realizado para comparação das médias comprovou estatisticamente que o grupo de amostras obtidas com estripamento negativo de 0,173 s é diferente dos grupos em que o estripamento negativo foi de 0,216 e 0,247 s, para um nível de confiança de 95%.

É apresentado na Figura 10 o efeito do tempo de estripamento negativo na profundidade das marcas de oscilação de forma comparativa com demais estudos [3,7-10]. Percebe-se melhor ajuste aos resultados obtidos por Schwerdtfeger et al. [7]. Observa-se que os estudos de Ohba e Kitade [8] e Normanton et al. [10] obtiveram inclinações similares, contudo com valores mais elevados.

Na Figura 11 é mostrada a fotografia obtida no microscópio ótico a título de exemplo, com ampliação original de 12,5X, evidenciando o gancho na base da marca de oscilação.

Shin et al. [11] identificaram uma correlação entre as profundidades do gancho e da marca de oscilação, apesar de comentarem que esta não é precisa estatisticamente, sugerindo que outras variáveis podem interferir no gancho. Neste trabalho tentou-se esta correlação, contudo também não foi possível obter uma confiabilidade no teste de hipóteses em função da dispersão dos dados obtidos.

Em algumas das amostras embutidas, observou-se a presença de partículas na subsuperfície na região do gancho, conforme Figura 12. Uma destas partículas foi analisada por microscopia MEV/EDS, revelando a presença de Al, Zr e O.

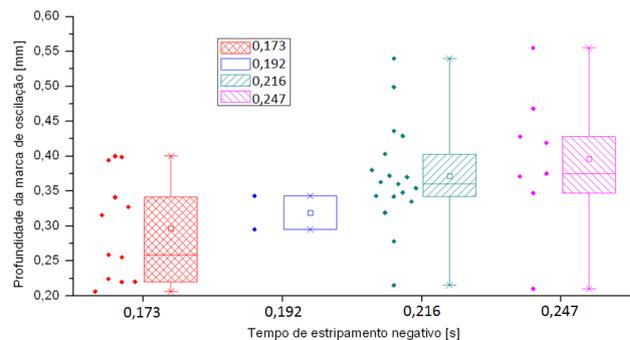


Figura 9. Dispersão da profundidade das marcas de oscilação em função do tempo de estripamento negativo.

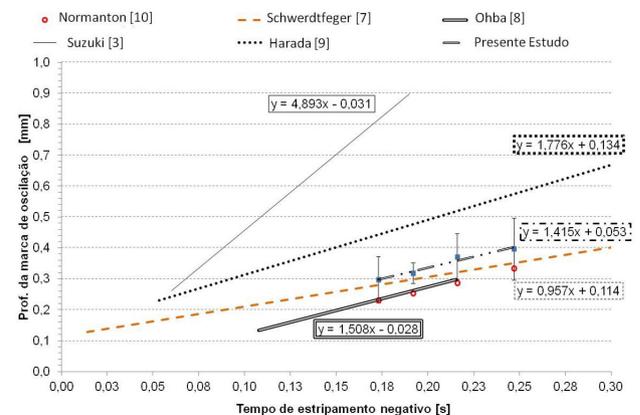


Figura 10. Efeito do tempo de estripamento negativo na profundidade das marcas de oscilação.

Como visto na Figura 12, percebe-se que dois tipos de partículas foram encontradas. Uma delas possivelmente de alumina (1) e outra um complexo de alumina e zircônia (2).

Os resultados obtidos mostram que as técnicas desenvolvidas fornecem informações confiáveis para a otimização dos parâmetros de oscilação do molde. Comprovou-se a existência de uma correlação entre a

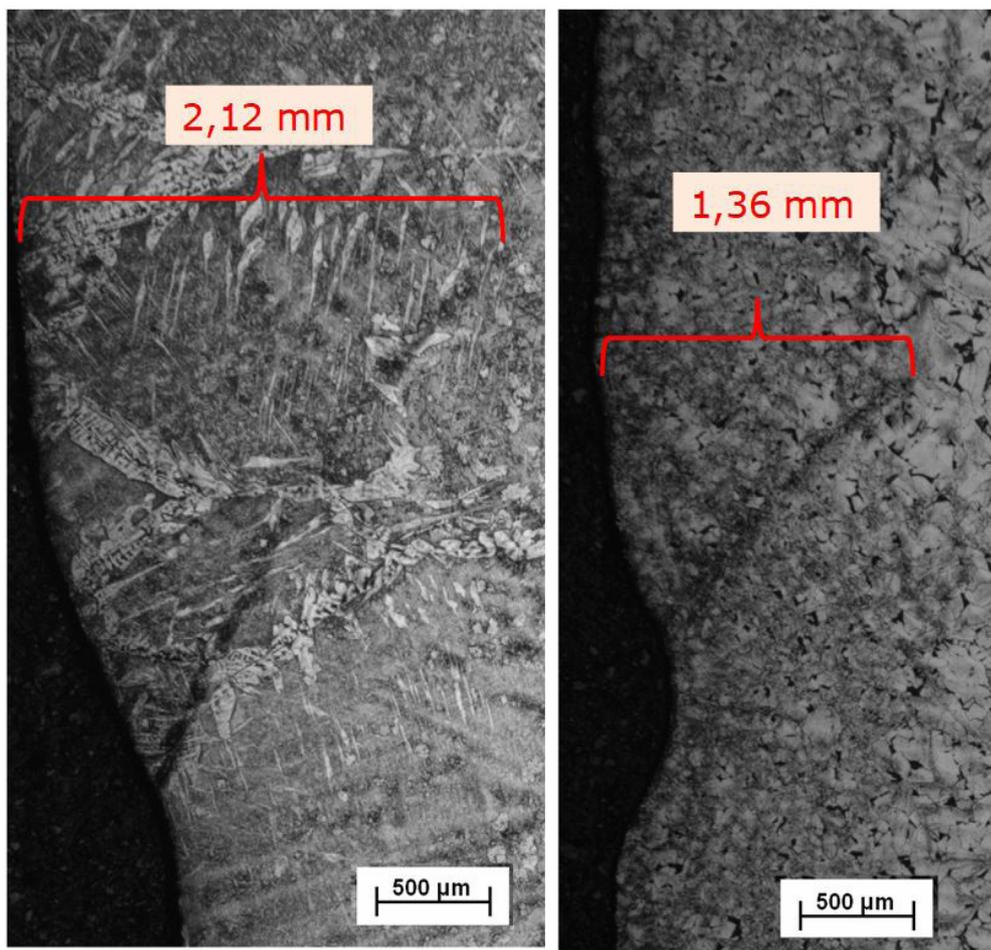


Figura 11. Gancho revelado na base da marca de oscilação.

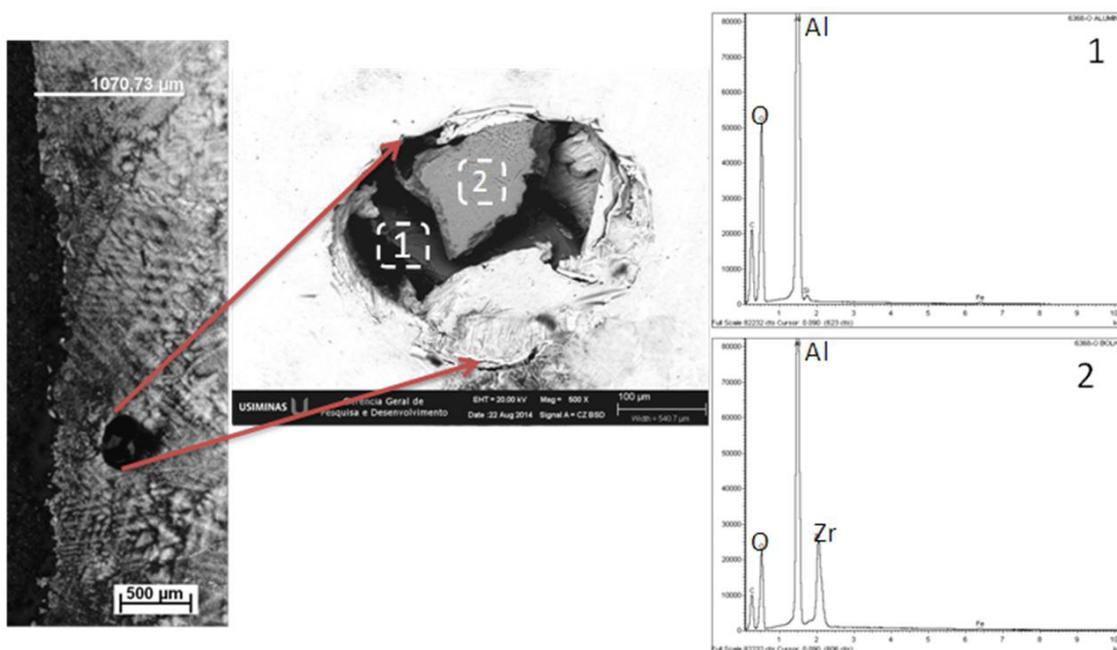


Figura 12. Resultado de microscopia eletrônica de varredura e análise por espectroscopia de energia dispersiva (MEV/EDS) em Partícula (1 e 2) aderida na base da marca de oscilação.

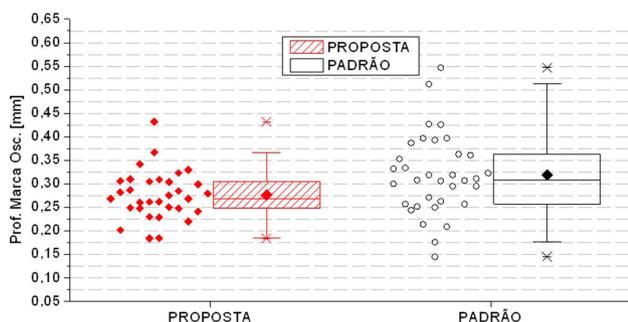


Figura 13. Gráfico comparativo de diferentes condições de oscilação e seu efeito na profundidade das marcas de oscilação (Prof. Marca Osc.).

profundidade das marcas de oscilação com o tempo de estripamento negativo, informação que pode ser utilizada para melhoria da qualidade superficial da placa.

Com base nos resultados obtidos foi proposta uma alteração nos padrões de oscilação para aços hipoperitéticos. Foi sugerida uma elevação da frequência de oscilação em aproximadamente 10% (PROPOSTA) para as mesmas condições de processamento, conforme gráfico da Figura 4.

A Figura 13 mostra o resultado de avaliação da profundidade das marcas de oscilação de forma comparativa. Percebe-se que a média para as amostras obtidas com a condição PROPOSTA é de 0,28 mm, sendo inferior a PADRÃO que foi igual a 0,32 mm. A redução percentual de profundidade média foi de 12,5%. Além disso, a distribuição obtida com o arquivo PROPOSTA apresentou menor dispersão nos dados.

Um teste *t student* de comparação das médias comprovou a diferença entre as duas populações, apresentando P-valor de 0,018 com 95% de confiança. Desta forma confirmou-se estatisticamente a redução da profundidade das marcas de oscilação, diminuindo a probabilidade de formação de trincas transversais em placas.

REFERÊNCIAS

- 1 Szekeres ES. Overview of mold oscillation in continuous casting. *Iron and Steel Engineer*. 1996;73(7):1-9.
- 2 Cibulka J, Krzok R, Hermann R, Bocek D, Cupek J, Michalek K. Impact of oscillation parameters on surface quality of cast billets. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2016;61:283-288.
- 3 Suzuki M, Mizukami H, Kitagawa T, Kawakami S, Uchida S, Komatsu Y. Development of a new mold oscillation mode for high-speed continuous casting of steel slabs. *ISIJ International*. 1991;31:254-261.
- 4 Sengupta J, Thomas BG. Visualization of hook and oscillation mark formation mechanism in ultra-low carbon slabs during continuous casting. *Journal of Metals* [página da internet]. 2006 [acesso em 3 fev. 2015] Disponível em: <http://www.tms.org/pubs/journals/jom/0612/sengupta/sengupta-0612.html>
- 5 Kadli R, Reddy V, Anilkumar S. The effect of mould level fluctuation in continuous casting of slab. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*. 2017;3:1823-1831.

4 CONCLUSÃO

Foi desenvolvida uma técnica de avaliação da profundidade das marcas de oscilação que permite inferir a respeito da qualidade superficial de placas. A perfilometria a laser mostrou-se uma ferramenta útil para tomada de decisões no processo de lingotamento contínuo. Comprovou-se a correlação da profundidade das marcas de oscilação com o tempo de estripamento negativo. A diminuição do tempo de estripamento em 10% reduziu a profundidade média das marcas de oscilação de 0,32 para 0,28 mm, portanto 12,5%.

Além da análise de superfície, foi desenvolvida uma metodologia para avaliar a subsuperfície das placas nas regiões próximas às marcas de oscilação. O objetivo principal era identificar e, conseqüentemente, possibilitar o estudo da morfologia do gancho (hook) na base da marca de oscilação. Neste sentido, foi adaptado e implementado um ataque metalográfico. Na análise preliminar realizada, além dos ganchos de oscilação, foram identificadas trincas na base da marca de oscilação, vazios indicando presença de bolhas de gás, possivelmente na subsuperfície de placas amostradas e também inclusões exógenas nas proximidades do gancho de oscilação.

O uso das técnicas apresentadas nesse estudo forneceu subsídios à tomada de ações visando à diminuição da profundidade do gancho e da marca de oscilação, resultando em melhoria da qualidade das placas produzidas.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos Pesquisadores Leonardo José Silva de Oliveira e André Afonso Nascimento pela contribuição técnica, os Técnicos de Pesquisa Hélio Alexandre Alves e Washington Sousa Oliveira pela prontidão durante os acompanhamentos industriais. É importante ressaltar a participação do Especialista Técnico Hiroaki Iiboshi nas inúmeras discussões e apoio direto no desenvolvimento do ataque metalográfico. Por fim, agradecemos a todos os participantes da área operacional que abraçaram a ideia desde o começo, representados por Alberto Cesar Soares Rodrigues.

- 6 Yang J, Meng X, Wang N, Zhu M. Oscillation-mark formation and liquid-slag consumption in continuous casting mold. *Metallurgical and Materials Transactions. B, Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 2017;(2): In press.
- 7 Schwerdtfeger K, Sha H. Depth of oscillation marks forming in continuous casting of steel. *Metallurgical and Materials Transactions. B, Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 2000;31:813-826.
- 8 Ohba Y, Kitade S. Austenite grain refining of as-cast bloom surface by reduction of oscillation mark depth. *ISIJ International*. 2008;48:350-354.
- 9 Harada S, Tanaka S, Misumi H, Mizoguchi S, Horiguchi H. A formation mechanism of transverse cracks on CC slab surface. *Iron and Steel Institute of Japan International*. 1990;30(4):310-316.
- 10 Normanton A, Ludlow V, Harris B, Hecht M, Däcker D. Technical steel research: casting, reheating and direct rolling. Mould powder consumption, melting and lubrication and their effects on mould heat transfer and subsequent surface quality of continuously cast slab. GMC Company; 2005.
- 11 Shin J, Lee G, Choi W, Kang S, Park J, Kim S, Thomas B. Effect of mold oscillation on powder consumption and hook formation in ultra low carbon steel slabs. *Iron and Steel Technology*. 2004;2(9):15-17.

Recebido em: 3 Jun. 2017

Aceito em: 5 Dez. 2017