

# MODELAGEM NUMÉRICA DOS AGITADORES ELETROMAGNÉTICOS DA MÁQUINA DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DA V&M DO BRASIL S.A.<sup>1</sup>

Oswaldo Alves Ferreira Neto<sup>2</sup>

Pierre Acknin<sup>3</sup>

Fabício Batista Vieira<sup>2</sup>

Luís Carlos de Mendonça<sup>4</sup>

José Ernesto de Azevedo Nadalon<sup>5</sup>

Leonardo Barboza Trindade<sup>6</sup>

César Nery de Abreu<sup>7</sup>

Rubens de Paula Machado<sup>8</sup>

Diogo Passagli<sup>9</sup>

Ângelo Morrone<sup>10</sup>

## Resumo

A aciaria da V&M do Brasil S.A., seguindo sua política de modernização tecnológica, implantou ao final do ano de 2005 novos agitadores eletromagnéticos nos moldes em sua máquina de lingotamento contínuo de quatro veios. A empresa, em suas linhas de laminação, utiliza o processo de perfuração de blocos produzidos na aciaria para obtenção de seu produto final, os tubos sem costura para os mercados de óleo e gás, industrial e automobilístico. Na laminação de blocos para a produção de tubos a qualidade interna dos blocos deve ser adequada para os processos de perfuração com o fim de evitar a geração de defeitos internos que podem levar ao sucateamento dos produtos. Para isso objetiva-se na aciaria, a redução da macrossegregação para aços ligados como também a porosidade interna utilizando-se a máxima potência dos agitadores eletromagnéticos, porém evitando-se o arraste de pó fluxante que ocasionaria a absorção de inclusões pelo aço lingotado. Para isso, a fim de prever-se cientificamente esse possível arraste de inclusões, construiu-se uma modelagem do fenômeno eletromagnético presente nos moldes adaptado à modelagem do escoamento fluido-dinâmico da interface aço-escória. Experimentações direcionadas foram realizadas para verificar tecnicamente a previsibilidade da modelagem.

**Palavras-chave:** Lingotamento contínuo; Agitação eletromagnética; Macrossegregação, Defeitos internos em tubos sem costura.

## NUMERICAL MODEL OF THE MOULD ELECTROMAGNETIC STIRRING AT V&M DO BRASIL S.A.

### Abstract

The steelshop of V&M do BRASIL S.A., following its technological modernization politics, implanted at the end of 2005 new electromagnetic stirrers in the moulds of its four strands continuous casting machine. The company in its rolling lines uses perforation processes of blocks produced by the steelshop to obtain the final product, the seamless tubes for the oil and gas, industrial and automobilists markets. In the rolling of blocks to produce tubes the internal quality of the blocks must be adequate for the perforation process in order to avoid internal defects formation that can lead to scrap the products. For that the steelshop objectives to reduce macrosegregation for steel alloys and porosity using the maximum stirring power of the electromagnetic stirrers, but at the same time avoiding slag entrapment that could cause absorption of inclusions to the casted steel. In order to predict scientifically such possible absorption of inclusions, a modeling to the electromagnetic phenomena in the mould suitable to the modeling of the fluid-dynamic flow at the interface steel-slag has been built. Directed experiments were carried out to technically verify the previsibility of the modeling.

**Key words:** Continuous casting; Electromagnetic stirring; Macrosegregation; Internal defects in seamless tubes

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao XXXVIII Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2007, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista, M. Sc. Gerência de Produção de Aços – V&M do BRASIL S.A.

<sup>3</sup> Estagiário Engenharia. Gerência de Produção de Aços – V&M do BRASIL S.A.

<sup>4</sup> Estagiário de Engenharia – UFMG. Gerência de Produção de Aços – V&M do BRASIL S.A.

<sup>5</sup> Engenheiro Civil – STE – Science, Technology & Engineering

<sup>6</sup> Físico – Diretor Geral – STE – Science, Technology & Engineering

<sup>7</sup> Engenheiro Civil, Gerência de Produção de Aços – V&M do BRASIL S.A.

<sup>8</sup> Supervisor Departamento de Produção e Aços – V&M do BRASIL

<sup>9</sup> Engenheiro Metalurgista. Departamento de Produção e Aços – V&M do BRASIL S.A.

<sup>10</sup> Físico – Diretor Técnico da FC&I - Fazer Ciência e Inovação

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Produção de Tubos sem Costura na V&M do Brasil

A Usina Barreiro ocupa uma área de mais de 3 milhões de m<sup>2</sup> e atende a 95% da demanda do mercado nacional de tubos de aço sem costura. Os produtos da V&M do Brasil atendem os mercados petrolífero, automobilístico e o setor industrial em geral.

A aciaria da V&M tem capacidade instalada de 660 mil toneladas de aço bruto/ano. Para a produção de aços, a Usina Barreiro dispõe em sua aciaria de um convertedor LD, uma instalação de metalurgia secundária com forno-panela, desgaseificador a vácuo e estação de rinsagem, e uma máquina de lingotamento contínuo de quatro veios que produz barras de seção redonda nas bitolas de 180, 194 e 230mm de diâmetro.

As barras redondas, após inspecionadas e cortadas em comprimentos de emprego, são enviadas às fábricas de tubos. Na produção de tubos de aço sem costura são empregados processos de deformação a quente e a frio. Na Usina Barreiro, duas linhas são responsáveis pela produção e acabamento dos tubos: a Laminação Automática (LA) e a Laminação Contínua (RK). A Laminação Automática produz tubos na faixa de bitola de 168,3 a 355,6mm (6" a 14"), parede de 5,60 a 38,0mm e comprimento de 6,0 a 14,5m. A Laminação Contínua (RK) produz tubos na faixa de bitola de 26,9 a 177,8mm, parede de 2,60 a 32,0mm e comprimento de 6,0 a 15,0m. Para o perfeito acompanhamento da qualidade intrínseca dos produtos, as linhas produtivas de tubos contam com os mais modernos equipamentos automatizados de detecção de defeitos e medição de parede a quente e a frio. Os tratamentos térmicos são feitos em fornos de atmosfera controlada a fim de garantir as propriedades mecânicas exigidas. Por final, os tubos passam por um rigoroso controle de qualidade que inclui testes não-destrutivos para assegurar a qualidade do produto recebida pelos clientes.

## 1.2 Objetivo

Com este trabalho pretende-se avaliar as condições de operação dos agitadores eletromagnéticos da máquina de lingotamento contínuo da V&M do BRASIL, de forma a reduzir a macrossegregação e porosidade nas barras lingotadas de aços ligados garantindo a estabilidade da interface escória/aço de tal forma que não ocorra arraste de inclusões mediante a construção de modelos magnéticos e fluido-dinâmicos orientativos.

## 1.3 Descrição do Problema

Na produção de tubos de aço sem costura na V&M do BRASIL S.A ocorre a perfuração dos blocos maciços de aço – barras lingotadas cortadas em menores comprimentos – pelas pontas de perfuração nas laminações RK e LA nos laminadores SWW (laminador perfurador) que são baseados no antigo efeito Mannesmann de nucleação de trincas na porção central dos blocos quando forças trativas atuam nessa mesma região na entrada dos blocos na cadeira de laminação em que são posicionados cilindros oblíquos.

Quando da perfuração dos blocos há condições de processamento que determinam a qualidade superficial interna dos tubos, a saber:

- aproximação da ponta de perfuração da posição em que a trinca interna é nucleada;
- direcionamento das guias de laminação;
- vida útil das pontas de perfuração;
- aquecimento uniforme do núcleo dos blocos nos fornos de reaquecimento prévios às laminações;
- qualidade interna dos blocos: macrossegregação e porosidade associada.

O principal defeito interno encontrado nos tubos laminados são as dobras internas que são formadas durante os próprios processos de laminação. A presença de anormalidades originadas na solidificação das barras (macrossegregação e porosidade central) propicia uma maior probabilidade de geração de defeitos internos nos tubos durante a laminação como pode ser demonstrado na Figura 1-b.



**Figura 1** – (a) Blocos de barras lingotadas produzidos na MLC da V&M do BRASIL; (b) Dobra interna em um tubo laminado (meia-cana)

#### 1.4 Macrossegregação, Porosidade Interna e Agitação Eletromagnética

A macrossegregação em lingotamento contínuo ocorre devido ao enriquecimento do líquido interdendrítico durante a solidificação. A formação de porosidade pode ser explicada pela teoria do mini-ingot. Há citações na literatura da utilização de agitação eletromagnética no molde combinada com agitação na porção final de solidificação (FEMS) reduzindo a segregação central. Muitos experimentos foram realizados <sup>[1]</sup> <sup>[2]</sup> para demonstrar que essa redução de segregação em aços alto carbono pode atingir taxas próximas a 50% com MEMS e 60% com MEMS e FEMS combinados.

A agitação eletromagnética é utilizada em lingotamento contínuo com o intuito de otimizar a qualidade interna das barras lingotadas garantindo maior homogeneidade com relação à composição química e estrutura de solidificação ao longo do semi-acabado. O movimento rotacional induzido do aço líquido no molde incrementa também a qualidade superficial das barras, proporciona uma melhor distribuição de inclusões e por último promove uma maior uniformidade de temperatura durante a refrigeração primária <sup>[3]</sup>.

Em cada um dos quatro veios da máquina de lingotamento contínuo da V&M do BRASIL S.A existem dois agitadores: um deles no molde e o outro na zona de refrigeração secundária (cinco metros abaixo do molde). As bobinas do agitador do molde estão centradas 43cm abaixo do topo do molde, onde o campo magnético é máximo. O diâmetro interno das bobinas é de 558mm e a altura do tubo de cobre (espessura de 12mm) é de 705mm. Com essa configuração, e em condições normais de uso, a corrente elétrica das bobinas dos agitadores presentes no molde pode alcançar 350A enquanto a frequência máxima é fixada em 5Hz. Para evitar o superaquecimento das bobinas há um sistema de resfriamento à água. Os agitadores do molde provocam um movimento rotacional contínuo do aço, enquanto os agitadores inferiores trabalham alternadamente a cada 3 segundos.

O agitador interfere consideravelmente no escoamento do aço dentro do molde e esse efeito pode ocasionar perturbações no menisco. Nessa região, localizada no topo do molde, realiza-se a adição de pó fluxante, que em contato com o aço em altas temperaturas, sinteriza e por último torna-se líquido lubrificando as paredes do molde. Dependendo da força de agitação gerada pelo equipamento, a camada líquida de escória pode ser arrastada, carreando inclusões para o aço líquido.

A agitação eletromagnética (EMS) se baseia no princípio de que o aço é um metal condutor elétrico, pois em temperaturas da ordem de 1500°C ele perde suas características ferromagnéticas. Assim o metal líquido dentro da casca solidificada pode ser colocado em movimento através de forças eletromagnéticas. Por ser um condutor elétrico, a variação do campo magnético que lhe é imposto faz surgir no mesmo, correntes induzidas, que produzem campos contrários a fim de anular esta variação de campo. Esse fenômeno é chamado de Lei de Indução de Faraday-Lenz. Esses campos induzidos interagem com o campo externo gerando a chamada força de Lorentz. Essa força é que dá origem ao movimento, geralmente rotacional, do aço líquido dentro da casca solidificada. O campo magnético é criado pelas bobinas que circundam o molde e sua intensidade depende da corrente elétrica e da frequência aplicadas.

## **2 METODOLOGIA**

### **2.1 Modelagem Numérica para a Agitação Eletromagnética e Escoamento Fluidodinâmico**

Desde que a agitação eletromagnética começou a ser aplicada em processos de lingotamento contínuo, cálculos e simulações têm sido feitos com o objetivo de alcançar um melhor entendimento dos efeitos da agitação no aço líquido. Muitos estudos em simulações físicas e matemáticas permitem hoje em dia conhecer quais são os limites de tais sistemas como a região do menisco onde arraste de escória pode ocorrer <sup>[4]</sup>. O modelo eletromagnético usado neste trabalho está baseado na solução das equações de Maxwell, que regem os fenômenos eletromagnéticos. Este modelo foi desenvolvido usando a formulação de elementos finitos, empregada no software comercial Ansys/Emag. O modelo numérico foi desenvolvido pela STE – Science Technology & Engineering – para analisar o comportamento da interface metal-escória sob o efeito da agitação eletromagnética. Este trabalho foi dividido em duas partes. A primeira delas foi o desenvolvimento de um modelo numérico do agitador eletromagnético. Na segunda etapa desenvolveu-se um modelo numérico fluidodinâmico, para descrever o

escoamento do aço líquido dentro do molde, bem como o comportamento da camada líquida de escória no topo do molde, sob o efeito da agitação eletromagnética. O efeito do agitador é inserido através do campo de forças calculado no modelo eletromagnético. Sendo assim, a geometria do modelo pode ser visualizada na figura 2. Nesta figura pode ser observado o agitador, formado por seis bobinas dispostas em torno do núcleo de ferro.

Para a validação do modelo, medidas do campo magnético foram feitas pela empresa Fazer – Ciência e Inovação (FC&I), ao longo da linha que passa no centro ao longo do comprimento do molde, e os resultados confrontados com os calculados pelo modelo. Posteriormente as forças são acopladas ao modelo fluidodinâmico, desenvolvido na segunda etapa.

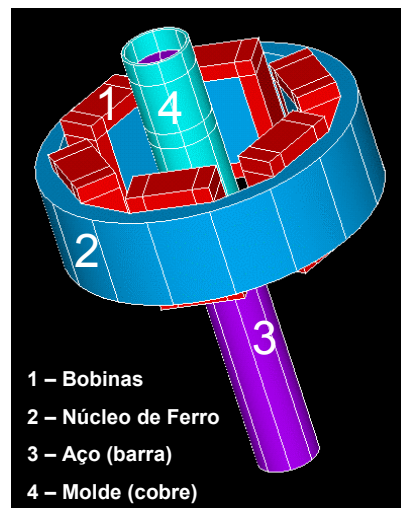


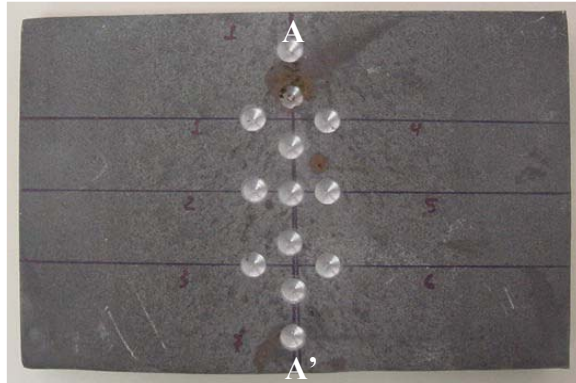
Figura 2 - Geometria do agitador eletromagnético

## 2.2 Experimentos Realizados na aciaria da V&M do Brasil S.A.

Foi realizado um experimento, a partir das informações fornecidas pela modelagem, para avaliar as reais influências da agitação eletromagnética na macrossegregação e na redução da porosidade prevenindo-se o arraste de inclusões. Foi utilizado no experimento o aço 100Cr6 – alto teor de carbono (0,95%) e alto teor de cromo (1,45%). Esse aço apresenta elevada segregação e porosidade, gerando perdas durante a laminação.

Primeiramente o aço 100Cr6, em uma só corrida e um só veio, foi lingotado nas mesmas condições de velocidade, superaquecimento e refrigeração secundária, excetuando-se a agitação eletromagnética. Os experimentos foram realizados para corrente de agitação normal (75A) e corrente de agitação alta (240A). As barras lingotadas foram separadas e cortadas longitudinalmente. Nesta etapa foram realizados dois testes: análises químicas em aparas de aço mediante perfurações das amostras longitudinais no centro das barras e análises macrográficas para avaliação da segregação central após ataque químico com ácido. Finalmente, amostras de tubos trefilados após laminação a quente, foram inspecionados com ultra-som para verificar-se a contaminação por inclusões com o objetivo de avaliar-se a construção do modelo

fluidodinâmico na previsão das condições seguras contra o arraste de inclusões quando elevada potência de agitação eletromagnética é utilizada. Foi utilizado o método axial para avaliação da macrossegregação. Esse método consiste na avaliação da composição química ao longo do centro da barra (direção AA'), como mostrado na Figura 3. Nessa figura é exposto também o método radial de avaliação da macrossegregação, o qual não foi utilizado neste trabalho.



**Figura 3** - Avaliação da macrossegregação axial ao longo da linha AA' em amostra longitudinal.

Para o aço 100Cr6 foram analisados os teores de carbono e cromo já que estes elementos apresentam maior tendência a segregar. Para avaliação dos resultados calcularam-se os índices de macrossegregação ( $I_s$ ) definido pela equação 2.1:

$$I_s = \left[ \left( \frac{\bar{x}}{x_0} \right) - 1 + \left( \frac{S}{x} \right) \right] \cdot 1000 \quad (2.1)$$

onde,

$I_s$  é o índice de macrossegregação calculado para cada amostra (9 perfurações);

$\bar{x}$  é o teor médio do elemento nas 9 perfurações em cada amostra;

$x_0$  é o teor do elemento no aço líquido amostrado no distribuidor;

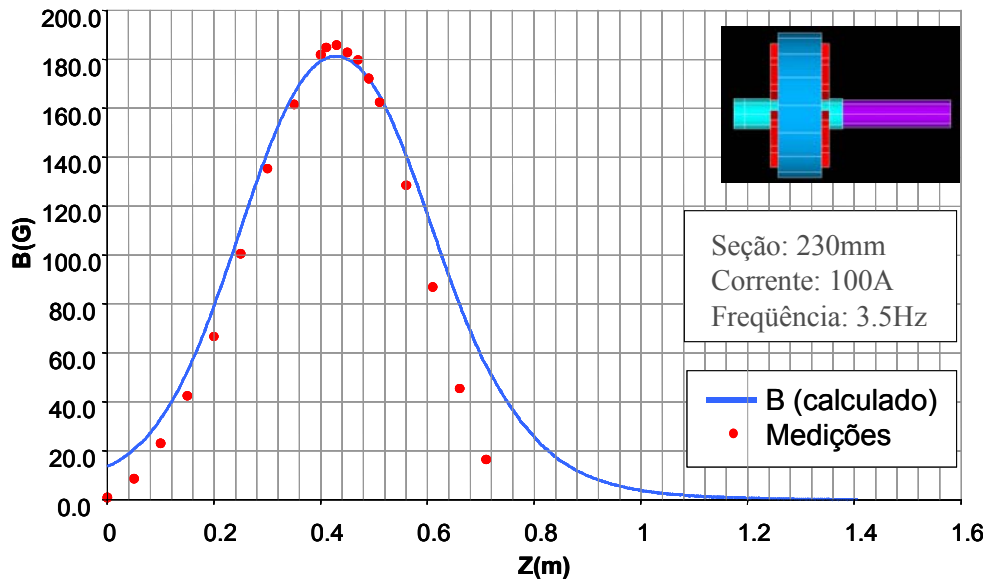
$S$  é o desvio padrão do teor do elemento para cada amostra.

Finalmente, amostras de tubos trefilados após laminação a quente foram inspecionadas com ultra-som para verificar-se a contaminação por inclusões.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Modelo Eletromagnético

Para validação do modelo foram feitas medidas de campo magnético pela FC&I, e os resultados comparados com os resultados do modelo. A Figura 4 mostra os resultados para um caso em um gráfico de densidade de fluxo magnético (B) em função do comprimento do molde (z). A figura mostra uma boa concordância entre os perfis de campo. Resultados semelhantes foram encontrados para outros casos, confirmando a validade do modelo.

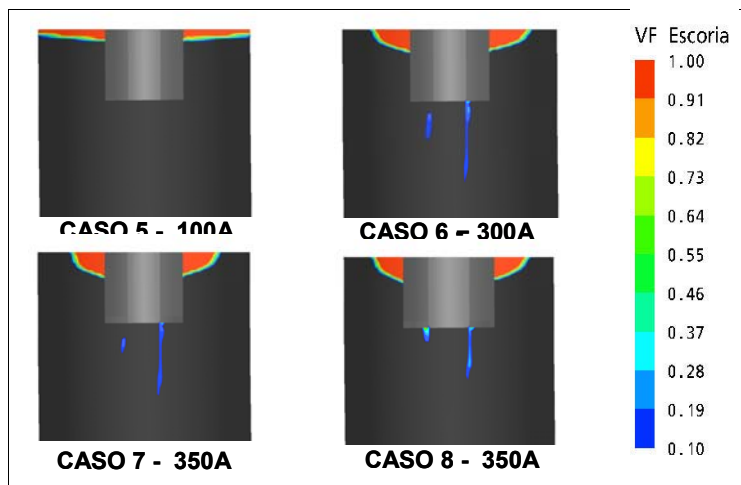


**Figura 4** - Campos magnéticos (B) medidos e calculados pelo modelo em função do comprimento do molde

### 3.2 Modelo Fluidodinâmico

Foi utilizado o software ANSYS/CFX10 para resolução das equações de Navier-Stokes em regime turbulento com as forças calculadas previamente pelo modelo eletromagnético. A Figura 5 mostra os perfis da interface escória/aço no topo do molde para a seção de 230mm, variando-se a corrente de agitação. Analisando-se a figura 5, pode-se afirmar que a interface se mantém estável para o CASO 5, e com o aumento da corrente, a camada de escória aumenta de espessura próximo à parede da válvula submersa, expondo o aço líquido junto às paredes do molde.

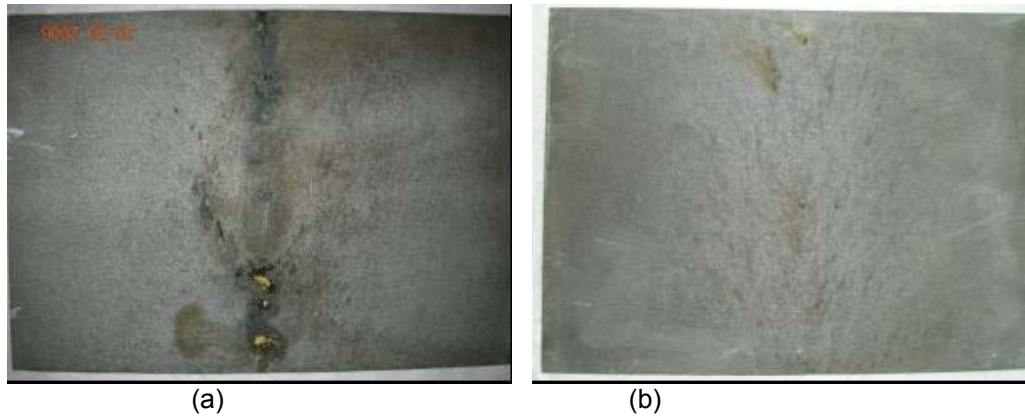
Este efeito é em virtude do movimento rotacional que tende a criar um efeito semelhante a uma centrífuga transferindo para o centro o fluido mais leve.



**Figura 5** - Interface: fração volumétrica de escória (230mm / 4,25Hz)

### 3.3. Análises Metalográficas

Para avaliar a macroestrutura de solidificação, foram feitos ataques químicos com ácido clorídrico por 20 minutos. Os resultados estão mostrados na figura abaixo.



**Figura 6** – Macrografias: (a) 100Cr6 corrente de 75A; (b) 100Cr6 corrente de 240A

Comparando os resultados, observou-se que as amostras com agitação mais alta apresentaram segregação central menor. Isso é observado pelas linhas de segregação (linhas escuras em forma de V) que se mostram menos pronunciadas na amostra com agitação de 240A. Além disso, a presença de porosidade no centro das barras também se mostra intensamente reduzida.

### 3.4 Análises Químicas

A partir dos resultados das análises químicas das aparas de aço coletadas por perfuração, foram calculados os índices de macrossegregação de acordo com a equação 2.1. Para o aço 100Cr6, os teores de carbono e cromo obtidos a partir da análise do aço líquido foram %C = 0,95 e %Cr = 1,45. Para certificar-se da diferença significativamente estatística para os índices de macrossegregação calculados para os experimentos com 75A e 240A nos agitadores eletromagnéticos foram feitos testes de hipóteses para a variabilidade e médias populacionais utilizando o programa Minitab 14.0. As hipóteses avaliadas no teste foram:

- hipótese nula ( $H_0$ ): As médias são iguais
- hipótese alternativa ( $H_1$ ): as médias são diferentes

Os resultados estão mostrados na Tabela 1 abaixo.



**Tabela 1:** Testes de hipótese para a média das distribuições dos índices de macrosegregação para C e Cr.

**Two-Sample T-Test and CI: indice macrosseg. C\_75A; indice macrosseg. C\_240A**

Two-sample T for indice macrosseg. C\_75A vs indice macrosseg. C\_240A

	N	Mean	StDev	SE Mean
indice macrosseg	13	302,7	34,2	9,5
indice macrosseg	13	237	105	29

Difference = mu (indice macrosseg. C\_75A) - mu (indice macrosseg. C\_240A)  
 Estimate for difference: 65,8462  
 95% CI for difference: (0,2511; 131,4412)  
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 2,15 P-Value = 0,049 DF = 14

**Two-Sample T-Test and CI: indice macroseg. Cr\_75A\_1; indice macroseg. Cr\_240A\_1**

Two-sample T for indice macroseg. Cr\_75A\_1 vs indice macroseg. Cr\_240A\_1

	N	Mean	StDev	SE Mean
indice macroseg.	13	127,0	23,9	6,6
indice macroseg.	13	83,5	29,7	8,2

Difference = mu (indice macroseg. Cr\_75A\_1) - mu (indice macroseg. Cr\_240A\_1)  
 Estimate for difference: 43,5385  
 95% CI for difference: (21,6979; 65,3790)  
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 4,11 P-Value = 0,000 DF = 24  
 Both use Pooled StDev = 26,9793

Assumindo variâncias diferentes e mais elevadas para a distribuição relacionada a utilização de 240A de corrente elétrica, a diferença estimada entre as médias das duas distribuições amostrais foi de 65,8462 para a avaliação da macrosegregação relativa ao carbono. O p-valor calculado foi 0,049, ligeiramente menor que  $\alpha = 0,05$ , indicando que as médias populacionais são diferentes e inferiores para utilização de corrente elétrica mais elevada no molde. Para as análises de cromo, assumindo variâncias iguais, a diferença estimada entre as médias das duas populações foi de 43,5385. O intervalo de confiança para a diferença entre as médias foi determinado como (21,6979; 65,379). O p-valor calculado foi igual à zero, indicando que as distribuições são diferentes.

### 3.5 Resultados da Inspeção no Ultra-som

Após laminação a quente e seguindo-se o procedimento de trefilação de tubos, amostras foram inspecionadas com ultra-som para verificar-se a contaminação por inclusões não sendo registradas nenhuma anormalidade. Na figura 7 é mostrada o resultado de inspeção para um tubo originado de uma barra lingotada com corrente de 240A.

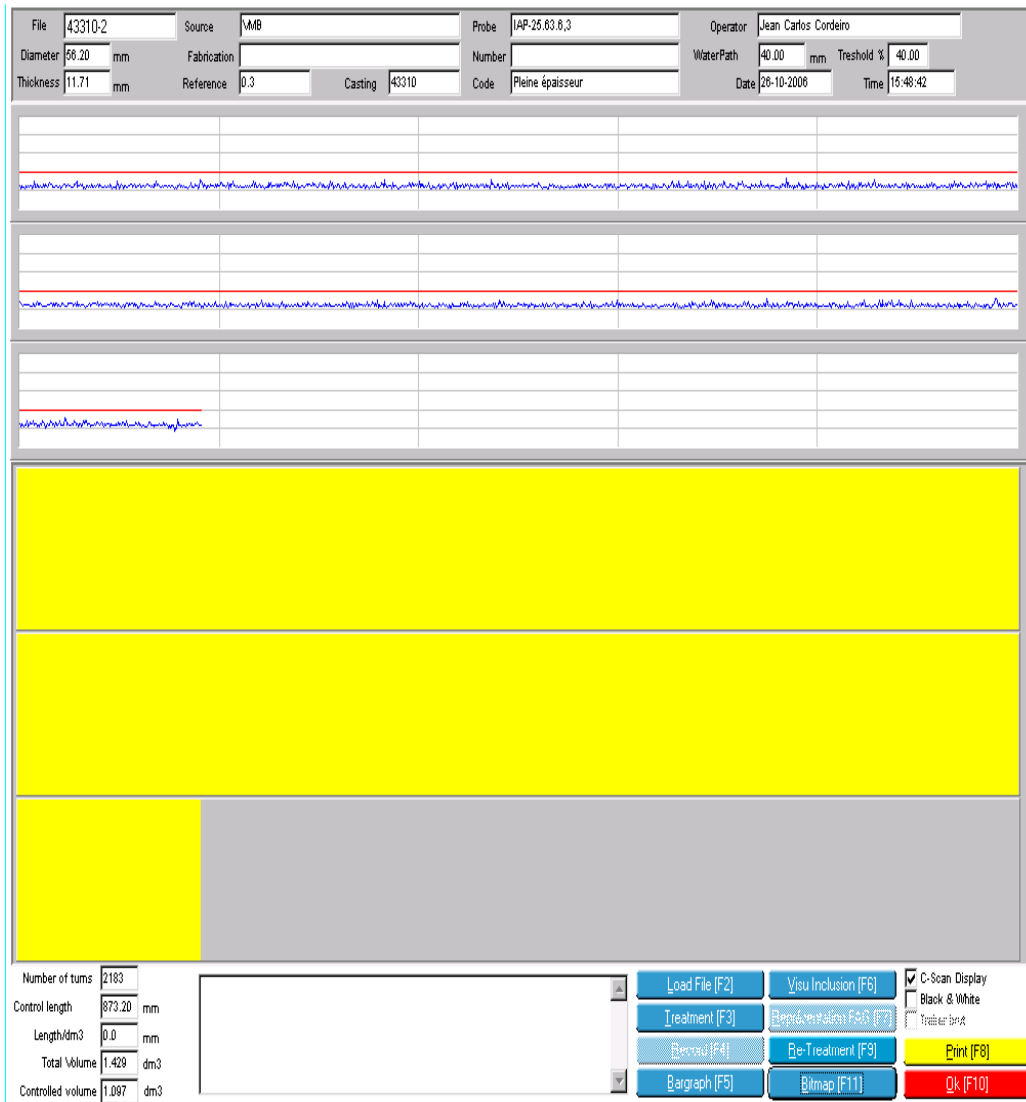


Figura 7 - Gráfico de inspeção via ultra-som demonstrando qualidade interna atendida

## 4 CONCLUSÕES

Após a construção do modelo de agitação eletromagnético acoplado ao modelo de escoamento fluidodinâmico, e considerando também os experimentos conduzidos pode-se concluir que:

- a validação da modelagem foi plenamente verificada contrapondo as medições de campo magnético efetuadas em campo;
- teoricamente a utilização de uma corrente de 100A e 3,5Hz nas bobinas dos agitadores eletromagnéticos nos moldes quando do lingotamento da bitola de 230mm, permitirão uma operação com segurança evitando-se o arraste de inclusões para as barras produzidas;
- experimentalmente, a utilização de corrente elétrica de 240A para a operação dos agitadores presentes nos moldes gerou a obtenção de uma estrutura de solidificação adequada para os processos de produção de tubos sem costura;
  - reduzindo o valor médio dos índices de macrossegregação baseados no carbono e cromo;
  - permitindo uma operação segura, não acarretando arraste de inclusões.

## REFERÊNCIAS

- 1 S. Kunstreich, "Electromagnetic stirring for continuous casting", *La Revue de Métallurgie*, Part 2, November 2003, p1043-1061
- 2 K. Ayata, T. Mori, T. Fujimoto, T. Ohnishi, I. Wakasugi, "Improvement of macrosegregation in continuously cast bloom and billet by electromagnetic stirring", *Transactions ISIJ*, Vol.24, 1984, p931-939
- 3 J.J. Moore, "Review of axial segregation in continuously cast steel", *Continuous casting* (ed.) J.J. Moore (Iron&Steel Soc.), Vol.3, 1984, p11-20
- 4 L.B. Trindade, A. C. F. Vilela, M. T. M. B. Vilhena, R. B. Soares, "Efeitos térmicos e fluido-dinâmicos devidos a um agitador eletromagnético para tarugos", *Rev. Esc. Minas*, Vol.54, No.3, July/Sept 2001