

# REDUÇÃO DO ÍNDICE (%) DE TRINCAS LONGITUDINAIS EM PLACAS DE LC DA GERDAU USINA OURO BRANCO<sup>1</sup>

Álvaro Gomes da Silva<sup>2</sup>  
Alisson Paulo de Oliveira<sup>3</sup>  
Alvimar Paes Pinto Junior<sup>4</sup>  
Bruno de Assis Mourão<sup>3</sup>  
Carlos Vinícius Domingos de Carvalho<sup>3</sup>  
Gilberson Mendonça Storck<sup>3</sup>  
Rui Coelho de Assis Filho<sup>5</sup>  
Werlisdary Carvalho Souza<sup>3</sup>  
Carlos Antônio da Silva<sup>6</sup>  
Gabriel Romeu T Santos<sup>7</sup>

## Resumo

Ocorrência de Trincas Longitudinais em placas via Lingotamento Contínuo é um problema que importuna há algum tempo os produtores de aço, uma vez que ocasionam perdas de produtividade e sucateamento de algumas peças. O problema está concentrado em aços da família Peritético e Médio Carbono com teores de carbono entre 0,09% e 0,17%. Muitos fatores têm sido atribuídos para a incidência de trincas longitudinais e devido à complexidade do problema, é difícil isolar o parâmetro que mais impacta no aparecimento das trincas, sendo assim, utilizou-se uma equação que ajuda a quantificar o índice de trincas longitudinais chamado “fator F”, com este fator, consegue-se agrupar os parâmetros geométricos do fluxo de aço no Molde em uma única equação. Os resultados foram bastante satisfatórios com uma redução do índice de trincas longitudinais: 29,58% para 0,80% do aço Peritético Micro Ligado (%C: 0,10; %Mn: 1,05%); 15,82% para 1,74% do aço Peritético Micro Ligado (%C: 0,14; %Mn: 1,52%) e 43,59% para 0,0% do aço Médio Carbono Micro Ligado (%C: 0,15; %Mn: 1,38%) e, eliminando o sucateamento de placas.

**Palavras-chave:** Trincas longitudinais; Fluxo de aço; Molde; Fator F.

## REDUCTION OF LONGITUDINAL CRACKS RATE (%) IN SLABS FROM CONTINUOUS CASTER AT GERDAU OURO BRANCO STEELWORKS

### Abstract

Occurrence of Longitudinal Cracks in slabs via Continuous Casting has been a troublesome problem for steel producers, since they cause productivity losses and scrapping. The problem is concentrated in both Peritectic Steels and Medium Carbon Steels families with carbon content between 0.09% and 0.17%. Many factors have been attributed to the incidence of longitudinal cracks and due to the complexity of the problem it is difficult to isolate the single parameter that impacts the appearance of cracks. Therefore, an equation was used to help quantifying the index of longitudinal cracking what is called the "F factor". With this factor, it is possible to group the geometric parameters of the steel flow in the mold in just a single equation. The results were quite satisfactory with reduction of longitudinal cracking index: 29.58% to 0.80% for Alloyed Peritectic steel (%C: 0,10; %Mn: 1,05%); 15,82% to 1,74% for Alloyed Peritectic steel (%C:0,14; %Mn:1,52%) and 43,59% to 0,0% for Alloyed Medium Carbon steel (%C:0,15; %Mn:1,38%) and thus eliminating the scrapping of the slabs.

**Key words:** Longitudinal cracks; Steel flux; Mold; F factor.

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

<sup>2</sup> Consultor Técnico, Consultoria ME, Ouro Branco, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Metalurgista, Gerdau Usina Ouro Branco, MG, Brasil.

<sup>4</sup> Técnico de Processo, Gerdau Usina Ouro Branco, MG, Brasil.

<sup>5</sup> Engenheiro Produção, Gerdau Usina Ouro Branco, MG, Brasil.

<sup>6</sup> Engenheiro Metalúrgico, PhD. Professor. UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

<sup>7</sup> Graduando em Engenharia Metalúrgica. UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

# 1 INTRODUÇÃO

A presença de trincas longitudinais em placas via Lingotamento Contínuo é um problema que importuna há algum tempo os produtores de aço, uma vez que ocasionam perdas de produtividade (necessidade de escarfagem das placas) além de sucateamento de algumas peças devido ao fato de ultrapassarem a tolerância máxima permitida de profundidade da trinca após escarfagem. O problema está concentrado em aços da família Peritético e Médio Carbono com teores de carbono entre 0,09% e 0,17% e, por serem aços críticos e possuírem uma importância comercial elevada, fez necessário o estudo destes aços na Gerdau Usina Ouro Branco com o objetivo de reduzir o índice de trincas longitudinais que ocasionam perdas de produtividade e sucateamento de algumas peças.

Analisando as perdas atuais para os aços da família Peritético e Médio Carbono, tem-se um histórico com um elevado índice de trincas longitudinais ( $\% \text{Índice} = \frac{n^\circ \text{ de placas com trincas}}{n^\circ \text{ total placas}} * 100$ , ocasionando baixo rendimento de Acabamento de Placas ( $\% \text{ Rend Acab} = \frac{\text{peso de aprovadas}}{\text{peso de placas inspecionadas}} * 100$ ).

A Figura 1 apresenta os dados referentes ao índice de trincas longitudinais (máximo por campanha) e o rendimento de Acabamento de Placas nos aços da família Peritético e Médio Carbono.

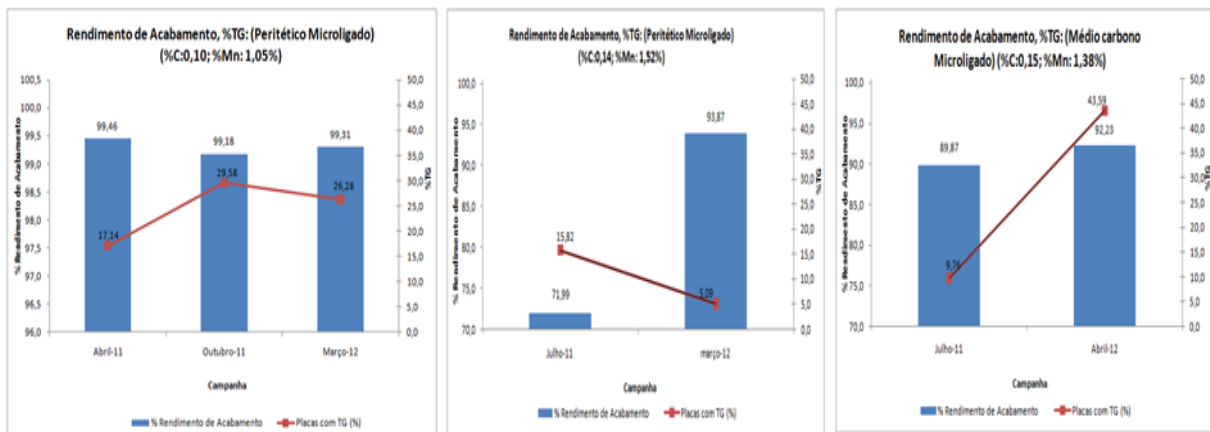


Figura 1. Perdas históricas para os aços da família Peritético e Médio Carbono.<sup>(1)</sup>

O defeito Trinca longitudinal é um defeito superficial típico, que ocorre nas proximidades do centro da largura da placa e apresenta características metalográficas típicas, tais como, segregação local de fósforo, de carbono, de manganês e de enxofre tanto na direção do comprimento quanto na profundidade. Segundo Valadares e Bezerra,<sup>(2)</sup> as trincas longitudinais faciais desenvolvem-se na direção do comprimento e da espessura do veio e ao longo das segregações.

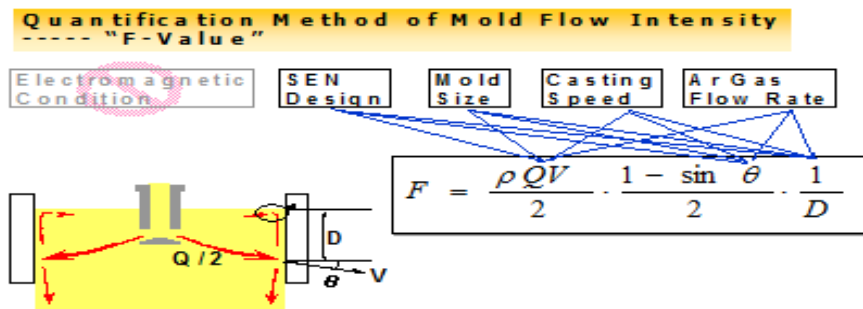
A Figura 2 apresenta uma fotografia de uma trinca longitudinal no centro da face de uma placa de lingotamento contínuo.



**Figura 2.** Trinca Longitudinal no centro da face de uma placa de lingotamento contínuo.<sup>(2)</sup>

Os aços com teor de carbono de 0,09% e até 0,17% têm altíssimo potencial de ocorrência de Trincas Longitudinais onde ocorre a reação Peritética com a ferrita delta e a austenita com tendência à contração por causa da diferença de densidade entre a ferrita delta e a austenita.

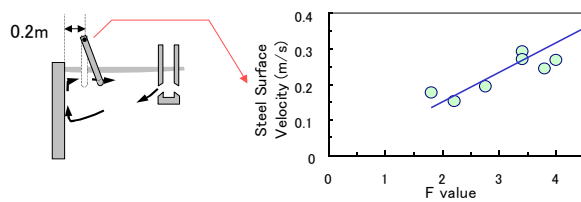
As condições de fluxo na região da interface metal-escória e na região do menisco devem ser tais que garantam energia térmica para a fusão do fluxante e lubrificação das paredes do molde, sem que haja entranhamento de escória ou de argônio para o interior da poça de aço. O fluxo no menisco do molde pode ser quantificado pelo cálculo do valor de F (N/m) desenvolvido por Kubota et al.,<sup>(3)</sup> sendo um parâmetro que relaciona o fluxo no molde ao estado de turbulência da interface onde,  $\rho$  – massa específica do líquido, (kg/m<sup>3</sup>); Q – Vazão de entrada do líquido, (m<sup>3</sup>/s); V – Velocidade no ponto de impacto junto à face estreita, (m/s); D – Distância do ponto de impingimento (ponto de impacto na face estreita do molde) ao Menisco (m) e  $\theta$  – Ângulo entre o Vetor Velocidade e o plano horizontal no ponto de impingimento (Figura 3).



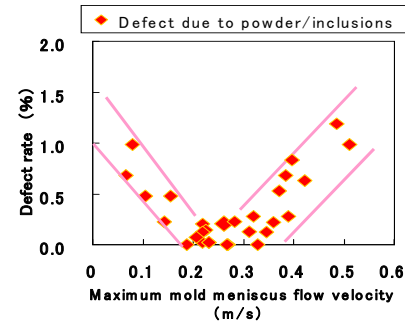
**Figura 3.** Quantificação da intensidade de turbulência interfacial no interior do molde de lingotamento contínuo, através do fator F.<sup>(3)</sup>

Kollberg, Lofgren e Lehman<sup>(4)</sup> encontraram uma relação direta entre o valor F e a velocidade no menisco do Molde, onde para obtenção de baixos níveis de defeitos, o valor F está entre a faixa de 3,0 ~ 4,5 e ainda, para obtenção de baixos níveis de defeitos, foi verificado que a velocidade de fluxo no menisco do Molde deve estar na faixa de 0,20 ~ 0,35 (m/s) (Figura 4).

### Relationship between F-value and Steel Surface Velocity



### Relationship between meniscus flow velocity and defect rate



**Figura 4.** Relação entre o valor F com a velocidade de fluxo no menisco e a relação entre velocidade com a taxa de defeitos.<sup>(4)</sup>

Segundo Kondo et al.,<sup>(5)</sup> a causa da trinca longitudinal em baixas velocidades de lingotamento pode ser explicada pela baixa velocidade de fluxo no menisco. Pode ser estimado que em baixas velocidades de fluxo do menisco, para o qual ocorre menor suprimento de fluxo de calor ao mesmo, se observam condições características de "menisco frio"; com a possível formação de ilhas de material solidificado, baixa velocidade de fusão do pó fluxante e conseqüente deficiência de lubrificação. A contramedida adotada para isto é proposta na Tabela 1.

**Tabela 1.** Condições de Lingotamento para ocorrência e prevenção de Trinca Longitudinal<sup>(5)</sup>

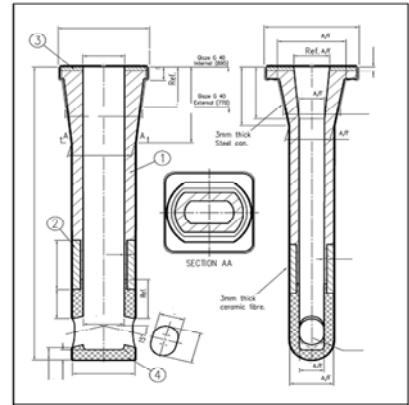
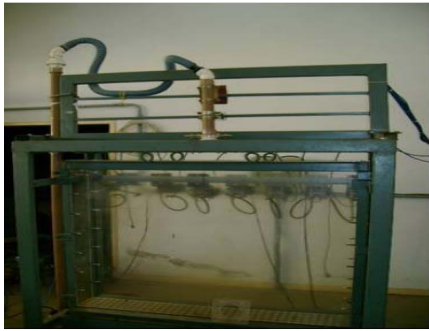
	Casting speed (m/min)	Slab width (mm)	Slab thickness (mm)	SEN	Submerge d depth of SEN (mm)	Argon gas from stopper (L/min)	Calculated F-value	Optimum F-value	Remarks	
Conditions observed longitudinal crack at slow speed	0.80	1650	250	Current design	170	5	2.74	Minimum 3.0 Maximum 4.5	Below optimum F-value	With longitudinal cracks
	0.90						2.90			
Proposed condition for preventing longitudinal crack at slow speed	0.80				120	10	3.16	Within optimum F-value		
	0.90						3.74			

(Note) Optimum F-value range = 3.0 to 4.5

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Modelamento Físico e os Parâmetros Geométricos e Operacionais

Para a condução dos experimentos foi utilizado um modelo em escala reduzida, 0,6:1 de um molde de lingotamento de placas, construído em acrílico sendo empregado um único tipo de válvula submersa, nomeada "Padrão". A válvula padrão possui uma geometria de porta de saída de válvula, em formato "ovalada", com dois ângulos diferentes, 15° e 25°. As diversas geometrias são mostradas na Figura 5.



**Figura 5.** (a) Vista da montagem experimental do molde; e (b) vista real da válvula submersa portas de válvulas submersas em acrílico.<sup>(6)</sup>

As várias combinações testadas estão expostas na Tabela 2. Os valores máximos e mínimos de throughput foram definidos considerando os valores típicos industriais, com densidade do aço de 7,4 t/m<sup>3</sup>; tempo de lingotamento menor ou igual a 51 minutos; peso de aço na panela de 220 t; lingotamento por um veio.

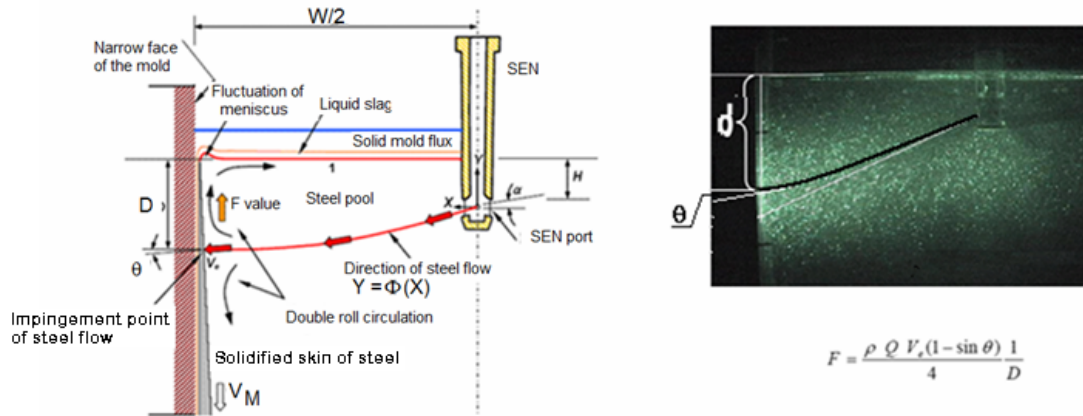
**Tabela 2.** Parâmetros geométricos e operacionais<sup>(6)</sup>

PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E OPERACIONAIS												
Confeccção da SEN		Indústria						Modelo				
Tipo de válvula	Formato da saída da porta da SEN	Ângulo da saída da SEN [°]	Espessura [mm]	Largura [mm]	Vazão (Throughput) [ton./min]	Imersão da SEN [mm]	Velocidade [m/min]	Espessura [mm]	Largura [mm]	Vazão (Throughput) [l/min]	Imersão da SEN [mm]	Velocidade [m/min.]
Padrão	Ovalada	15, 25	250	1600	4,21	130 e 180	1,5	150	960	160	80 e 110	1,2
					4,74		1,6			180		1,2
					5,03		1,7			190		1,3
					4,44		1,2			165		0,9
					4,81		1,3			180		1,0
					5,18		1,4			195		1,1
				2000	4,44	1,2	165		0,9			
					4,81	1,3	180		1,0			
					5,18	1,4	195		1,1			
					5,18	1,4	195		1,1			

## 2.2 Determinação do Parâmetro F via Plano Laser

A técnica de visualização de fluxo consiste em incidir um plano de laser contra o modelo de modo que este ilumine partículas (de densidade igual a do líquido e pequenas dimensões) contidas no fluido. As partículas tendem a acompanhar o fluxo do líquido, permitindo desta forma a identificação da trajetória. A Figura 6 mostra imagens obtidas através desta técnica, bem como exemplo dos parâmetros geométricos determinados.

Este experimento foi realizado para cada combinação de vazão de líquido, geometria da SEN, profundidade de imersão e dimensões da placa, já apresentados na Tabela 2.

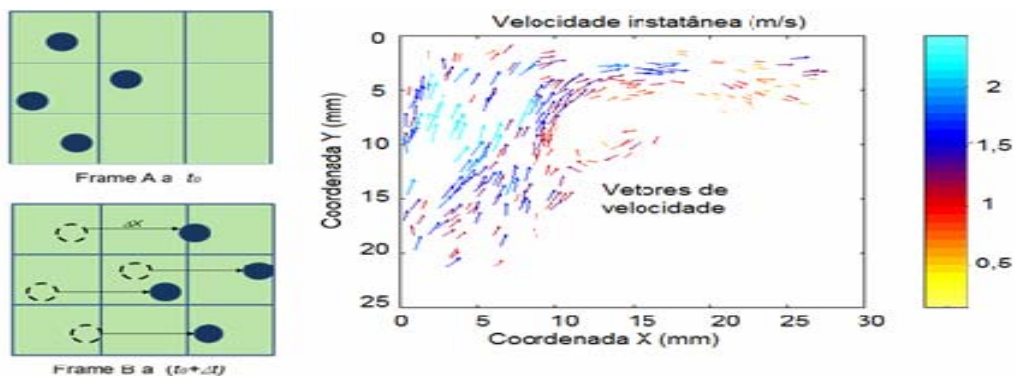


**Figura 6.** Determinação dos parâmetros  $\theta$  e  $D$  através da técnica de visualização por plano de laser.<sup>(6)</sup>

A vazão de água foi medida através de medidor eletrônico de vazão Fisher-Rosemont; a densidade da água foi assumida ser 1.000 kg/mm<sup>2</sup>. Nos casos para os quais não houve medição direta de velocidade no ponto de impacto,  $V$ , optou-se por tomar como valor característico de velocidade aquele correspondente à vazão medida pela porta da SEN, isto é:  $V = Q/\text{Área das portas da SEN}$ .

### 2.3 Velocimetria PIV (*Particle Image Velocimetry*)

A técnica PIV consiste basicamente em seguir o fluxo de micropartículas dispersas no fluido, as quais por sua vez, em função de suas características de forma, tamanho e densidade, “seguem o fluxo”. Através da técnica PIV pode-se determinar o deslocamento médio das partículas abrigadas em uma micro-região, denominada área de interrogação, para outra contígua, através de pulsos de feixe de laser (Figura 7). As imagens são estocadas na memória do computador e digitalizadas, sendo todas elas subdivididas em tais regiões.



**Figura 7.** Princípio de determinação de velocidade de partículas pela técnica PIV.<sup>(7)</sup>

O sistema PIV foi utilizado para validar a correlação de  $F$  (calculado considerando a velocidade medida pelo PIV no ponto de impacto) com a velocidade no menisco, que, sendo válida a relação, pode-se expressar os valores de  $F$  para identificar faixas propensas a defeitos, da mesma forma que pode ser visto com a velocidade do menisco, conforme Kollberg, Lofgren e Lehman<sup>(4)</sup> (Figura 4).

## **2.4 Avaliação dos Resultados de Qualidade via Modelagem Física**

Para que se possa confirmar a efetividade dos resultados experimentais determinados na modelagem física do molde de lingotamento com os parâmetros geométricos e operacionais citados na Tabela 2, procurou-se uma correlação com os resultados industriais relativos a defeitos em placas. Isto se deu como se segue:

- a partir dos resultados do valor F determinados no modelo, utilizou-se a equação de regressão correspondente para se estimar os valores de F referentes a uma máquina industrial da Gerdau Usina Ouro Branco, utilizando dados de placas de aços da família do Médio Carbono e Peritético, por se tratar historicamente de aços com menor índice de clogging, sem grandes interferências no fluxo de aço como entupimento da válvula submersa e por ser os aços propensos a trincas longitudinais;
- os valores de F foram então identificados entre as placas com e sem defeitos. O defeito considerado inclui aquele oriundo de Trinca Longitudinal. A incidência deste defeito foi avaliada quanto à sua frequência (peso de placas com defeito no cliente/peso de placas aprovadas x 100) e também quanto à severidade das mesmas, ou seja, em termos de profundidade de trinca.

## **3 RESULTADOS**

### **3.1 Determinação do Parâmetro F via Plano Laser**

Foram realizados testes com e sem utilização do Hélio, sendo que, para todas as configurações, o valor de F é influenciado pela imersão da válvula submersa e pelo ângulo da porta de saída da SEN, ou seja, o valor de F tende a diminuir com o aumento da profundidade de imersão e do ângulo da porta de saída da SEN (Figuras 8 e 9). Tal fato pode ser explicado uma vez que a uma maior imersão da válvula submersa (SEN) implica em ponto de descarga do aço líquido afastada da região do menisco, isto redundando em menores níveis de turbulência na interface metal-escória, contribuindo para a preservação da limpidez do produto lingotado. A formulação matemática para o cálculo de F indica que os valores do mesmo são decrescentes quanto maior for o ângulo de saída do jato e, por conseqüência, menor intensidade de fluxo na região do menisco.

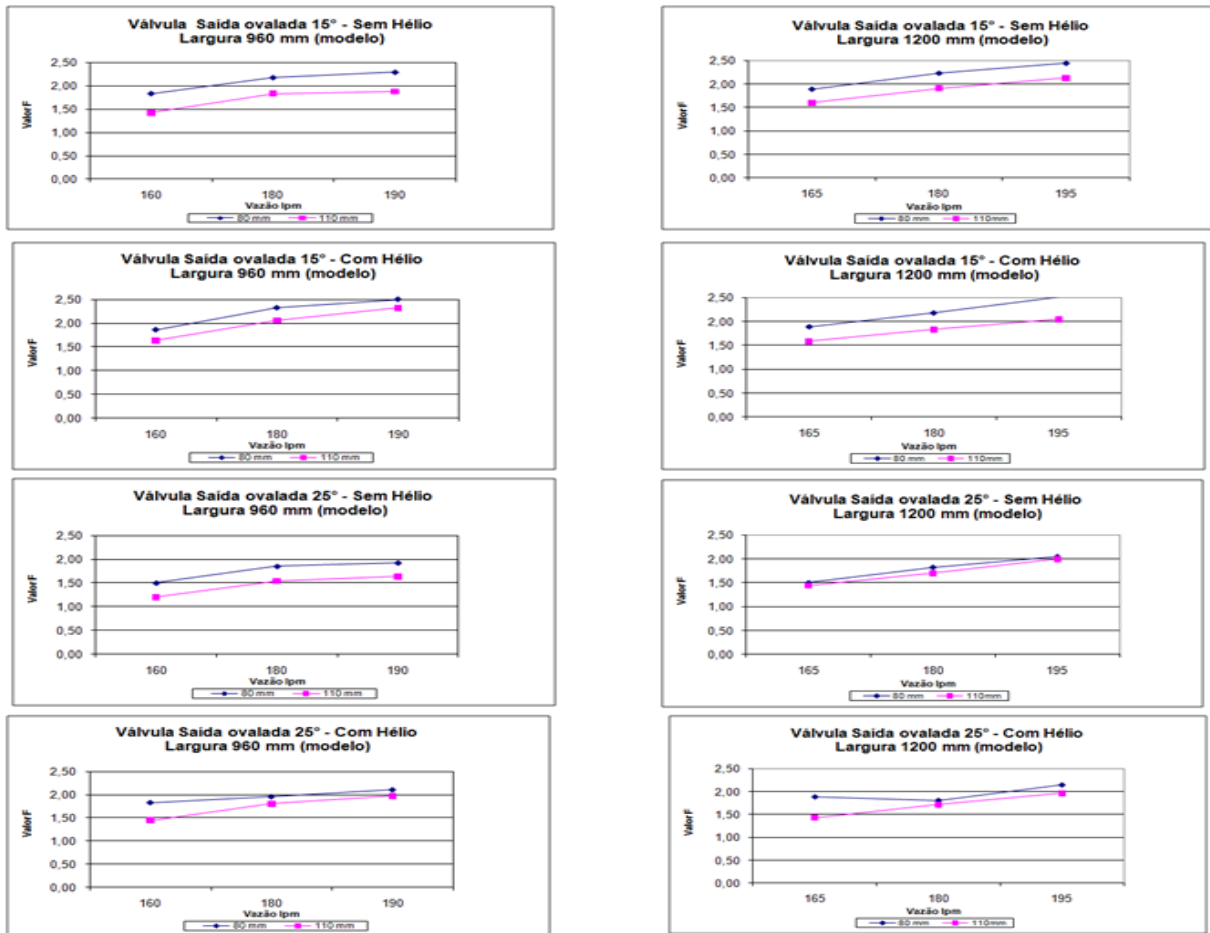


Figura 8. Influência da imersão sobre o valor F.<sup>(8)</sup>

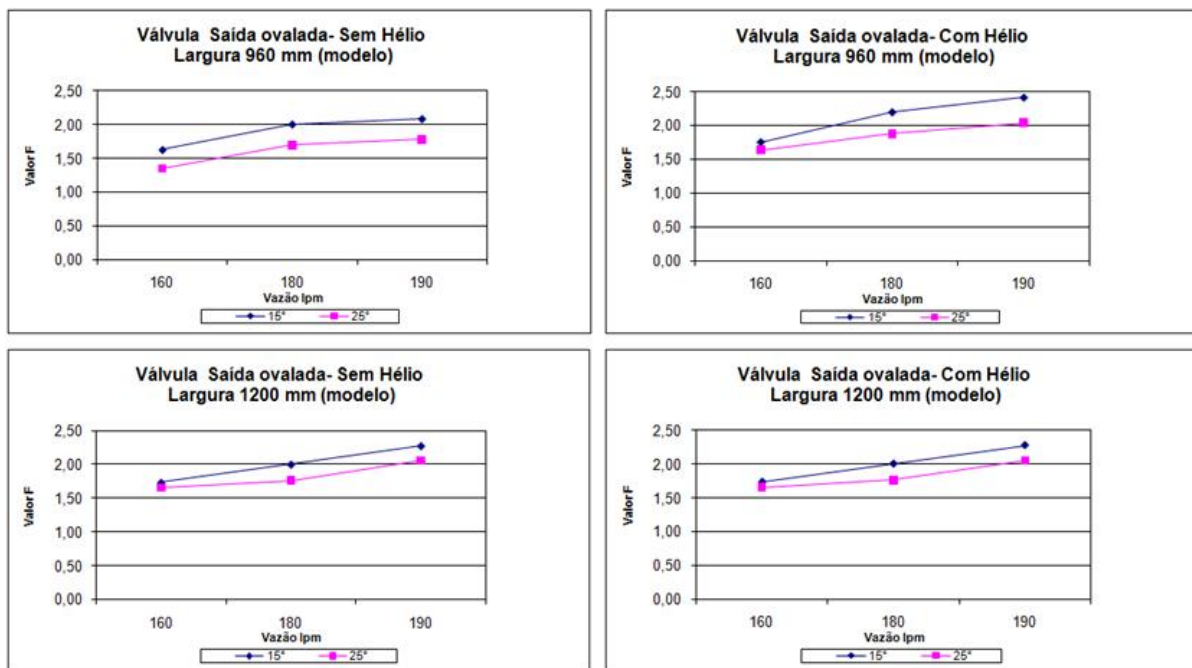


Figura 9. Influência do ângulo da porta de saída da SEN sobre o valor F.<sup>(8)</sup>

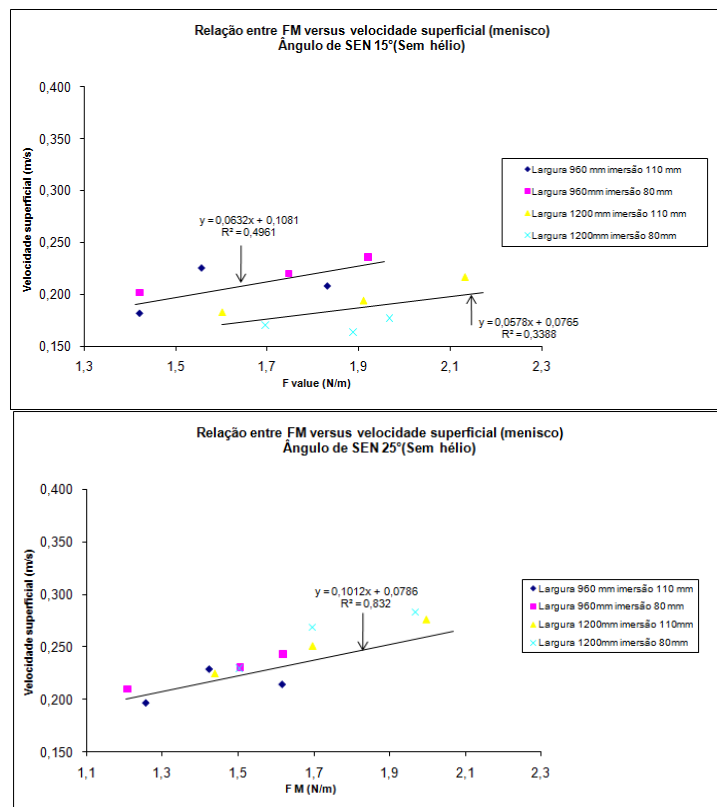
Para determinação do valor de F (calculado a partir da velocidade média na porta de saída da SEN) utilizou-se a equação seguinte, válida para o modelo onde será aplicada para os dados industriais.



$F = -0,09172 + 1003 * \text{vazão [m}^3/\text{s]} - 0,0291 * \text{Ângulo SEN [}^\circ] - 8,97 * \text{imersão [m]} + 0,339 * \text{largura [m]}$ . O valor de  $R^2$  para o fator F foi de 91,73%.

### 3.2 Validação Utilizando a Técnica PIV (*Particle Image Velocimetry*)

A Figura 10 representa a relação entre o parâmetro F e as respectivas velocidades medidas na região do menisco sem injeção de hélio. Para a figura de ângulo de porta de saída da SEN igual a 15° e na ausência de Hélio, existiria uma tendência válida para larguras de 960 mm (modelo) e outra aplicável para larguras de 1.200 mm (modelo). No caso da figura relativa ao ângulo da porta de saída da SEN igual a 25°, existiria uma tendência única para ambas as larguras. Pode-se utilizar o fator F para avaliar o grau de turbulência na interface metal/escória e no menisco.

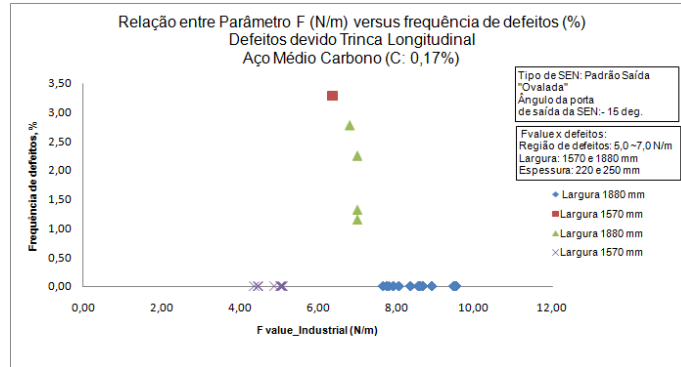


**Figura 10.** Correlação entre FM (parâmetro F do modelo, calculado com velocidade média na porta de saída da SEN) e velocidade superficial (menisco) para ângulo de 15° (sem hélio).<sup>(8)</sup>

### 3.3 Avaliação dos Resultados de Qualidade da Placa Lingotada Utilizando os Resultados de Modelagem Física

Para se confirmar a aplicabilidade dos resultados experimentais, foi realizado um levantamento de incidência de defeitos em placas, de modo a correlacioná-la às condições operacionais determinadas em termos do fator F. Utilizou-se a equação encontrada de F no item 3.1, calculado a partir da velocidade média na porta de saída da SEN.

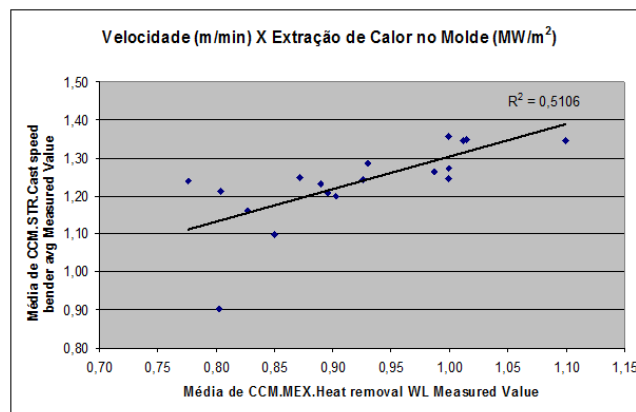
A Figura 11 representa a relação entre o fator F em relação à frequência do defeito (peso de placas com defeito no cliente/peso de placas aprovadas x 100) para o defeito Trinca Longitudinal. Para todos os defeitos avaliados, a região do fator F que se deve evitar varia de 5,0 N/m a 7,0 N/m. O aço avaliado é o da família Médio Carbono.



**Figura 11.** Range de defeito para fator F (N/m) levando em consideração F versus frequência do defeito Trinca Longitudinal.<sup>(8)</sup>

O defeito trinca longitudinal foi avaliada sua relação com o fator F levando em consideração o grau de severidade do defeito, que seria a relação da profundidade de trinca com valor de F.

Utilizou-se a regressão de múltiplas variáveis para definir os parâmetros de maior influência na incidência de trincas longitudinais. Foi considerado como variável resposta a “profundidade de trinca”, ou seja, o grau de severidade do defeito sendo o aço analisado o da família Peritético. Os resultados mostraram que a profundidade de imersão da válvula submersa e a quantidade de água no molde são parâmetros de maior importância. Isto porque, no caso desta operação industrial, a vazão de água no molde não é ajustada com a alteração da velocidade e, por consequência, para baixas velocidades, implica na redução da taxa de extração de calor (Figura 12), tornando-a irregular e assim contribuindo para a formação das trincas longitudinais. Para imersão de válvula submersa com maiores profundidades, ocorrem trincas mais profundas, o que pode ser explicado pelo congelamento do menisco.

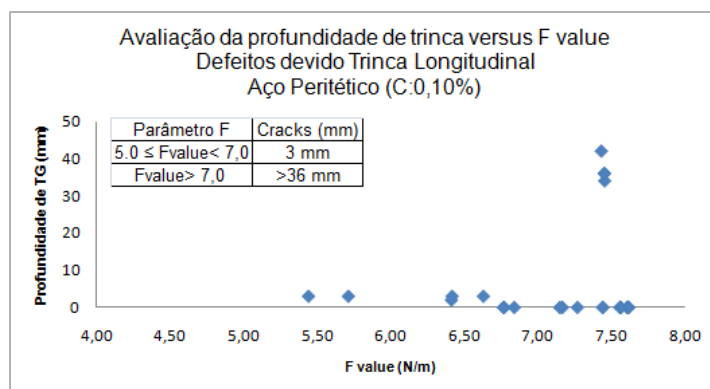


**Figura 12.** Relação entre a transferência de calor na face larga do raio externo versus velocidade de lingotamento.<sup>(8)</sup>

Pode-se utilizar como modelo os dados da regressão seguinte:

$$\text{Prof TG (mm)} = -4538 + 1,99 \cdot \text{profundidade de imersão da SEN [mm]} + 0,89 \cdot \text{fluxo de água no Molde [l/min]} \quad R^2 \sim 63\%$$

Procurou correlacionar o valor de F ao índice de severidade de TG (Figura 13).



**Figura 13.** Range de defeito para fator F (N/m) levando em consideração F versus profundidade de Trincas Longitudinais.<sup>(8)</sup>

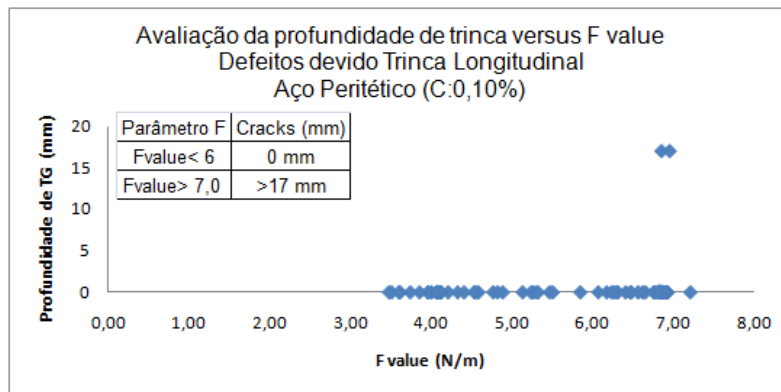
A maior severidade de trincas ocorre na faixa de F de 5,0 N/m a 7,0 N/m, o que pode ser explicado pela baixa velocidade de lingotamento (0,8 m/min a 0,9 m/min); as trincas seriam devidas ao freezing do menisco; adicionalmente à inadequação do pó fluxante (recomendado para altas temperaturas, altas velocidades de lingotamento). Portanto a imersão de válvula deve ser reduzida para minimizar o congelamento do menisco.

No caso de parâmetro F com valor maior que 7,0 N/m, observam-se corridas com e sem trincas. Para corridas com imersões acima de 0,15 m (velocidade de 1,0 m/min), ocorre o congelamento do menisco e as trincas aparecem. Para corridas sem trincas a imersão de válvula foi menor que 0,144 m (velocidade de 1,0 m/min), o que promove o aquecimento do menisco.

Após esta avaliação recomendou-se redução de 8% da água da face larga do molde e limitou-se a imersão da válvula submersa em dois sets points de 0,135 m e 0,15 m, saindo da faixa crítica advinda da equação do Fator F.

O pó fluxante e a válvula submersa (SEN) foram ajustados com o objetivo de baixar a transferência de calor no molde. Para o pó fluxante aumentou-se a temperatura de cristalização (aumento da temperatura de solidificação ou  $T_{break}$  e aumento da basicidade CaO/SiO<sub>2</sub>) e mudou-se a fonte de Carbono, ou seja, de Carbono grosseiro para Carbono fino (o Carbono é utilizado para controlar a taxa de fusão). Para a válvula submersa, os parâmetros como centralização da válvula submersa, design da mesma (ângulo e imersão), foram avaliados e caracterizados conforme o parâmetro F, porém, a variável condutividade térmica da válvula submersa que não havia sido considerada, contribui muito para a incidência das trincas longitudinais. Estudou-se um novo tipo de válvula submersa com o objetivo de diminuir a capacidade de transferência de calor, aumentando sua porosidade. A menor condutibilidade térmica reduz a severidade do *hot spot* localizado entre a parede da válvula e a face larga do molde, responsável pela menor espessura da pele naquele local. A porosidade da SEN foi acrescida em 30%.

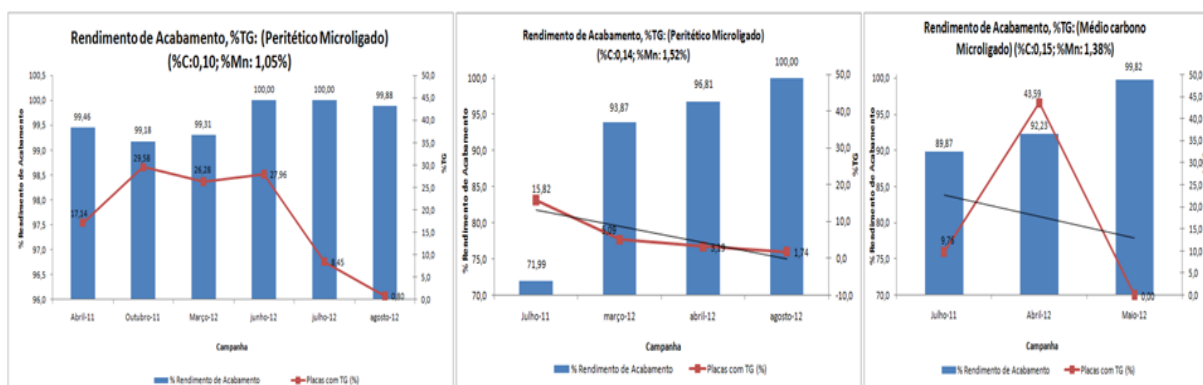
Após ajuste para aquecimento do menisco (redução da vazão de água, redução da imersão da SEN), troca de pó e material da SEN, obteve-se o resultado exposto na Figura 14.



**Figura 14.** Range de defeito para fator F (N/m) levando em consideração F versus profundidade de Trincas Longitudinais.<sup>(8)</sup>

Para F menor que 7 N/m, mostrou-se que o conjunto das modificações provocou a redução da severidade das trincas longitudinais. Para F maior que 7 N/mm, ocorreram duas placas com trincas, isto se deve à ocorrência de alarmes de Breakout, o qual reduz a velocidade de lingotamento para 0,2 m/min por 5 minutos. Em outras palavras, em termos de severidade de Trinca Longitudinal o fator ou parâmetro F sozinho não parece explicar todos os aspectos de sua formação. Isto porque ao se manter constante a vazão de água mesmo sob condições de redução de velocidade as condições de trocas térmicas são alteradas de modo significativo, o que não é contemplado na formulação de F. Normalmente, as máquinas em operação no Japão, de onde foi extraída a filosofia de controle através do fator F, trabalham com redução de vazão de água concomitante à redução de velocidade de lingotamento.

A partir da padronização das ações advindas das análises vistas nos itens anteriores, o índice e o rendimento de Acabamento de Placas do defeito Trinca Longitudinal reduziu significativamente (Figura 15).



**Figura 15.** Perdas atuais para os aços da família Peritético e Médio Carbono.<sup>(1)</sup>

## 4 DISCUSSÃO

Comparando as faixas encontradas do fator F na literatura (3,0 N/m a 4,5 N/m) com o que foi apresentado neste trabalho (5,0 N/m a 7,0 N/m), temos grandes diferenças, isto se deve ao fato de que, têm-se variáveis de processo das Máquinas de Lingotamento Contínuo que diferem entre si como, por exemplo, a água de resfriamento primário. No caso dos resultados da literatura, trabalha-se com vazão de água de resfriamento decrescente com velocidades de lingotamento decrescente, de modo a manter a extração de calor no molde aproximadamente inalterada. Deve-

se antever caso da aplicação discorrida neste trabalho, que as condições de trocas térmicas seriam diferentes em operações em que a vazão de água é mantida constante, independente da velocidade de lingotamento, que é o caso da Máquina de Lingotamento avaliada neste trabalho. Outros fatores como metodologia para medição da velocidade do ponto de impingimento podem levar à diferenciação dos resultados. As trincas ocorreram em condições semelhantes ao exposto na literatura, ou seja, velocidades baixas com a válvula menos imersa e válvula com imersões maiores com velocidade visada e o fator F foi uma ferramenta que ajudou explicar fenômenos do fluxo de aço na região metal/ escória e menisco do Molde.

## 5 CONCLUSÃO

Dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- o valor de F tendeu a diminuir com o aumento da profundidade de imersão da SEN e com o aumento do ângulo da porta de saída da SEN, resultando em menores níveis de turbulência na interface metal-escória, o que iria contribuir para a preservação da limpidez do produto lingotado;
- através da técnica PIV, validou-se a relação entre o fator F e a Velocidade Superficial, podendo correlacionar F com o defeito Trinca Longitudinal;
- com relação à frequência de defeito de Trinca Longitudinal, a região de defeitos foi encontrada na região de 5,0 N/m a 7,0 N/m; o lingotamento deve ser realizado fora desta faixa, onde os ajustes recomendados garantiram o não sucateamento de placas;
- a severidade das trincas longitudinais não pode ser explicada pelo fator F isoladamente, em função da influência da vazão de água sobre o fenômeno de congelamento de menisco, fenômeno agravado em condições em que a vazão de água é mantida mesmo sob redução de velocidade de lingotamento;
- o resultado do índice de trinca longitudinal teve em média uma redução de 30% para 0,8% eliminando o sucateamento que historicamente era em média de 7%; e
- este trabalho pode ser estendido para análise de defeitos como arraste de pó-fluxante em placas do LCP, uma vez que o Parâmetro F avalia a situação de turbulência no Menisco.

## Agradecimentos

Agradecimentos aos colegas de trabalho da Gerdau Usina de Ouro Branco, ao professor Carlos Antônio da Silva pela orientação e ao Gabriel Romeu T. Santos pela dedicação na realização dos experimentos laboratoriais.

## REFERÊNCIAS

- 1 CARVALHO, C.V. D, et al. Relatório de Perdas no Lingotamento Contínuo de Placas, Ouro branco- MG, 2012.
- 2 VALADARES, C. A. G.; BEZERRA, M. C. C. Análise do mecanismo e das principais causas de ocorrência de trincas longitudinais em placas de lingotamento contínuo. In: Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, 33, 2002, Santos. Steelmaking Seminar. São Paulo: ABM, 2002. p.207-218.

- 3 KUBOTA, J. et al. Meniscus Flow Control In The Mold By Travelling Magnetic Field For High Speed Slab Caster, Mold Operation For Quality And Productivity, Ed. A.W. Cramb And E. Szekeres (Warrendale, Pa: Iron And Steel Society, 1991).
- 4 KOLLBERG, S; LOFGREN, P & LEHMAN, A. Improving quality and productivity in thick slab casting by direct control of electromagnetic brake (EMBR). In Proceedings of the Int. Conf. AISE (Pittsburgh, USA, 2003), pp. 1–8.
- 5 KONDO et al. Assistência Técnica na Gerdau Açominas pela empresa JFE, (Ouro Branco, Setembro 2010).
- 6 CARVALHO, C.V.D. et al. Determination of Flow Instabilities Inside a Continuous Casting Mold by Particle Image Velocimetry and Computational Fluid Dynamics; Ainstech 2012 conference, 7-10 May of 2012.
- 7 CARVALHO, C.V.D. et al. Uso de Particle Image Velocimetry e Fluidodinâmica Computacional para Análise de Instabilidades no Interior do Molde de Lingotamento Contínuo - Contribuição técnica ao 43º Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2012, Belo Horizonte, MG, Brasil
- 8 CARVALHO, C.V.D. et.al. Avaliação Prática da Qualidade Inclusionária de uma Placa de LC: Um Confronto com Previsões Obtidas de Modelamento Físico; Dissertação de Mestrado a ser apresentada na Redemat em Fevereiro 2013.