

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO USO DE AGITADORES ELETROMAGNÉTICOS NA REMOÇÃO DO CALOR DE SUPERHEAT NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE AÇOS¹

Rodrigo Camargos Barrosos²

Antônio de Paula Gandra³

Matias Correa de Miranda⁴

José Ernesto de Azevedo Nadalon⁵

Leonardo Barboza Trindade⁶

André Carlos Contin⁷

Resumo

Estudos apontam que o uso de agitação eletromagnética é capaz de aumentar as regiões equiaxiais de solidificação. Este trabalho tem como principal motivação a redução de defeitos que podem estar relacionados à segregação e, conseqüentemente, à estrutura de solidificação. Dessa forma, buscou-se correlacionar a agitação eletromagnética e outras variáveis do processo, com a estrutura solidificada. Para auxiliar na compreensão dos fenômenos físicos, foi construído um modelo numérico para simular o agitador eletromagnético e os escoamentos produzidos na região do molde. Mapas de temperatura na saída do molde indicam uma clara relação entre a extração de calor e a intensidade de agitação. Testes realizados em planta indicam uma correlação entre o aumento da corrente de agitação e uma maior região equiaxial de solidificação.

Palavras-chave: Simulação numérica; Agitação eletromagnética; Extração de calor; Lingotamento contínuo de redondos.

STUDY OF EMS INFLUENCE ON SUPERHEAT REMOVAL DURING STEEL CONTINUOUS CASTING

Abstract

Studies show that the use of electromagnetic stirring promotes the equiaxed region increase. This research aims mainly the reduction of defects that may be related to the segregation and, consequently, the solidification structure. The idea is to correlate the electromagnetic stirring and other process variables with the solidified structure. In order to better understand the physical phenomena, a numerical model was developed to simulate the electromagnetic stirrer and the flows in the mold region. Maps of temperature at the mold outlet indicate a clear relationship between the heat extraction and agitation intensity. Field tests show a correlation between the stirring current increase and the size of equiaxed solidification region.

Key words: Numerical simulation; Electromagnetic stirring; Heat extraction; Rounds continuous casting.

¹ Contribuição técnica ao 44º Seminário de Aciaria – Internacional, 26 a 29 de maio de 2013, Araxá, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, MsC, Gerência de Qualidade e Pesquisa Siderúrgica, V&M do Brasil, Belo Horizonte, MG, Brasil.

³ Supervisor do lingotamento contínuo, Gerência de Aciaria, V&M do Brasil, Belo Horizonte, MG.

⁴ Técnico Industrial, Gerência de Qualidade e Pesquisa Siderúrgica, V&M do Brasil, Belo Horizonte, MG.

⁵ Engenheiro Civil, MsC, Eng. Metalúrgica, STE, Porto Alegre, RS, Brasil.

⁶ Físico, Dr., Eng. Metalúrgica, STE, Porto Alegre, RS, Brasil.

⁷ Físico, MsC, Eng. Metalúrgica, STE, Porto Alegre, RS, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A minimização ou eliminação de defeitos internos em tubos sem costura é uma das prioridades da V&M do Brasil. Dependendo do defeito, o produto é sucata causando impactos negativos na cadeia produtiva, além de gerar retrabalho, aumento de custo, atrasos no atendimento ao cliente, sem contar riscos com a segurança.

Um exemplo destes defeitos é a dobra interna (Figura 1). Trata-se de uma descontinuidade ao longo da parede interna do tubo semelhante a escamas.



Figura 1. Exemplos do defeito dobra interna nos tubos da V&M do Brasil.

Seu aparecimento geralmente propicia o descarte imediato do tubo, devido a sua difícil recuperação que depende da posição, da quantidade e da intensidade do defeito, além da qualidade e da aplicação final do produto no cliente.

Diversas podem ser as causas deste defeito, dentre elas a segregação de elementos de liga. Como, na maioria das vezes, não se pode alterar a composição química do aço, outras ações devem ser adotadas, tanto na aciaria quanto nas laminações, visando minimizar o impacto na geração das dobras.

Um dos recursos disponíveis que pode contribuir para a melhoria da qualidade interna da barra é o agitador eletromagnético no molde. De acordo com Kunstreich,⁽¹⁾ a agitação eletromagnética promove homogeneidade térmica na zona do molde, aumentando com isso a zona equiaxial de solidificação, o que reduz o aparecimento de segregação conforme ilustrado pela Figura 2a.

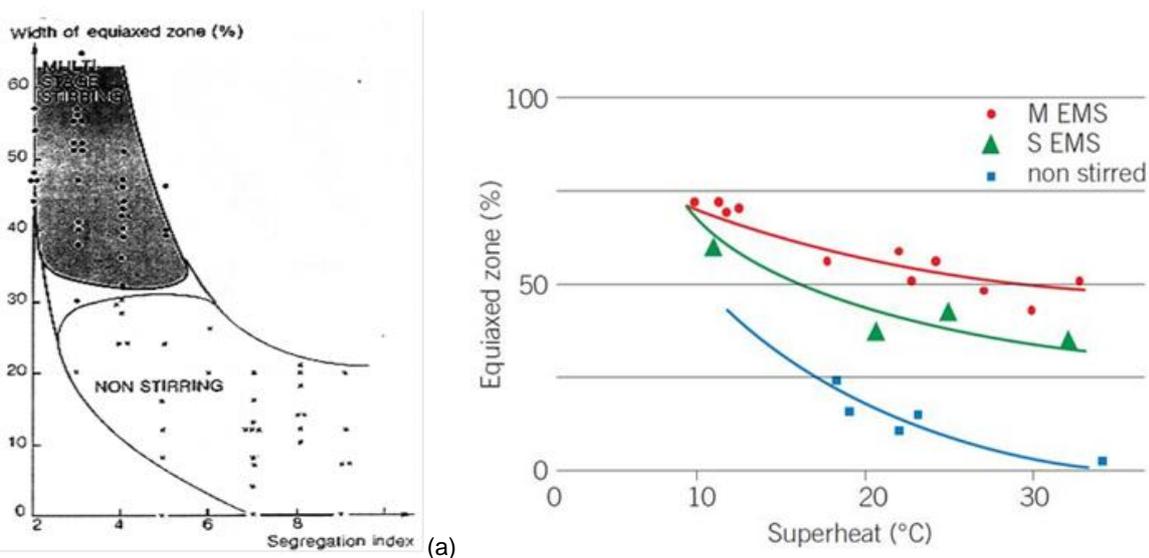


Figura 2. (a) Correlação entre zona equiaxial e segregação em placas de aço médio carbono na Usinor Dunkerque com agitador eletromagnético de duplo estágio; e (b) largura da zona equiaxial em função do *superheat* sem e com agitador eletromagnético.⁽¹⁾

Ainda segundo Kunstreich⁽¹⁾ (Figura 2b), o tamanho da zona equiaxial decresce com o aumento do *superheat*, independentemente se o aço foi submetido a agitação eletromagnética. Porém, o uso dessa tecnologia tende a minimizar essa queda, principalmente quando utilizada no molde.

Assim, com base nas considerações anteriores, a V&M do Brasil propôs avaliar a influência do uso de agitadores eletromagnéticos na remoção do calor de *superheat* durante o lingotamento contínuo de aços, visando à redução dos defeitos internos nos tubos. Primeiro, foi realizado um estudo sobre a remoção do *superheat* no molde via simulação computacional e depois foram feitas as medições em planta da região equiaxial das barras. O objetivo foi tentar correlacionar a extração de calor, calculada via modelo, com a estrutura solidificada, obtida via análise macrográfica. Com isso, busca-se determinar as condições mínimas e ótimas de operação dos agitadores buscando a melhoria contínua da qualidade do produto.

2 METODOLOGIA

O experimento foi dividido nas seis etapas.

2.1 Caracterização dos Agitadores Eletromagnéticos da Máquina de Lingotamento Contínuo da V&M do Brasil

A máquina de lingotamento contínuo da V&M do Brasil possui quatro agitadores eletromagnéticos instalados na parte superior dos moldes de cobre (M-EMS) e mais quatro agitadores inferiores posicionados no final da terceira zona (zona B) conforme mostrado de maneira esquemática pela Figura 3.

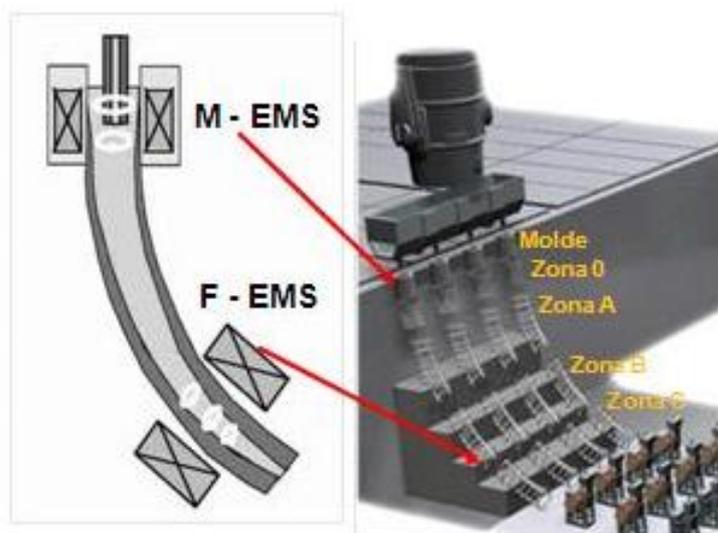


Figura 3. Posicionamento dos agitadores eletromagnéticos na máquina de lingotamento contínuo da V&M do Brasil.

Os agitadores superiores são do tipo rotativo,⁽²⁾ contínuo, operam de forma independente, com frequências que variam de 1,5 Hz a 15 Hz e correntes que variam de 100 A a 335 A girando sempre no sentido horário. Já os F-EMS operam na frequência da rede (60 Hz), com correntes em torno de 330A e tensão que varia de 200 V a 440 V. Ele é formado por uma única bobina que circunda a barra, e trabalha de forma alternada inclusive em relação ao sentido de giro.

2.2 Medição do Campo Magnético

Para que fosse possível a simulação do efeito da agitação na perda de calor no molde, optou-se por determinar o campo magnético gerado pelos agitadores utilizando o gaussímetro mostrado na Figura 4. Várias medições foram efetuadas ao longo do comprimento do molde (700 mm) aplicando três correntes distintas.



Figura 4. Fotos do gaussímetro da V&M do Brasil.

2.3 Modelamento dos Agitadores Eletromagnéticos

Foi desenvolvido um modelo matemático do equipamento de agitação eletromagnética (EMS) usado na máquina de lingotamento contínuo na aciaria da V&M do Brasil. Esta modelagem usa o método dos elementos finitos resolvendo as equações de Maxwell⁽³⁾ que regem os fenômenos eletromagnéticos produzidos pelos agitadores.

O modelo foi devidamente validado com a comparação entre os resultados da medição de densidade de fluxo magnético, coletada pelo gaussímetro, descrita anteriormente. Com estes resultados foi possível determinar o campo de forças de Lorentz⁽³⁾ responsável por promover o movimento rotacional no aço líquido no interior do molde. Este campo de forças foi acoplado ao modelo fluidodinâmico com transferência de calor descrito a seguir.

2.4 Modelagem Fluidodinâmica do Escoamento no Molde do LC sob o Efeito de Agitação Eletromagnética

O objetivo desta etapa foi determinar o efeito da agitação eletromagnética na remoção do calor de *superheat* no interior do molde. Para isso foi utilizado um modelo em CFD (*Computational Fluid Dynamics*) capaz de acoplar os efeitos da agitação eletromagnética ao escoamento do aço no interior do molde, determinando a distribuição de temperaturas ao longo da seção do tarugo, na saída do molde.

Foi usado um software, baseado em volumes finitos para a solução das equações de Navier-Stokes,⁽⁴⁾ com transferência de calor e acoplamento das forças de Lorentz. A malha computacional representa o domínio tarugo com comprimento de 2 m, para resolver o escoamento monofásico de aço líquido.

A temperatura de entrada do aço é função tipo de aço a ser produzido, dada pela temperatura *líquidus*, acrescida da temperatura de *superheat*. O topo do molde foi

considerado adiabático e as paredes assumindo ter temperatura igual ao valor da temperatura *líquidus*.

O principal resultado destas simulações foi a distribuição de temperaturas em uma seção transversal na posição da saída do molde, montando com isso mapas de temperatura para cada uma das condições testadas.

2.5 Simulação

Foram simuladas diferentes combinações das variáveis: velocidade de lingotamento, temperaturas de *superheat* e corrente do agitador (Tabela 1), onde estão outros valores característicos do modelo.

Tabela 1. Algumas das Variáveis empregadas no modelo matemático

Variável	Valor
Velocidade de lingotamento [m/min]	1,0 e 1,8
Temperatura <i>líquidus</i> [°C]	1516
Temperatura de <i>superheat</i> [°C]	10, 20 e 25
Corrente do agitador do molde [A]	40, 150, 200
Seção do molde [mm]	230
Comprimento do molde [mm]	700
Comprimento total simulado [mm]	2.000

2.6 Execução dos Testes de Campo

Para executar o experimento, a V&M do Brasil, produziu algumas corridas nas condições de operação próximas às simuladas na modelagem matemática de forma a poder comparar as barras produzidas com as indicações apresentadas pelo modelo matemático. Foram retiradas amostras (discos transversais) para caracterização na qual foram realizadas análises macrográficas a fim de determinar a extensão das zonas de solidificação:⁽⁵⁾ coquilhada, colunar e equiaxial (Figura 5).

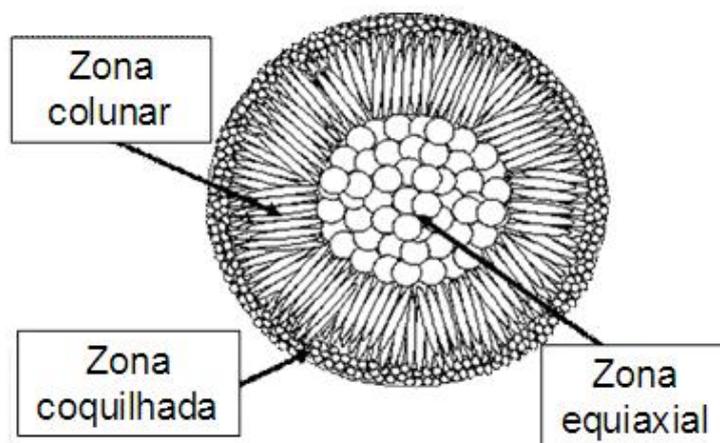


Figura 5. Representação esquemática das zonas de solidificação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo se baseou nas indicações de capacidade de remoção do *superheat* (evidenciada pela temperatura média na saída do molde) com as respectivas análises macrográficas executadas.

3.1 Modelamento dos Agitadores Eletromagnéticos Superiores

De acordo com a Figura 6a, o campo magnético gerado pelos agitadores no molde se torna mais intenso a medida que a corrente aumenta. Além disso, os picos estão todos alinhados a uma distância de 450 mm do topo, exatamente na posição em que se encontra a bobina. A Figura 6b mostra a similaridade das curvas dos campos para diferentes veios avaliados sob a mesma condição (100 A e 3,5 Hz) que é um indicativo do bom controle do processo.

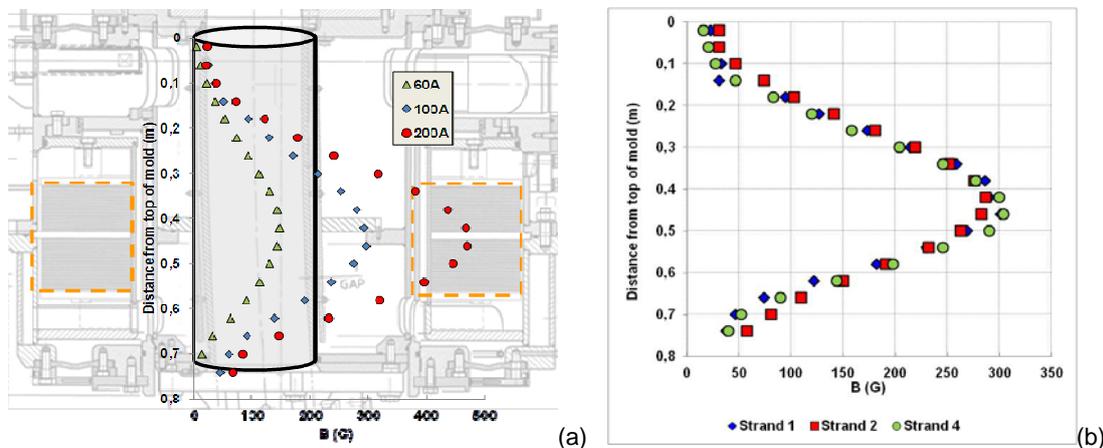


Figura 6. Medições do campo magnético nos agitadores superiores (a) correntes diferentes; e (b) veios diferentes.

3.2 Modelagem Fluidodinâmica do Escoamento no Molde do LC

Os resultados da modelagem fluidodinâmica, representados pela Figura 7, mostram que o aumento da agitação eletromagnética, reduz a temperatura média na saída do molde. Em outras palavras, a extração de calor cresce com a elevação da corrente de agitação, corroborando as observações feitas por Kunstreich.⁽¹⁾

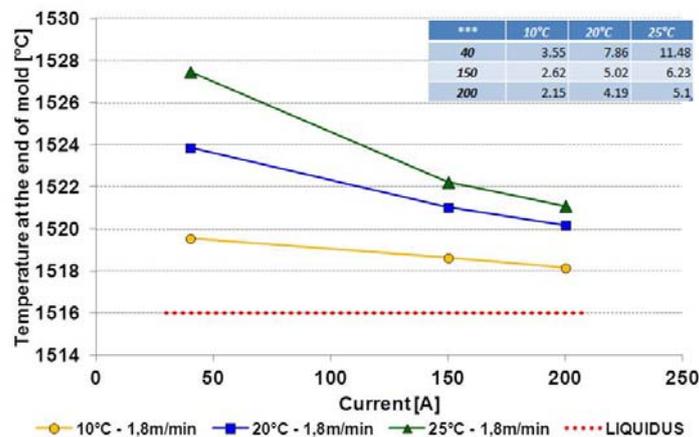


Figura 7. Efeito da remoção do *superheat* com o aumento da intensidade de agitação eletromagnética.

Ao mesmo tempo, observou-se que, quanto mais baixo for o *superheat* inicial, menor é a temperatura média na saída do molde. Nota-se, também, que os efeitos da agitação na extração de calor são mais pronunciados para valor mais altos de *superheat* inicial. Isso significa que a agitação eletromagnética pode ser empregada como ferramenta auxiliar na extração de calor na região do molde.

Essas constatações são ratificadas pelo gráfico ilustrado na Figura 8, que descreve o perfil de temperatura em uma linha que passa no diâmetro da peça, exatamente na região da saída do molde. As extremidades do gráfico (0 e 100) representam a parede do molde enquanto o meio (50) representa a região central. Note que o centro da barra possui temperaturas mais elevadas se comparados com sua borda, o que já era esperado uma vez que a extração de calor ocorre de fora para dentro. Com o aumento da agitação eletromagnética, o perfil de temperatura é reduzido e nivelado (curva mais achatada $\Rightarrow T_{\text{centro}} \equiv T_{\text{borda}}$), o que teoricamente contribui para a formação de maiores zonas equiaxiais de solidificação. Essa homogeneização pode ser observada mesmo para diferentes *superheats*.

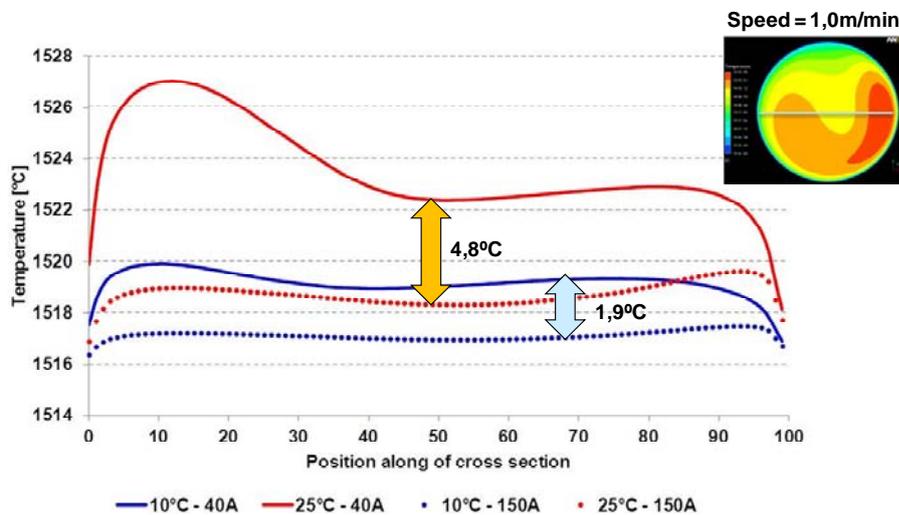


Figura 8. Perfil de temperatura ao longo do diâmetro do tarugo, na região da saída do molde.

Outra forma de analisar esse resultado é pela temperatura média na saída do molde. Segundo o gráfico da Figura 9a, a temperatura média da barra cai cerca de 5°C com a elevação da corrente até 180 A. E essa redução resultou em uma barra de seção mais homogênea (Figura 9b).

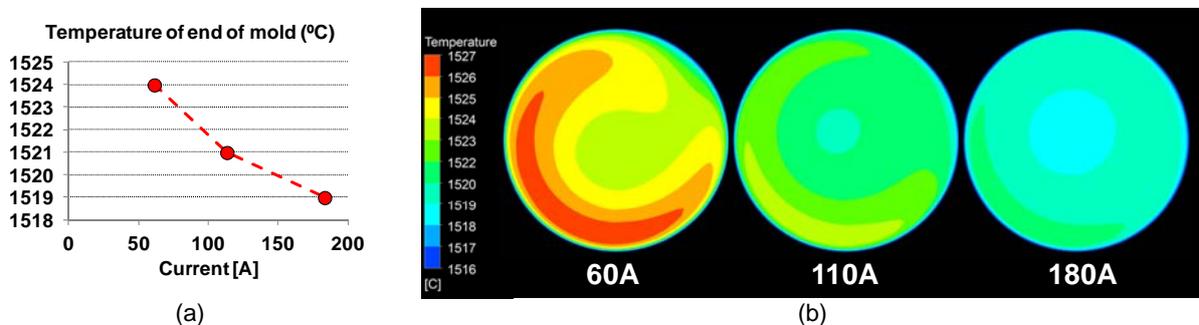


Figura 9. Mapa da temperatura da barra na saída do molde em função da corrente de agitação.

Baseada nesses resultados, foi realizada uma simulação para descobrir qual combinação do binômio *superheat* x corrente de agitação seria o mais adequado

para manter a temperatura da barra na saída do molde em um valor mais próximo à temperatura *liquidus*. Essa seria uma situação ideal do ponto de vista de extração de calor. Os resultados (Figura 10), indicam que basta aumentar a corrente de agitação quando o *superheat* da corrida estiver mais alto, promovendo uma maior remoção do calor e reduzindo o gradiente de temperatura da barra.

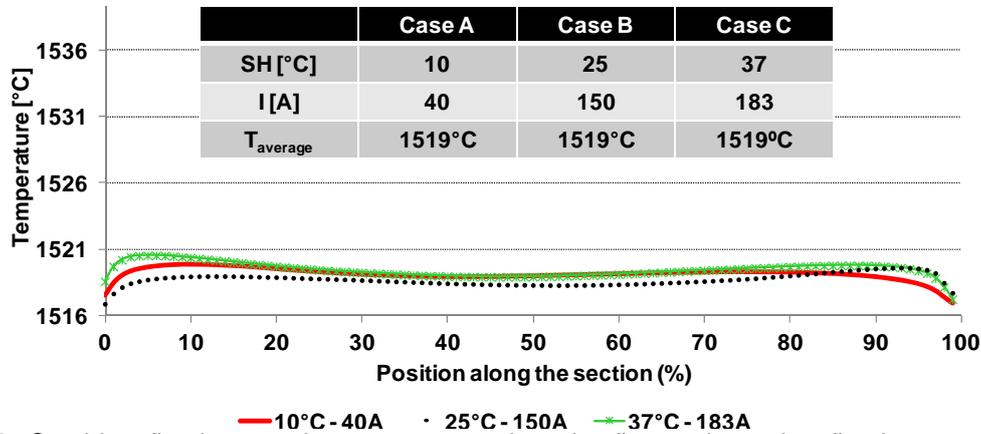


Figura 10. Combinação do *superheat* x corrente de agitação na determinação da temperatura da barra na saída do molde.

Não são muitos os trabalhos deste tipo encontrados na literatura. Dentre os que desenvolveram algo semelhante, cita-se Ayata et al.⁽⁶⁾ e Bernhard et al.⁽⁷⁾ Os primeiros construíram um modelo bidimensional de transferência de calor e solidificação e observaram que a agitação eletromagnética no molde reduz a temperatura média do aço. Bernhard et al.⁽⁷⁾ obtiveram perfis de temperatura cerca de 23°C mais baixos com a agitação eletromagnética. Desta forma, pode-se dizer que os resultados obtidos das simulações estão dentro do esperado e previstos por outros autores.

3.3 Testes em Planta

A análise macrográfica das amostras mostram que o aumento da agitação eletromagnética altera as estruturas de solidificação na peça. Na Figura 11 são apresentadas as fotografias das amostras feitas para cinco diferentes intensidades de agitação, mantendo constante o *superheat* (37°C) e a velocidade de lingotamento (1 m/min). A linha pontilhada demarca a região limítrofe entre as diferentes zonas de solidificação, permitindo realizar uma comparação qualitativa. Observe que, à medida que a corrente de agitação aumenta, a região central (zona equiaxial) fica maior. A zona coquilhada também cresce consideravelmente com correntes mais elevadas. A análise quantitativa destas amostras é mostrada na Figura 12, que apresenta a fração de área de cada zona de solidificação.

Nota-se que o incremento da corrente gerou um aumento significativo da zona equiaxial, de 0% para 14%, em detrimento da zona colunar. Com o sistema desligado (0 A), a zona colunar responde por 83% da área transversal da barra, caindo para 54% quando aplicada 180 A de corrente. Em paralelo, a zona coquilhada praticamente dobrou de tamanho (de 16% para 32%).

Os resultados apresentaram certa coerência com as previsões da literatura, uma vez que a melhora na qualidade era esperada com o aumento da corrente. Talvez sejam necessários mais testes com valores de corrente maior para que se consigam zonas equiaxiais da ordem de 60%, similares às mostradas pela Figura 2b.

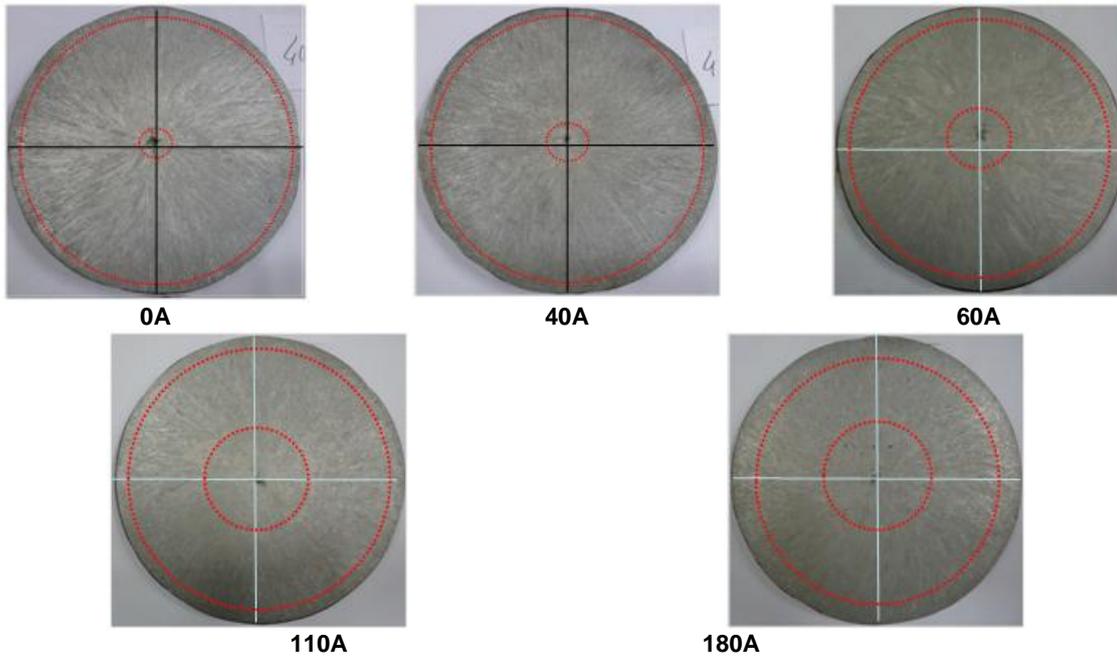


Figura 11. Macrografia das barras em função da corrente de agitação eletromagnética (*Superheat* – 37°C e velocidade de lingotamento – 1,0 m/min).

Uma análise quantitativa indica que a zona equiaxial cresceu de 2% para 14% com a corrente variando de 40 A a 180 A. Nessa mesma situação, a simulação indica uma queda na temperatura de aproximadamente 5°C. Analisando o gráfico da Figura 2b, pode-se verificar que os resultados obtidos nas simulações e nos testes em planta ficariam localizados na região com *superheat* próximo a 30°C e pouco acima da curva azul, onde a agitação é inexistente. A redução de temperatura de 5°C não justifica um acréscimo muito grande na zona equiaxial, independente da curva ser a azul ou a vermelha, esta com agitação. Aparentemente esse efeito foi observado na prática, uma vez que a zona equiaxial aumentou de 2% para 14%. Por outro lado, tem que se ter cuidado ao analisar a Figura 2b, pois não se tem informações claras sobre as condições de agitação, bem como seção do tarugo e velocidade de lingotamento.

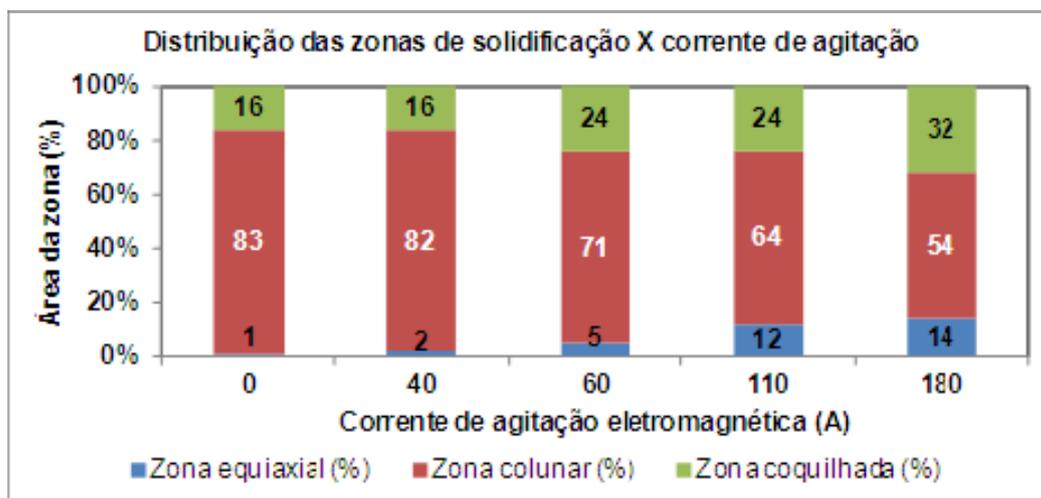


Figura 12. Evolução da zona equiaxial em função da corrente de agitação (*Superheat* – 37°C e velocidade de lingotamento – 1,0 m/min).

Todas as observações anteriores foram obtidas variando apenas a corrente de agitação para um mesmo *superheat* e velocidade de lingotamento. Porém, quando se variou o *superheat*, mantendo constante a velocidade e a corrente de agitação eletromagnética, não foram detectadas diferenças na macroestrutura. As duas temperaturas de *superheat* testadas (16°C e 37°C) não foram suficientes para modificar a distribuição da macroestrutura, segundo a Figura 13(a). Na prática, a distribuição das áreas se manteve inalterada. Essa afirmação é válida também quando se realizou a alteração da velocidade de lingotamento para um mesmo *superheat* e corrente de agitação. O perfil ficou praticamente o mesmo do anterior (Figura 13b).

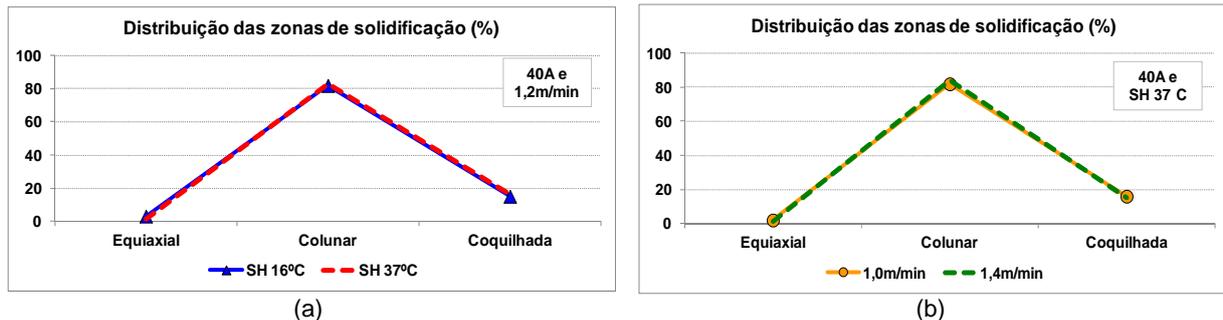


Figura 13. Distribuição das zonas de solidificação: (a) variação do *superheat* x corrente e velocidade constantes; e (b) variação da velocidade x corrente e *superheat* constantes.

Os resultados das Figuras 13a e 13b são mais difíceis de explicar, uma vez que uma diferença de *superheat* de 21°C deveria promover uma maior variação da zona equiaxial (Figura 2b). Da mesma forma, um aumento da velocidade de lingotamento deveria reduzir a zona equiaxial, desde que mantidas as condições de extração de calor e agitação.

Por fim, os teste em planta devem ter continuidade no sentido de avaliar os efeitos do processo na estrutura solidificada para se obter um padrão de operação otimizado, buscando controlar a temperatura de *superheat*, a velocidade de lingotamento e a corrente de agitação. Os resultados obtidos até o momento indicam que é possível melhorar a qualidade da estrutura solidificada e, conseqüentemente, reduzir os defeitos a ela correlacionados.

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos desse projeto corroboram com algumas observações encontradas na literatura, quais sejam:

- a agitação eletromagnética no molde auxilia na extração de calor, reduzindo os efeitos do calor de *superheat*;
- a agitação eletromagnética produz um perfil de temperatura mais homogêneo do aço líquido; e
- um aumento da corrente de agitação promove um aumento da zona equiaxial de solidificação.

A continuidade deste trabalho deve buscar correlacionar a segregação com a zona equiaxial e, posteriormente, com a ocorrência de defeitos como a dobra interna.

Outro resultado importante do projeto é trazer subsídios para que a operação de lingotamento seja otimizada, no sentido de tirar o máximo proveito dos equipamentos, buscando sempre a melhoria contínua da qualidade dos aços e redução dos índices de produtos defeituosos.

REFERÊNCIAS

- 1 KUNSTREICH, S. 2003. *La Revue de Métallurgie – CIT*; Electromagnetic stirring for continuous casting – Part 2; November, 1043-1061.
- 2 SZEKERES, E.S. 2010. *Brimacombe Continuous Casting Course*; Strand Solidification and Related Imperfections; May, Item N, 17-18.
- 3 Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase-Estática. João Pedro Assumpção Bastos. Editora da UFSC, Florianópolis, 2004.
- 4 Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional. Clóvis Maliska. Editora LTC, Ed.2, 2004.
- 5 PREVOST, B.; LADEUILLE, L.; PASSAGLI, D. ; BELLET, M. 2007. *Relatório Técnico do Grupo Vallourec*; Project of Parabolic Mold., 78 pp.
- 6 AYATA, K. et al. 1984. *Transactions ISIJ*, – Improvement of Macrosegregation in Continuously Cast Bloom and Billet by Electromagnetic Stirring; Vol. 24, 931 -939.
- 7 BERNHARD, C. et al. *Metallurgical Aspects of Simulating the Continuous Casting of Steel*. EuroPAM 2005, Potsdam, Germany.