

Lingotamento Contínuo de tarugos com Uso de Agitação Eletromagnética no Molde - Resultados Metalúrgicos.⁽¹⁾

Vicente Campanharo dos Santos ⁽²⁾
Carlos Antônio da Silva ⁽³⁾
Itavahn Alves da Silva ⁽⁴⁾
Márcio Teixeira Alves ⁽⁵⁾
Miguel Antônio de Carvalho Gonçalves ⁽⁶⁾
Sandro Aparecido Passos ⁽⁷⁾
Luiz Pio XII Martins ⁽⁸⁾
Tarcísio de Santana ⁽⁹⁾

RESUMO

O objetivo presumido da utilização de agitadores eletromagnéticos, no processo de lingotamento contínuo é elevar a qualidade do produto através da melhoria da estrutura interna, da limpidez do aço, da superfície das peças produzidas, da uniformidade da composição química e das propriedades mecânicas do produto de modo a possibilitar a produção de uma ampla gama de aços, assim como aumentar a produtividade.

Em termos qualitativos a relação entre agitação e qualidade é conhecida. Admite-se que os efeitos sejam sentidos apenas após um valor crítico e que um comportamento assintótico seja observado na faixa de valores superiores.

Como não há um método teórico para se saber qual a intensidade de agitação é necessária para se atingir um fim específico, se faz necessária a realização de experiências industriais, para que se obtenha a melhor performance de agitação, para cada tipo de aço produzido.

palavras-chaves: agitação eletromagnética, resultados metalúrgicos

(1) Contribuição técnica a ser apresentada XXXV Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais – Salvador – BA – Brasil

(2) MSc, Engenheiro de processos e produtos – Gerdau Açominas S/A

(3) MSc, PhD, Prof. Adjunto do DEMET/UFOP e REDEMAT/UFOP

(4) MSc, PhD, Prof. Adjunto do DEMET/UFOP

(5) Gerente da Aciaria – Gerdau Açominas S/A

(6) Especialista - Gerdau Açominas S/A

(7) Facilitador de produção - Gerdau Açominas S/A

(8) Tecnólogo em processamento de dados, Técnico processo - Gerdau Açominas S/A

(9) Tecnólogo em processamento de dados, Facilitador de manutenção - Gerdau Açominas S/A

INTRODUÇÃO

Como a exigência pela qualidade está se tornando a cada dia um fator decisivo na competitividade das empresas, a busca por meios que garantam a qualidade dos produtos e serviços fornecidos passa a ser um foco constante das Equipes que a constituem. No caso específico do Processo de Lingotamento Contínuo, o emprego de agitação eletromagnética se torna um fator de diferenciação dos produtores de aço. Como são vários os sistemas e localizações possíveis e ainda, como inexistente método teórico de previsão quantitativa acerca da influência da agitação sobre a qualidade metalúrgica, trabalhos práticos específicos devem ser realizados na busca da otimização do uso do agitador eletromagnético no molde.

AGITAÇÃO ELETROMAGNÉTICA - EMS

O princípio básico de funcionamento do agitador eletromagnético do molde é o mesmo de um motor elétrico de indução trifásico assíncrono. Os movimentos de rotação do aço líquido dentro do molde são obtidos pela força assíncrona no metal líquido sob efeito de um forte campo magnético rotativo, aplicado num plano perpendicular ao eixo do molde. Este campo é obtido por meio de um indutor cilíndrico, montado em torno do molde. O indutor, que está dentro de uma caixa estanque, é equipado com estruturas de fixação, conectores de entrada e saída de água de seu próprio circuito de resfriamento e uma caixa para alimentação elétrica. Na utilização do EMS, correntes parasitas, movimentam o aço ainda líquido à frente do sólido. Este movimento influencia a temperatura e o campo de soluto na frente da pele em solidificação.

RESULTADOS METALÚRGICOS ESPERADOS

A corrente da bobina determina a indução magnética B ; esta, associada à frequência f , determina a força de agitação F ($F \propto f \cdot B^2$) e a velocidade do líquido, U ($U \propto B\sqrt{f}$), e, portanto, o grau de agitação, [Vilela e Soares (2002)].

Qualitativamente a correlação entre a intensidade de agitação e o resultado metalúrgico tem sido apresentada tal como se mostra na figura 1. Presumivelmente seria possível determinar uma curva específica para cada aspecto de qualidade, mas permanece a questão de qual intensidade de agitação deve ser empregada para se atingir o efeito desejável, se houver. Conhecer este comportamento através de experiências representaria, para cada produtor, a possibilidade de ter a melhor performance de seu equipamento de agitação eletromagnética.

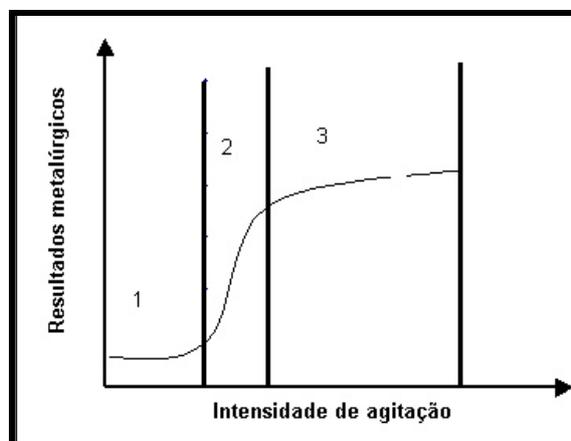


Figura 1. Resultados metalúrgicos x Agitação [Danieli]

DESENVOLVIMENTO

Foram realizadas experiências durante a produção rotineira no lingotamento contínuo da Gerdau-Açominas, Ouro Branco; se trata de máquina de lingotamento de tarugos, de seis veios com agitador instalado no molde, M-EMS. As experiências ficaram restritas à dimensão 130 mm x 130 mm e velocidade de lingotamento da ordem de 3,5 m/min, sendo as amostragens realizadas junto ao veio central, em intervalos de 4 em 4 peças, após a alteração da corrente do agitador, garantindo-se assim a representatividade da amostra retirada, quanto ao efeito da corrente do agitador.

Analisou-se o caso de aços BC, MC, e AC, correntes nominais de 0, 200, 400 600 e 700 A nas frequências de 4 e 6 Hz, jato aberto (JA) e jato protegido (JP), e a relação entre estes fatores e índices metalúrgicos definidos de acordo com padrões internos da Gerdau-Açominas, tais como incidência de trincas centrais, porosidades, bolhas, zona equiaxial, segregação e limpidez.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

TRINCA CENTRAL

Com o aumento da extensão da estrutura de solidificação equiaxial, há uma diminuição do tamanho e da severidade das trincas centrais, que se desenvolvem entre cristais colunares [Moore (1984)].

Observando-se a figura 2 pode-se dizer que:

- para aços baixo carbono, com o aumento da agitação do aço, através do aumento da corrente do agitador eletromagnético, ocorre minimização de incidência de trinca central; isto pode estar associado ao fato de que, para estes aços o superaquecimento para lingotar é maior, o que por sua vez, pode gerar estas trincas. Como o agitador tem a característica de ser dissipador do superaquecimento, implica em um aumento da extensão da estrutura de solidificação equiaxial, [Abbott et al (1992)], o mesmo agindo de maneira benéfica na prevenção de trinca central.
- para aço médio e alto carbono não se verificou relação entre agitação do aço, através do aumento da corrente do agitador eletromagnético e a incidência de trincas central.

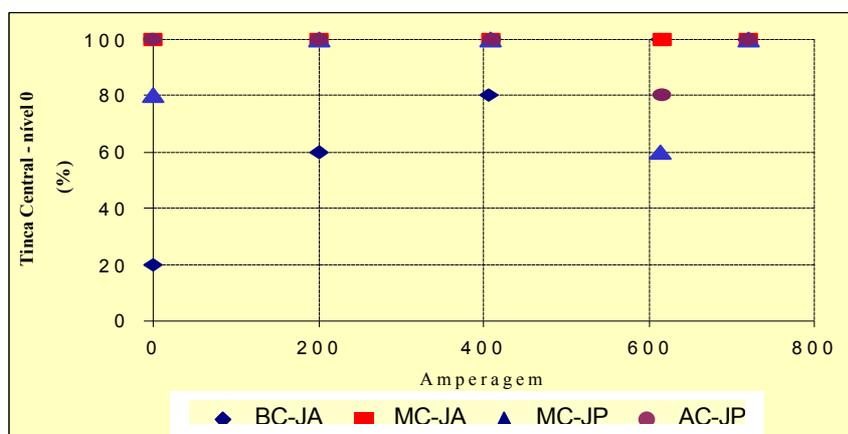


Figura 2. Fração do produto atendendo nível 0 de trinca central, em função do teor de carbono e da corrente do agitador; nível 0 significa ausência de trincas

POROSIDADE CENTRAL

Com a utilização do M-EMS, verifica-se uma relação direta entre a extensão da estrutura equiaxial e o diâmetro da porosidade central, [Vilela e Soares (2002)], [Glaws et al (1991)] e [Papay et al (1993)].

A porosidade central está associada com a formação de pontes de solidificação e consequente interrupção do suprimento de líquido, estando relacionada ao alto superaquecimento [Moore (1984)].

Observando-se a figura 3, pode-se dizer que para aços baixo, médio e alto carbono verificou-se relação entre o aumento da agitação do aço, através do aumento da corrente do agitador eletromagnético e a diminuição do diâmetro da porosidade central.

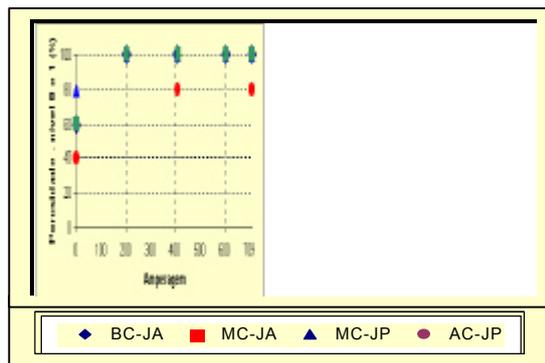


Figura 3. Fração de produto atendendo níveis 0 e 1 de porosidade, em função do teor de carbono e da corrente do agitador; níveis 0 e 1 representam a menor incidência de defeitos.

BOLHA (PINHOLE E BLOWHOLE)

A maior velocidade de agitação obtida com o uso do EMS, implicaria em uma menor formação de bolhas de gás na frente de solidificação, que posteriormente se tornariam pinholes e blowholes. Isto se deveria ao impedimento da nucleação de bolhas, causado pela lavagem da frente de solidificação que removeria o carbono acumulado localmente em função da segregação e também pela remoção física das bolhas pelo fluxo –centrifugação [Vilela e Soares (202)] e [Birat (1984)].

Observando-se a figura 4, pode-se dizer que:

- para aço baixo carbono, com lingotamento em jato aberto, não se verifica relação entre o aumento da agitação do aço e minimização da incidência de bolhas;
- para aço médio carbono, com lingotamento em jato aberto, verifica-se que com uma alta corrente (na faixa de 700 A) há uma tendência de minimização da incidência de bolhas;
- aço médio e alto carbono, com lingotamento em jato protegido, não se verifica relação entre o aumento da agitação do aço e minimização da incidência de bolhas.

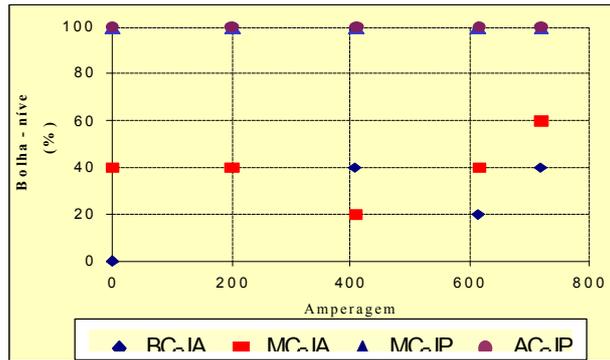


Figura 4. Fração de produto atendendo nível 0 de bolha, em função do teor de carbono e da corrente do agitador ; nível 0 indica ausência de defeitos.

ZONA EQUIAXIAL

Numa máquina de Lingotamento Contínuo de blocos, equipada com EMS, uma maior agitação se traduz na obtenção de uma estrutura de solidificação equiaxial mais extensa [Sediako et al (1999)], [Anton et al (2002)], [Alberny e Birat (1976)], [Gray et al (1984)], [Birat (1984)], [Komatsu et al (1984)], [Dauby et al (2002)].

A turbulência associada ao uso do M-EMS aumenta a transmissão térmica, eliminando o superaquecimento, e também destaca pontas de dendritas que por sua vez irão gerar os cristais equiaxiais. Com melhor dissipação do superaquecimento, há um aumento da taxa de sobrevivência destes núcleos [Abbott et al (1992)].

A utilização do EMS possibilita o lingotamento com alto superaquecimento e a obtenção de estrutura equiaxial, tal como seria obtida com baixo superaquecimento, o que operacionalmente se traduz em redução do número de obstruções da válvula de lingotamento [Moore e Shah (1984)], [ABB].

Observando-se a figura 5, pode-se dizer que:

- para aços baixo, médio e alto carbono verifica-se relação crescente entre a agitação do aço, e o percentual de zona equiaxial ;
- aparentemente para correntes superiores a 700 A ocorreria a reversão desta tendência, uma vez que o percentual de zona equiaxial diminui.

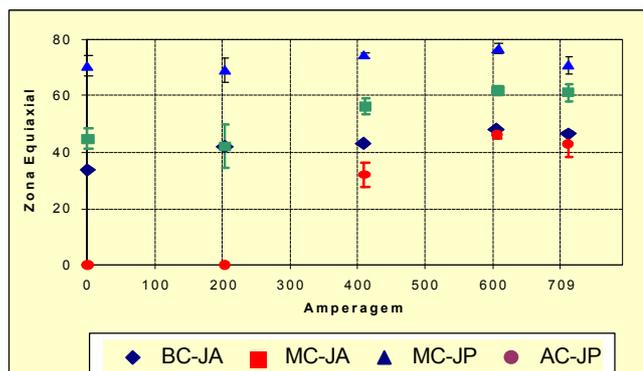


Figura 5. Zona equiaxial, em função do teor de carbono e da corrente do agitador

SEGREGAÇÃO – AMOSTRA TRANSVERSAL

Em uma máquina de Lingotamento Contínuo de tarugos equipada com o M-EMS, existe uma relação entre agitação e melhoria na segregação de carbono, atingindo-se um ponto ótimo, a partir do qual maior agitação não se traduz em ganhos em termos de segregação. Existe uma relação entre o aumento da extensão da

estrutura de solidificação equiaxial e uma melhoria do parâmetro segregação [Ludlow et al (1984)], [Abbott et al (1992)], e [Fherton (1997)].

Com a utilização de EMS, os eventos de qualidade junto à linha central, tipo segregação, são minorados, mas não são eliminados. Ao invés de grandes vazios e grandes áreas segregadas na região central, obtém-se uma redução do tamanho e uma melhor distribuição [Tzavaras (1984)].

Com a utilização do M-EMS tem-se uma menor segregação central desde que o carbono seja inferior a 0,5%. Para aços alto carbono a segregação continua a ser um problema, mesmo com uma grande extensão de zona equiaxial [Vilela e Soares (2002)].

Observando-se a figura 6, e tomando como critério de aprovação $C0/C80 \leq 1,15$, pode-se dizer que para aços baixo e médio carbono, com ou sem agitação, atende-se ao critério de aprovação, com uma aparente melhoria com o aumento da corrente. Este comportamento não é observado com aços alto carbono.

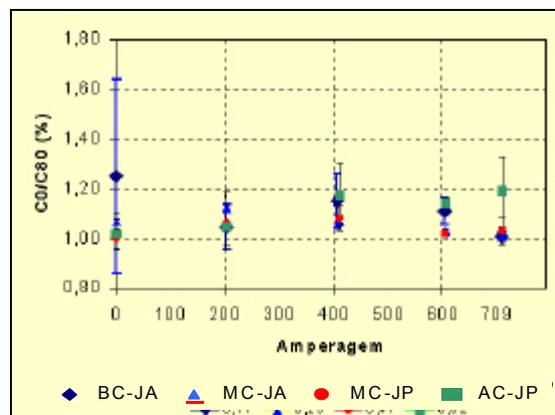


Figura 6. Índice de segregação, em função do teor de carbono e da corrente do agitador

SEGREGAÇÃO – AMOSTRA LONGITUDINAL

De acordo com as figuras 7 a 10, pode-se dizer que, para aços baixo e médio, os valores de concentração na linha central se aproximam do valor nominal, ao contrário do aço alto carbono. Quando se empregam correntes crescentes no agitador; a variabilidade é diminuída.

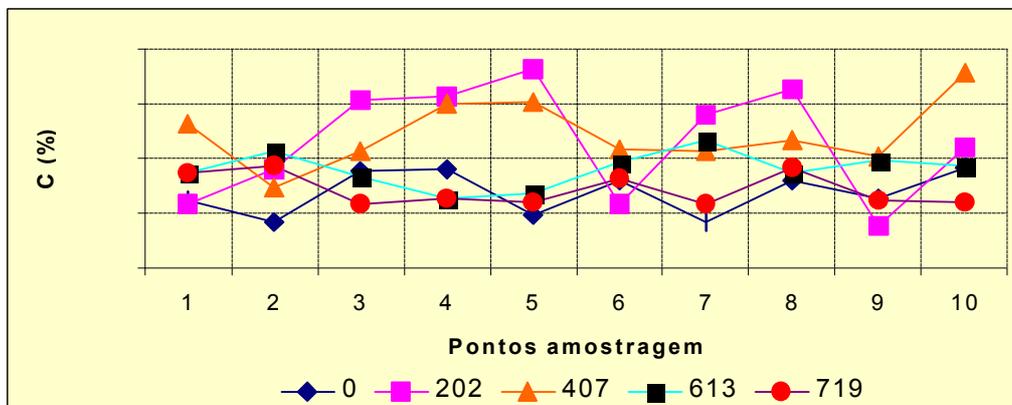


Figura 7 - Evolução de $C0$, em função da corrente, para Baixos Carbono e Freqüência 6 Hz

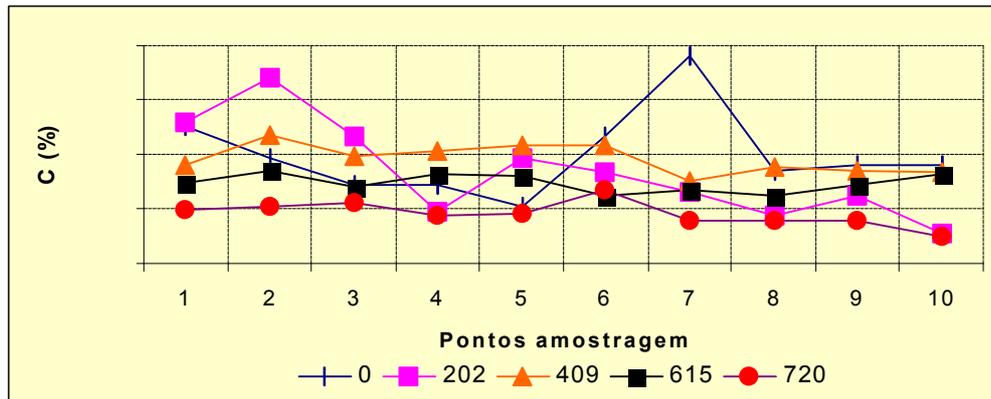


Figura 8 - Evolução de C0, em função da corrente, para Médio Carbono e Frequência 6 Hz

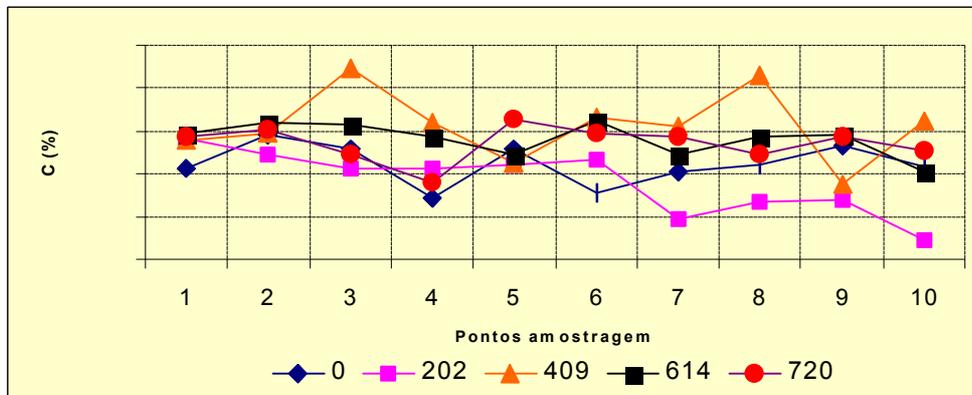


Figura 9 - Evolução de C0, em função da corrente, para Médio Carbono –Jato Protegido e Frequência 6 Hz

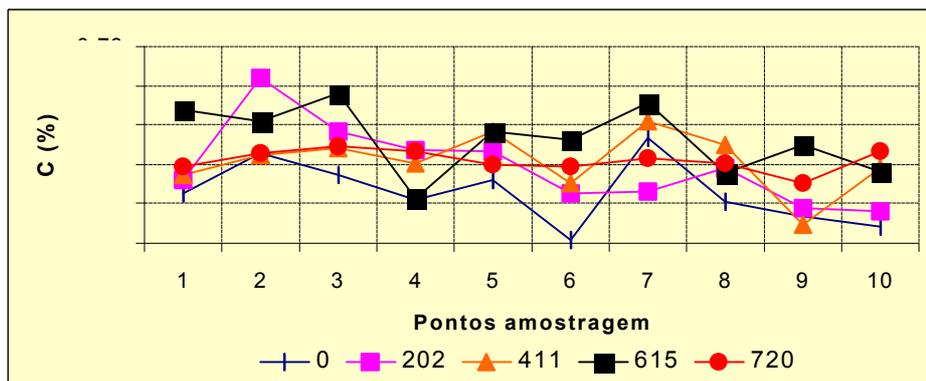


Figura 10 - Evolução C0, em função da corrente, para Alto Carbono –Jato Protegido e Frequência 6 Hz

Comparando-se o método de análise de segregação transversal com o método longitudinal, pode-se dizer que:

- a análise de carbono ao longo do eixo da amostra longitudinal, parece ser mais representativa, pois mostra a variação do teor de carbono ao longo da mesma, permitindo que eventuais variações devidas a defeitos pontuais sejam amortecidas;

- Observa-se que com a utilização do M-EMS com uma alta corrente, ou seja, com alta velocidade de agitação, propicia resultados de carbono ao longo do eixo da amostra transversal com menor variabilidade.

LIMPIDEZ

O M-EMS, em um lingotamento com jato aberto, produz um fluxo que aprofunda o menisco, arrastando as inclusões para o centro, evitando que as mesmas sejam aprisionadas na primeira pele de solidificação. O fluxo de aço líquido a altas velocidades ao longo da frente de solidificação, reduz o risco de aprisionamento das inclusões não-metálicas pelo crescimento das dendritas; este fenômeno é conhecido como efeito lavagem [Birat (1984)] e [Glaws et al [1991]].

Observando-se a figura 11, pode-se dizer que:

- para aços baixo carbono, se verifica relação entre a agitação do aço e o grau de limpidez;
- para aços médio carbono lingotados com jato aberto, não se verifica relação entre a agitação do aço e o grau de limpidez; verifica-se a exigência de uma relação para o caso de jato protegido.
- para aços alto carbono lingotados com jato protegido, não se verifica relação entre a agitação do aço e o grau de limpidez.

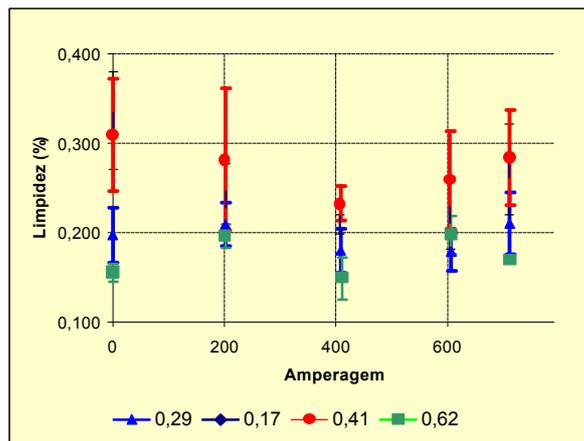


Figura 11. Grau de Limpidez, medida como % da área superficial ocupada por inclusões, em função do teor de carbono e da corrente do agitador

4. CONCLUSÕES

Dos resultados decorrentes da variação de corrente e frequência do M-EMS, para os aços lingotados na bitola seção quadrada de 130 mm e velocidade objetivada de 3,5 m/mim, e no caso específicos ensaiados na Gerdau-Açominas, Ouro Branco, pode-se dizer que:

- os benefícios metalúrgicos do M-EMS não são tão evidentes e amplos, como uma análise da literatura normalmente indicaria . Isto se deve possivelmente à melhoria geral da tecnologia de fabricação de aço em relação à época em que agitadores eletromagnéticos foram introduzidos e comercializados como solução para diversos problemas de qualidade;
- Quanto ao aspecto de produtividade, podemos destacar que, como um equipamento dissipador de calor, o M-EMS, possibilita o lingotamento de tarugos em alta velocidade, mesmo com superaquecimento elevado, minimizando

ocorrência de breakouts, presumivelmente por se obter uma pele mais sadia em termos de espessura e conteúdo de inclusões.

- O método de análise de segregação no eixo longitudinal parece ser mais representativo, uma vez que eventuais variações devidas a defeitos pontuais são amortecidas.

5 – REFERÊNCIAS

- ABBOTT, T.B., HOYLE, I.B., WOODYATT, A.S., DAVEY, B.E, MULDOON, L.J., Three dimensional visualisation of segregation in continuously cast blooms - Steelmaking conference proceedings- p. 875-882 – 1992
- ADACHI, T, MIZUTANI, M., KIMURA, K., Application of electromagnetic stirrer, The application of electromagnetic stirring (EMS)) in the continuous casting of steel, The Iron and Steel Society, v.3, p. 79-85, 1984
- ALBERNY, R., BIRAT, J.P. Electromagnetic stirring and product quality. The metals society London, Proceedings of an international conference, p.116-123, 1976
- BIRAT, J.P. Electromagnetic stirring on billet, bloom and slab continuous casters state of the art in 1982, The application of electromagnetic stirring (EMS) in the continuous casting of steel, The Iron and Steel Society, v.3, p- 21-34, 1984
- 19 – ANTON, M.H., FERNANDES P. C., SOARES, R.B., ALVES, E.S., SANTOS, C.A. SPIM, J.A Levantamento das regras e condições de controle para a solidificação no molde do Lingotamento Contínuo, 57° Congresso anual da ABM-Internacional, 2002
- DAUBY, P.H., KUNSTREICH, S., NOVÉ, M.C., YVES, D., Electromagnetic stirring, what for what? part 1: billets and blooms, International steelmaking conference, 2002
- FHERTON C. F. , Advanced physical chemistry for process metallurgy ,chapter (5.7) – Solidification, p.151–182, Academic press, 1997
- GLAWS, P.C., FRYAN, R.V., KEENER, D.M., The influence of electromagnetic stirring on inclusion distribution as measured by ultrasonic inspection, steelmaking conference proceedings, p. 247-264, 1991
- GRAY, M., MCLEAN, G., WEATHERLY, G., Electromagnetic stirring in the mold during continuous casting, The application of electromagnetic stirring (EMS)) in the continuous casting of steel, The Iron and Steel Society, v.3, p. 69-76, 1984
- KOMATSU, M., MIZUKAMI, H., KITAGAWA, T., KAWAKAMI, K., Effect of electromagnetic stirring on solidification phenomena of steel, The application of electromagnetic stirring (EMS) in the continuous casting of steel, The Iron and Steel Society, v.3, p.93-99, 1984
- LUDLOW, V., NORMANTON, A ., ANDERSON, A ., THIELE, M., CIRIZA, J., LARAUDOGOITIA, J., KNOOP, W. V., Strategy to minimise central segregation in high carbon steel grades during billet casting, 4th. Inter. Metallurgical Conference - Continuous Casting of Billets – p. 430-442, 2001
- MOORE, J.J., Review of a axial segregation in continuously cast steel, The application of electromagnetic stirring (EMS)) in the continuous casting of steel , The Iron and Steel Society, v.3, p. 11-20, 1984
- MOORE, J.J., SHAH, N.A., A review of the effects of electromagnetic stirring (EMS) in continuously cast steels, The application of electromagnetic stirring (EMS)) in the continuous casting of steel, The Iron and Steel Society, v.3, p. 35-45, 1984
- NAKAJIMA, H., AOI, T., YAMAGISHI, T., TAKAGI, S., New molten steel flow controlling device for billet and bloom caster, p.461-469

NAKATA, H., INOUE, T., MORI, H., AYATA, K., MURAKAMI, T. KOMINAMI, T., Improvement of billet surface quality by ultra-high-frequency electromagnetic casting, ISIJ, v. 42, n. 3, p. 264-272, 2002

PAPAY, F.R., BULLOCK, R.A, SUZUKI, Y., STETAK, S.P., PADDOCK, J.C., Billet quality improvement with mold electromagnetic stirring, steelmaking conference proceedings, p. 437-439, 1993

SEDIKO, D., SEDIKO, O, LIN, K. J. Some aspects of thermal analysis and technology upgrading in steel continuous casting, Canadian Metallurgical Quarterly, v.. 38, n° 5, p. 377-385, 1999

TOLEDO, G.A., CAMPO, O., LAÍNEZ, E., Agitación electromagnética em la colada continua de acero, R e v. metal. Madrid, 31 (1), p.23-29, 1995

TZAVARAS, A .A ., Solidification control by electromagnetic stirring – State of the art, – continuous casting , The application of electromagnetic stirring (EMS)) in the continuous casting of steel , The Iron and Steel Society, v..3 P. 47-67, 1984

VILELA, A. C. F., SOARES, R. B., Lingotamento contínuo de bloco e tarugos, Curso da ABM, p.82-110, 2002

Continuous Casting of Billets with Electromagnetic Stirring in Mold – Metallurgical results.⁽¹⁾

Vicente Campanharo dos Santos ⁽²⁾
Carlos Antônio da Silva ⁽³⁾
Itavahn Alves da Silva ⁽⁴⁾
Márcio Teixeira Alves ⁽⁵⁾
Miguel Antônio de Carvalho Gonçalves ⁽⁶⁾
Sandro Aparecido Passos ⁽⁷⁾
Luiz Pio XII Martins ⁽⁸⁾
Tarcísio de Santana ⁽⁹⁾

SUMMARY

The presumed objective of using electromagnetic agitators in the continuous casting process, is to increase the product quality through internal structure improvement, cleanness of the steel, cleanness of produced parts, chemical composition uniformity and mechanical properties of the product, in order to make it possible to produce a wide range of steels as well as to increase productivity.

Regarding quality terms, the relation between agitation and quality is already known. It is admitted that effects be felt only after a critical value and that an asymptotic behavior be observed within the range of superior values.

As there is no theoretic method to know what is the necessary agitation intensity to reach an specific end, it is necessary to carry out industrial experiences to obtain the best agitation performance for each produced steel.

word-keys: electromagnetic stirring, metallurgical results

-
- (1) Technical Contribution to be presented in XXXV Steelmaking Seminar – Salvador – BA – Brazil**
 - (2) MSc, Process and products engineer - Gerdau Açominas S/A**
 - (3) MSc, PhD, Professor of DEMET/UFPO and REDEMAT/UFOP**
 - (4) MSc, PhD, Professor of DEMET/UFOP**
 - (5) Stelmaking Manager - Gerdau Açominas S/A**
 - (6) Specialist - Gerdau Açominas S/A**
 - (7) Process technician - Gerdau Açominas S/A**
 - (8) Process technician - Gerdau Açominas S/A**
 - (9) Maintenance technician - Gerdau Açominas S/A**