

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais**

**PPGE3M**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE  
ESTRIPAMENTO NEGATIVO NA FORMAÇÃO DAS  
MARCAS DE OSCILAÇÃO E SEUS IMPACTOS EM  
DEFEITOS SUPERFICIAIS**

**David Jose Rihl**

**Orientador: Prof. Dr. Jaime A. Spim**

**Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia**

**Porto Alegre**

**2012**

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**Escola de Engenharia**

**Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais**

**PPGE3M**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE  
ESTRIPAMENTO NEGATIVO NA FORMAÇÃO DAS  
MARCAS DE OSCILAÇÃO E SEUS IMPACTOS EM  
DEFEITOS SUPERFICIAIS**

**David Jose Rihl**

**Engenheiro de Materiais**

**Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da  
UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,  
Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Mestre em Engenharia.**

**Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais**

**Porto Alegre**

**2012**

*“O futuro não pode ser previsto, mas pode ser inventado. É a nossa habilidade de inventar o futuro que nos dá esperança para fazer de nós o que somos.”*

*(Dennis Gabor)*

## **AGRADECIMENTOS**

Dedico este trabalho aos meus pais que sempre me incentivaram ao estudo e busca incessante do conhecimento.

A minha noiva que suportou e abdicou horas de lazer para que eu alcançasse o objetivo e conclusão do programa de mestrado.

A todos os professores da UFRGS que sempre estiveram à disposição para nortear o trabalho e transmitir de forma clara e correta o conhecimento acadêmico.

Aos colaboradores da Gerdau que empenharam horas de trabalho na busca compartilhada pelos experimentos e conhecimentos adquiridos.

E a Deus que ilumina o meu caminho!

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>- 7 -</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>- 9 -</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....</b>	<b>- 10 -</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>- 11 -</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>- 12 -</b>
<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>- 13 -</b>
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>- 14 -</b>
<i>Lingotamento Contínuo .....</i>	<i>- 14 -</i>
<i>Histórico .....</i>	<i>- 14 -</i>
<i>Tipos de Lingotamento Contínuo .....</i>	<i>- 15 -</i>
<i>Componentes do Lingotamento Contínuo.....</i>	<i>- 16 -</i>
<i>O Molde.....</i>	<i>- 17 -</i>
Oscilação do Molde .....	- 19 -
Parâmetros de Oscilação do Molde .....	- 20 -
Formação das Marcas de Oscilação .....	- 22 -
Influência das Marcas de Oscilação.....	- 27 -
<i>Tipos de Defeitos Superficiais.....</i>	<i>- 30 -</i>
Trincas Longitudinais .....	- 32 -
Trincas Transversais.....	- 33 -
Trincas Transversais Associadas as Marcas de Oscilação .....	- 33 -
Efeitos da Taxa de Deformação na Ocorrência de Trincas .....	- 35 -
<i>Fluxantes .....</i>	<i>- 36 -</i>
Efeitos dos Parâmetros de Oscilação na Lubrificação .....	- 37 -
<i>Tipos de Aços.....</i>	<i>- 38 -</i>
<i>Laminação.....</i>	<i>- 39 -</i>
Influencia da Laminação para Surgimento de Trincas .....	- 40 -
<b>METODOLOGIA E EXPERIMENTOS.....</b>	<b>- 41 -</b>
<i>Descrição do Problema.....</i>	<i>- 41 -</i>
<i>Equipamentos .....</i>	<i>- 42 -</i>
<i>Materiais .....</i>	<i>- 43 -</i>
<i>Metodologia.....</i>	<i>- 43 -</i>
<b>RESULTADOS .....</b>	<b>- 44 -</b>

<i>Distância entre as Marcas de Oscilação.....</i>	<i>- 52 -</i>
<i>Profundidade das Marcas de Oscilação .....</i>	<i>- 53 -</i>
<i>Abertura das Marcas de Oscilação .....</i>	<i>- 55 -</i>
<i>Atrito Tarugo - Molde .....</i>	<i>- 55 -</i>
<i>Índice de Rejeição por Trincas Superficiais em Barra Laminada .....</i>	<i>- 57 -</i>
<i>Caracterização da Microestrutura das Marcas de Oscilação.....</i>	<i>- 59 -</i>
<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>- 64 -</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>- 65 -</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de Bessemer, primeiro projeto de lingotamento contínuo.....	- 14 -
Figura 2. 1-Panela. 2-Distribuidor. 3-Molde. 4-Válvula Submersa. 5-Refrigeração Secundária. 6-Rolos de Suporte. 7-Oxi-corte.....	- 16 -
Figura 3. Esquema da estrutura que envolve o molde.....	- 18 -
Figura 4. Molde Convex versus Molde Convencional .....	- 18 -
Figura 5. Detalhe para as marcas de oscilação nas faces do tarugo.....	- 19 -
Figura 6. Máquina de Oscilação Hidráulica.....	- 19 -
Figura 7. Posição e velocidade da pele e do molde no movimento oscilatório <sup>(14)</sup> .....	- 21 -
Figura 8. Curvas simétricas e assimétricas.....	- 21 -
Figura 9. Formação do primeiro menisco (a) e do menisco secundário devido a pressões (b)...	- 22 -
Figura 10. Mecanismo de formação através do transbordamento e pressão ferrostática.....	- 23 -
Figura 11. Estágios de 1 a 3 em estripamento negativo, formando a marca, com a presença do gancho – pele grossa (a). Estágios de 1 a 3 em estripamento negativo, formando a marca, sem a presença do gancho – pele fina (b).....	- 23 -
Figura 12. Movimento do menisco em equilíbrio com a casca sólida <sup>(19)</sup> .....	- 24 -
Figura 13. Modelo descrito por Delhalle: (a) Transbordamento, (b) Transbordamento mais refusão, (c) dobramento devido a pressão ferrostática.....	- 24 -
Figura 14. Mecanismo de formação segundo Sengupta. Congelamento do menisco e transbordamento de aço líquido.....	- 25 -
Figura 15. Crescimento dendrítico e gancho revelado através de ataque especial.....	- 26 -
Figura 16. Linha subsuperficial do gancho com a presença de cálcio oriundo do pó de molde lubrificante <sup>(22)</sup> .....	- 28 -
Figura 17. Efeito da amplitude no índice de lubrificação.....	- 28 -
Figura 18. Efeito da distância (Pitch) versus profundidade (Depth) das marcas. <sup>(18)</sup> .....	- 29 -
Figura 19. Influência da velocidade e amplitude (a), velocidade e frequência (b), tempo e percentual de estripamento negativo (c).....	- 30 -
Figura 20. Efeito do carbono na profundidade das marcas de oscilação.....	- 30 -
Figura 21. Defeitos Típicos em Lingotamento Contínuo.....	- 31 -
Figura 22. Esquemas das microestruturas nas faixas de temperaturas.....	- 31 -
Figura 23. Efeito do Enxofre na Temperatura de Ductilidade Zero.....	- 32 -
Figura 24. Curvas de ductilidade a quente para aços C-Mn-V e Nb com aproximadamente o mesmo tamanho de grão <sup>(29)</sup> .....	- 33 -
Figura 25. Segregação positiva de Manganês e de Fósforo ao longo do gancho através de CMA (Computer Aided X-ray Micro Analyser).....	- 34 -
Figura 26. Grãos finos no topo da marca (a) e grãos grosseiros na base da marca (b).....	- 35 -
Figura 27. Influência da taxa de deformação e temperatura na ductilidade a quente para um aço carbono comum (a) e para um aço peritético com 0,04% de Nb, 0,03% de Al e 0,006 de N <sup>(33)</sup> .....	- 36 -
Figura 28. Esquema dos componentes que envolvem a região superior interna do molde.....	- 37 -
Figura 29. Tipos de aços (A e B) em função do potencial de ferrita mostrando tendência à depressão ou agarramento dentro do molde <sup>(39)</sup> .....	- 39 -
Figura 30. Extração de calor diferenciada entre teores de carbono diferenciados.....	- 39 -
Figura 32. Amostra do tarugo com jateamento para caracterização das marcas.....	- 41 -

Figura 33. Típico defeito do tipo trincas de aciaria em barra laminada. ....	- 42 -
Figura 34. (a) Tarugo; (b) Corte Transversal ao sentido de lingotamento; (c) Corte longitudinal ao sentido de lingotamento; (d) Amostra do corte. ....	- 45 -
Figura 35. Tarugo da condição 1. ....	- 46 -
Figura 36. Detalhe das marcas da condição 1. ....	- 46 -
Figura 37. Distância das marcas de oscilação da condição 1. ....	- 47 -
Figura 38. Tarugo da condição 2. ....	- 47 -
Figura 39. Detalhe das marcas da condição 2. ....	- 48 -
Figura 40. Distância das marcas de oscilação da condição 2. ....	- 48 -
Figura 41. Tarugo da condição 3. ....	- 49 -
Figura 42. Detalhe das marcas de oscilação da condição 3. ....	- 50 -
Figura 43. Distância das marcas de oscilação da condição 3. ....	- 50 -
Figura 44. Tarugo da condição 4. ....	- 50 -
Figura 45. Detalhe das marcas de oscilação da condição 4. ....	- 51 -
Figura 46. Distância das marcas de oscilação da condição 4. ....	- 51 -
Figura 47. Impacto do NST e Freqüência na distância média entre as marcas. ....	- 52 -
Figura 48. Curvas de contorno para a correlação entre NST, Freqüência e Distância das Marcas de Oscilação. ....	- 53 -
Figura 49. Profundidade das marcas em função do NST e Freqüência. ....	- 54 -
Figura 50. Curvas de contorno para a correlação entre NST, Freqüência e Profundidade das Marcas de Oscilação. ....	- 54 -
Figura 51. Abertura das marcas de oscilação em função do NST e Freqüência. ....	- 55 -
Figura 52. . Correlação entre Força de Atrito e variáveis de oscilação. ....	- 56 -
Figura 53. Gráfico da taxa de estripamento negativo e positivo, em percentual, em cada condição. ....	- 56 -
Figura 54. Influencia do NST e Freqüência de oscilação na rejeição por trincas superficiais. ....	- 57 -
Figura 55. Rejeição em função da Freqüência e NST. ....	- 58 -
Figura 56. Correlação entre trincas superficiais e profundidade das marcas de oscilação. ....	- 58 -
Figura 57. Imagem do gancho via microscopia ótica. ....	- 59 -
Figura 58. Imagem do gancho via MEV. ....	- 60 -
Figura 59. Micrografia eletrônica revelando a presença de óxidos segregados no gancho. ....	- 61 -
Figura 60. Composição química das inclusões dentro do gancho. ....	- 61 -
Figura 61. Micrografia eletrônica revelando a marca de oscilação. ....	- 62 -
Figura 62. Ponta de um gancho sem contato com a superfície. ....	- 63 -



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados da máquina de lingotamento contínuo.....	- 42 -
Tabela 2. Faixa de Composição Química do aço Din 16MnCr5.....	- 43 -
Tabela 3. Fatores avaliados.....	- 43 -
Tabela 4. Parâmetros de oscilação empregados para o teste.....	- 44 -
Tabela 5. Composição Química do pó fluxante.....	- 44 -

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

F = frequência da oscilação do molde, em cpm;

S = Amplitude, em mm (distância total em que o molde se move em uma direção);

Vc = Velocidade de lingotamento, m/min (velocidade de extração do tarugo);

NSt = tempo de estripamento negativo, em segundos;

Tn = tempo de estripamento negativo, em segundos

%NS = Percentual de estripamento negativo;

x = distância perpendicular da parede do molde, em m;

z = distância vertical da parede do molde, em m;

$\Delta\gamma$  = diferença de tensão superficial entre o aço líquido e a escória líquida, em N/m;

$\Delta\rho$  = densidade relativa entre o aço líquido e a escória líquida, em kg/m<sup>3</sup>;

g = é a aceleração gravitacional, 9,81 m/s<sup>2</sup>;

LI = Índice de lubrificação;

D<sub>om</sub> = Distância entre as marcas de oscilação;

BTR = Faixa de temperatura frágil;

ZDT = temperatura de ductilidade zero;

%RA = Percentual de redução de área;

FP = Potencial de ferrita;

Cp = Carbono equivalente;

## RESUMO

Com o intuito de minimizar os defeitos superficiais em tarugos do lingotamento contínuo, realizou-se o estudo do comportamento das variáveis de oscilação frente aos defeitos superficiais tipo trincas transversais. Buscou-se ao longo deste trabalho, caracterizar as diferentes condições de oscilação em modo de operação diferenciado, com frequência e tempo de estripamento negativo constante em função da velocidade de lingotamento.

Foram avaliadas as características físicas e químicas da região no entorno das marcas de oscilação, identificando a distância, profundidade e largura das marcas. As análises utilizadas foram macrografia, micrografia e ensaio não destrutivo de partículas magnéticas nos tarugos e no produto laminado. Os resultados mostram que elevados tempos de estripamento negativo formam marcas mais profundas que, por consequência, impactam na nucleação de sítios de fragilidade para a propagação de trincas transversais. Foi caracterizada a microestrutura das marcas onde foi possível evidenciar a formação dos ganchos e verificar a presença de elementos danosos à qualidade do produto.

## ABSTRACT

In order to minimize surface defects in continuous casting billets the behavior of the variables compared to the oscillating surface defects – transversal cracks – was carried out. It was tried to characterize the different conditions of oscillation (frequency and negative strip time) dependent on the casting speed.

It was evaluated the physical and chemical characteristics in the vicinity of the oscillation marks, identifying the distance, depth and width of marks. The analyses used were macrograph, micrograph and non-destructive testing of magnetic particles on billets and rolled products. The results show that highly negative strip time will cause deeper marks and consequently impact in nucleation sites of fragility for propagation of transversal cracks. It was characterized the microstructure of oscillation marks where it was possible to observe the formation of hooks and verify the presence of harmful elements to quality.

## INTRODUÇÃO

A exigência por qualidade e confiabilidade dos produtos oriundos das siderúrgicas de aços especiais tem direcionado os esforços das aciarias em busca da melhoria contínua de seus processos a fim de garantir a conformidade de seus produtos.

A aplicação dos aços especiais está voltada à indústria automotiva. Cerca de 80% da produção é destinada a este fim.

Inúmeros são os fatores causadores de desvios de qualidade durante a fabricação dos aços especiais. A gama de defeitos detectados nos produtos finais é ampla. Entretanto, no universo dos defeitos de qualidade, a principal causa está atrelada a defeitos superficiais do tipo trincas de aciaria. Na planta siderúrgica onde foi realizado este estudo, o índice de perdas metálicas por trincas superficiais representa aproximadamente doze quilos de sucata por uma tonelada lingotada.

Uma série de variáveis influencia na formação de trincas transversais. Dentre as principais causas se destacam os problemas associados à região do menisco – refrigeração primária, tais como:

- Temperatura do aço líquido, tipo de molde, extração de calor, parâmetros de oscilação, lubrificantes, agitação eletromagnética;

Na refrigeração secundária:

- Layout dos bicos de spray, ângulo do jato, pressão e vazão de água;

E na região de endireitamento:

- Temperatura do tarugo, taxa de deformação, pressão dos rolos.

Dentre todas as variáveis que influenciam para o surgimento de trincas, o aspecto das marcas de oscilação influencia fortemente o aparecimento de defeitos.

Assim, o objetivo deste trabalho visa correlacionar os parâmetros de oscilação do molde - frequência, amplitude e tempo de estripamento negativo - com as características das marcas de oscilação e seus efeitos na qualidade superficial das barras laminadas.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### Lingotamento Contínuo

Impulsionado pela perspectiva econômica para reduzir custos e aumentar produtividade, a cadeia de produção de produtos de aço tem crescido substancialmente através de inovações tecnológicas nos processos de solidificação dos aços.

Atualmente, o processo de lingotamento contínuo suporta a grande parte da cadeia produtiva da fabricação de aços. Em 2008, cerca de 92,3% da produção total de aço no mundo foi produzida através do lingotamento contínuo, ante 6,7% do lingotamento convencional <sup>(1)</sup>. Quando comparado os mesmos indicadores em 1978, há 33 anos, a produção via lingotamento contínuo representava 22,3% ante 77,7% do lingotamento convencional <sup>(2)</sup>.

### Histórico

A fundição de metais líquidos em formato de peças e artefatos metálicos é uma tecnologia antiga desenvolvida pelos chineses em 1000 a.C. Entretanto, em meados do século 19 surgiram as primeiras ideias envolvendo o lingotamento contínuo de metais <sup>(3)</sup>.

O primeiro modelo apresentado foi pelo Henri Bessemer, em 1843, no qual o metal líquido era vazado através de dois rolos refrigerados <sup>(4)</sup>, conforme a figura 1.

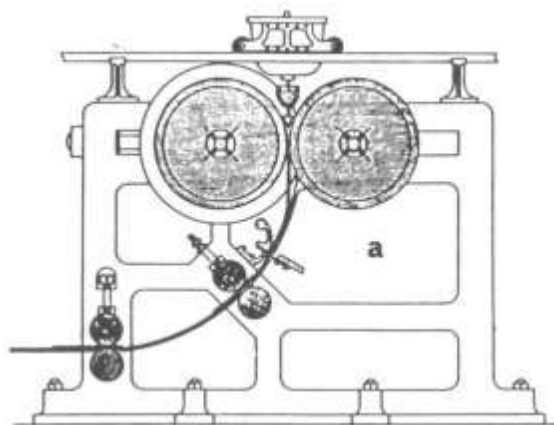


Figura 1. Modelo de Bessemer, primeiro projeto de lingotamento contínuo.

Após décadas, foram sendo aprimorados novos elementos ao lingotamento contínuo. Em 1933, Siegfried Junghans desenvolveu o conceito de oscilação do molde. Entretanto, não havia movimento relativo do molde e da pele do tarugo. Em 1954, houve o maior avanço no processo de lingotamento: um novo perfil de oscilação, sugerido pela Concast/Halliday, chamado de tempo de estripamento negativo. Este tempo é conhecido como o tempo em que a velocidade do molde ultrapassa a velocidade de lingotamento <sup>(3)</sup>.

As vantagens do lingotamento contínuo frente ao lingotamento convencional são:

- Aumento do rendimento;
- Melhor acabamento superficial;
- Menores etapas de preparação, montagem e desmontagem do lingotamento;
- Diminuição dos custos;
- Melhorias nas condições ambientais e de segurança;

## **Tipos de Lingotamento Contínuo**

As diferenças entre os inúmeros tipos de equipamento de lingotamento contínuo podem ser associadas a <sup>(5)</sup>:

- Configuração do equipamento: existem basicamente três tipos de equipamentos de lingotamento contínuo: verticais, curvos e horizontais;
- Tipo de oscilação;
- Utilização de jato protegido do aço vazado ao molde;
- Tipo de lubrificante utilizado no molde.

Os produtos obtidos são divididos em diversas categorias, dependendo da forma e tamanho:

- Tarugos;
- Blocos;
- Placas grossas e médias;
- Placas finas;
- Tiras;

- Tiras finas;

## Componentes do Lingotamento Contínuo

O aço fundido, descarburizado e desfosforado no Forno Elétrico a Arco é vazado a uma panela refratária. Na etapa conseguinte, a sua composição química e temperatura são ajustadas no Forno Panela. Na próxima etapa, a degaseificação, é onde ocorre a remoção dos gases oxigênio, nitrogênio e hidrogênio.

Após as etapas de fusão e refino do aço líquido, este é transferido à torre de lingotamento, donde é vertido ao distribuidor, que por sua vez transfere o líquido ao molde. Para aços especiais, essas transferências ocorrem com jato protegido - uso de tubo longo refratário da panela ao distribuidor e válvula submersa do distribuidor ao molde.

O processo de lingotamento contínuo pode ser considerado essencialmente como um processo de transferência de calor, no qual o metal líquido é transformado via solidificação em um produto semi-acabado <sup>(5)</sup>.

O conjunto de operações e equipamentos que constituem o lingotamento contínuo pode ser visualizado na figura 2 <sup>(6)</sup>.

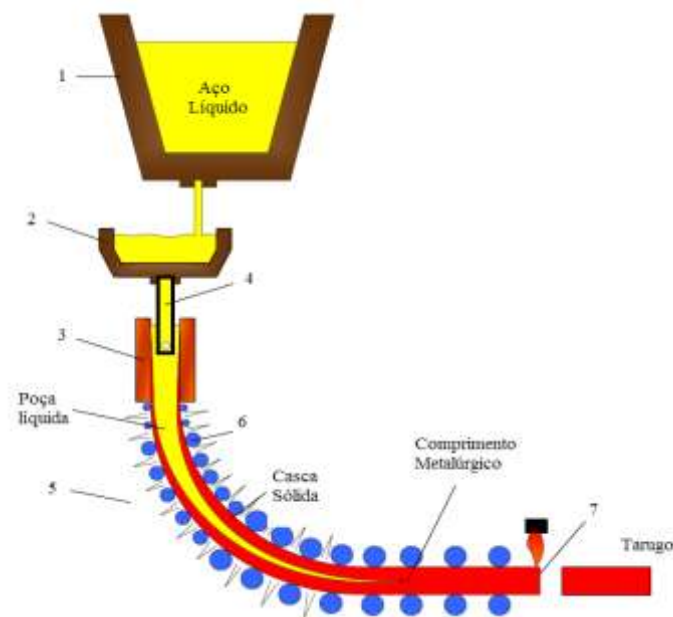


Figura 2. 1-Panela. 2-Distribuidor. 3-Molde. 4-Válvula Submersa. 5-Refrigeração Secundária. 6-Rolos de Suporte. 7-Oxi-corte.



A solidificação ocorre no instante em que o molde refrigerado extrai calor suficiente para formar a primeira pele sólida. Esta primeira casca é crucial para a garantia de boa qualidade superficial. O controle de extração de calor e lubrificação são dois fatores fundamentais para o lingotamento <sup>(7)</sup>.

Logo após a saída do molde, o veio é guiado por rolos seguindo a curvatura da máquina. Durante este processo há refrigeração controlada por sprays. Em seguida o veio sofre deformação para endireitamento. Dependendo das taxas de deformação, o aço pode trincar, gerando problemas de qualidade no produto laminado.

## O Molde

No molde é onde ocorre a primeira etapa de solidificação. É através dele que se extrai o sobreaquecimento, contém a piscina líquida de aço e forma a primeira casca sólida <sup>(8)</sup>.

O mecanismo de funcionamento se dá pela passagem de água entre a jaqueta e o molde, conforme a figura 3, extraíndo calor suficiente para solidificação do metal.

Para evitar defeitos superficiais, no molde deve-se buscar uma pele solidificada de tamanho ótimo, sendo espessa e uniforme suficiente para garantir a pressão ferrostática e fina suficiente para permitir o endireitamento sem rompimento e formação de trincas superficiais <sup>(9)</sup>.

O material que compõe o molde deve possuir alta condutividade térmica, resistência em alta temperatura, baixa distorção térmica, resistência à fadiga, resistência ao desgaste e baixo custo <sup>(10)</sup>.

Considerando estas características, o cobre e suas ligas se adéquam a isso.

A espessura da parede do molde varia de 6 a 11 mm e o comprimento de 700 a 1200 mm.

A conicidade (taper) do molde é muito estudada, dentre os tipos de molde há: lineares, parabólicos ou multitapers. São desenvolvidos para extrair mais calor objetivando proporcionar maior velocidade de lingotamento sem rompimento de pele.

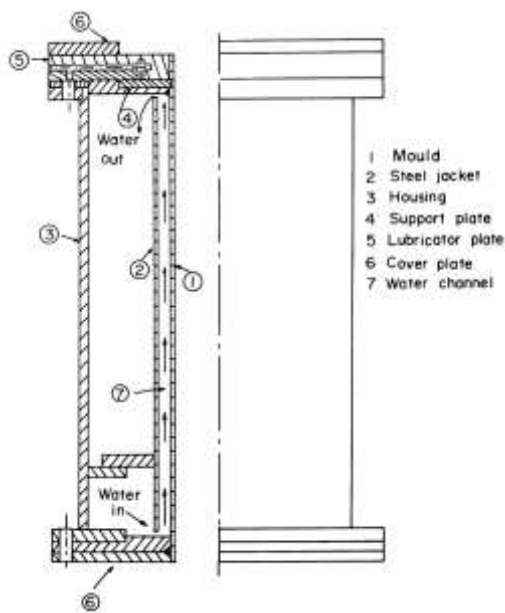


Figura 3. Esquema da estrutura que envolve o molde.

O molde utilizado no experimento é de tecnologia patenteada Convex, da Concast. A característica principal deste molde é apresentar faces internas com perfil convexo, acompanhando a contração do molde. A figura 4 mostra o efeito molde Convex comparado com o molde convencional.

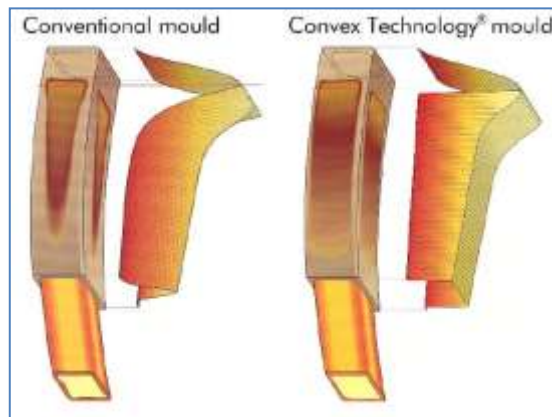


Figura 4. Molde Convex versus Molde Convencional

O taper influencia fortemente na profundidade e uniformidade das marcas de oscilação. Como consequência, a qualidade superficial é afetada. <sup>(11)</sup>.

## Oscilação do Molde

Devido às altas velocidades praticadas no lingotamento, o mecanismo de oscilação tornou-se fundamental. A tensão de tração e pressão ferrostática do metal líquido em contato com o molde é minimizado através da oscilação, evitando o agarramento da casca sólida ao molde.

Entretanto, conforme o movimento vertical do molde há formação de marcas transversais em relação à direção de lingotamento. Essas marcas podem ser melhor visualizadas com a carepa removida através de decapagem mecânica (jato de granalhas), conforme a figura 5.



Figura 5. Detalhe para as marcas de oscilação nas faces do tarugo.

A figura 6 apresenta um desenho esquemático de uma máquina de oscilação hidráulica (Short Lever – Concast).

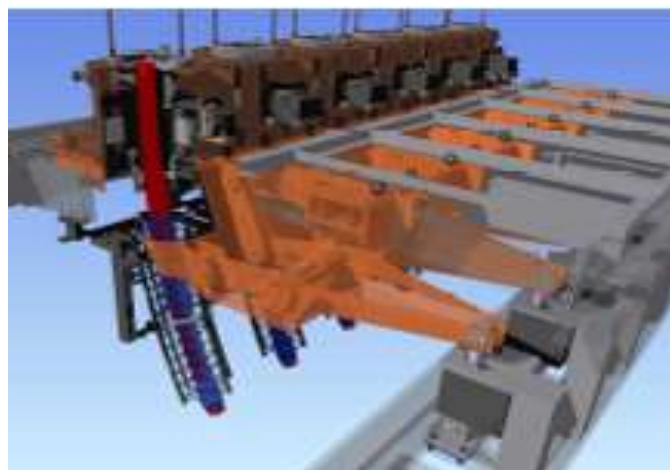


Figura 6. Máquina de Oscilação Hidráulica.

### *Parâmetros de Oscilação do Molde*

Segundo Szekeres <sup>(12)</sup>, no modelo original de oscilação desenvolvido por Junghans, o molde se movia com a mesma velocidade que a de extração do tarugo durante três quartos em cada ciclo, seguido por um rápido retorno do molde para a posição zero. Portanto, não havia movimento relativo. A equação 1 representa esta função.

$$f = \frac{3V_c}{4s} \quad (1)$$

Onde,

F = frequência da oscilação do molde, em cpm;

S = stroke, em mm (distância total em que o molde se move em uma direção);

Vc = Velocidade de lingotamento, m/min (velocidade de extração do tarugo).

Uma importante mudança na oscilação foi implementada em meados de 1950 por Halliday quando este descobriu que implementando uma pequena variação no parâmetro de frequência produziria uma variação significativa nas condições de lingotamento. O movimento de descida do molde deveria superar a velocidade de extração do tarugo por alguma fração de tempo. Este tempo ficou conhecido como tempo de estripamento negativo, e possibilitou o aumento das velocidades de lingotamento sem a ocorrência de breakouts - rompimento da casca solidificada <sup>(13)</sup>.

O cálculo do tempo de estripamento é dado pela equação 2:

$$T_n = \frac{60}{\pi \cdot F} \cdot \arccos \left( \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot S \cdot F} \right) \quad (2)$$

Onde,

Tn = tempo de estripamento negativo, em segundos;

F = frequência, em ciclos/minuto;

Vc = velocidade de lingotamento, em m/minuto (velocidade de extração do tarugo);

S = Amplitude, em m.

O percentual do tempo em que o molde está em estripamento negativo é chamado de percentual de estripamento negativo - %NS, conforme a equação 3.

$$\% NS = \left( 1 - \frac{2sf}{V_c} \right) 100 \quad (3)$$

Uma forma mais prática de exemplificar o movimento oscilatório está contido na figura 7.

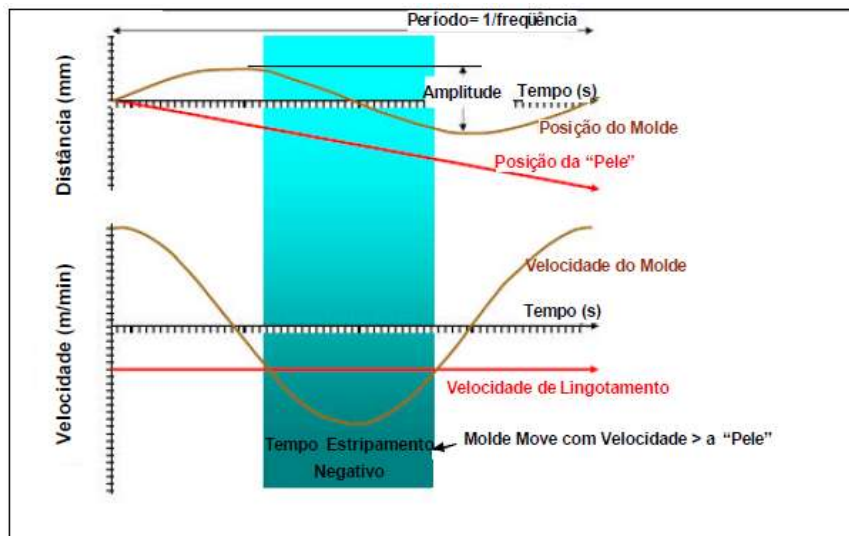


Figura 7. Posição e velocidade da pele e do molde no movimento oscilatório <sup>(14)</sup>.

Outra funcionalidade da oscilação está em proporcionar curvas não senoidais, que melhora a condição de lubrificação pois o tempo de estripamento positivo e a distância em estripamento negativo são maiores <sup>(15)</sup>. A figura 8 mostra a diferença de curvas senoidais e não-senoidais.

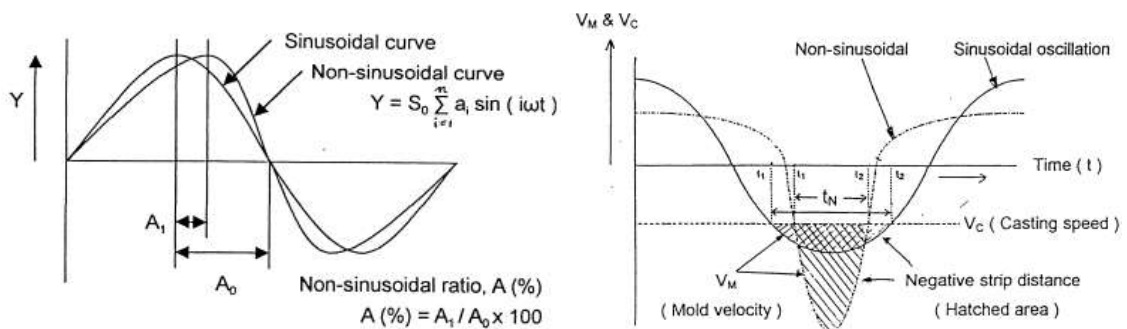


Figura 8. Curvas simétricas e assimétricas.

### Formação das Marcas de Oscilação

Uma série de mecanismos já foi estudada e sugerida para explicar a formação das marcas de oscilação.

Em 1979, Sato <sup>(19)</sup> defendeu que a formação das marcas ocorre em duas etapas: na primeira, a casca sólida formada na região do menisco é elevada através do movimento de subida do molde. Este levantamento causa a formação de duas superfícies convexas, que adquire outro menisco secundário devido à pressão da oscilação. Na segunda etapa, quando o molde se move para baixo, as duas superfícies se fundem formando a marca de oscilação..

A figura 9 exemplifica a teoria <sup>(16)</sup>.

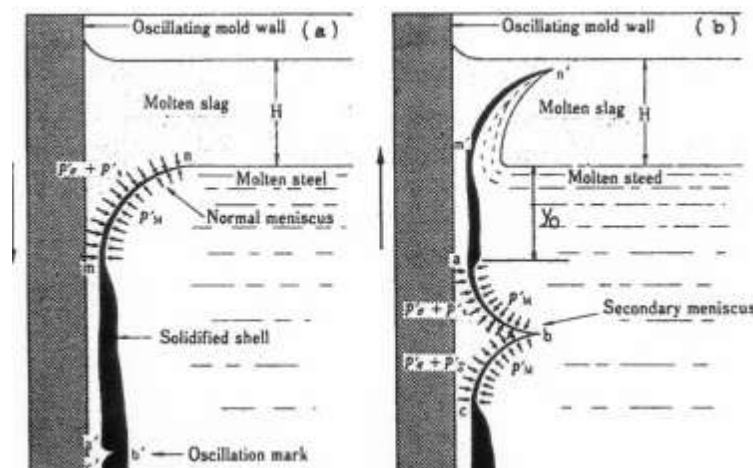


Figura 9. Formação do primeiro menisco (a) e do menisco secundário devido a pressões (b).

Em 1991, Saucedo <sup>(17)</sup> detalhou a teoria que aborda a formação das marcas de oscilação pelo motivo de solidificação do menisco. A pressão de oscilação empurra o metal líquido a recuperar o contato com a parede do molde através de dois mecanismos: do transbordamento do metal líquido e da pressão metalostática que empurra a pele, dobrando a casca recém formada, conforme a figura 10.

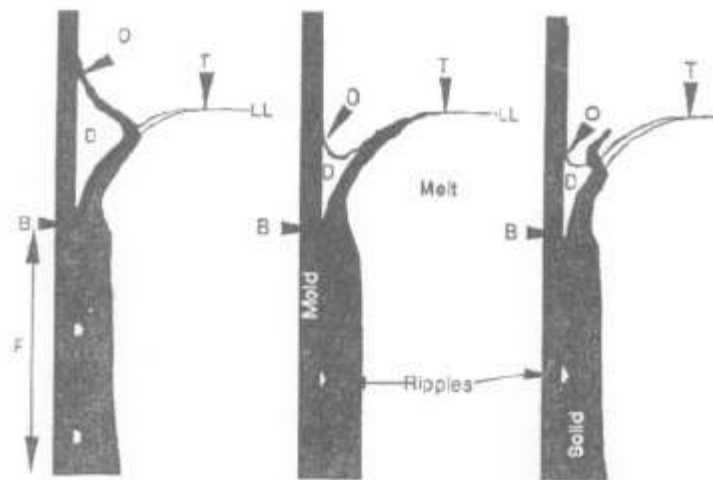


Figura 10. Mecanismo de formação através do transbordamento e pressão ferrostática.

Em 1984, Takeuchi e Brimacombe<sup>(18)</sup> descreveram como a pressão no cordão de escória líquida traciona o menisco contra a parede do molde durante o estripamento negativo. A resistência de pele é o fator que diferencia se vai haver ou não formação de ganchos. Se a pele é espessa, resistente, haverá transbordamento e o gancho se estende para centro do tarugo. Se a pele for fina, a casca simplesmente é comprimida, sem exercer resistência e espaçamento para transbordamentos, conforme figura 11<sup>(18)</sup>.

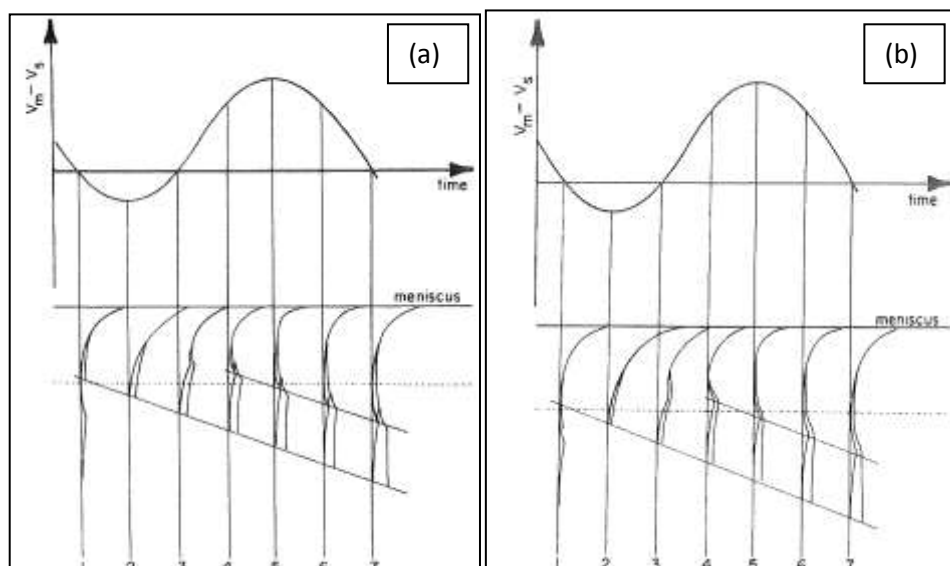


Figura 11. Estágios de 1 a 3 em estripamento negativo, formando a marca, com a presença do gancho – pele grossa (a). Estágios de 1 a 3 em estripamento negativo, formando a marca, sem a presença do gancho – pele fina (b).

Em 1986, Suzuki et al <sup>(19)</sup> apresentaram novo modelo de formação de marcas, baseado na sobreposição. O menisco move-se para cima do banho metálico à medida que a casca sólida cresce para dentro, devido ao equilíbrio da tensão de interface, conforme figura 12.

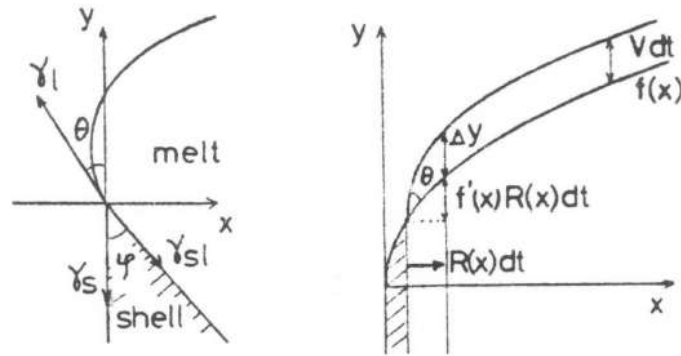


Figura 12. Movimento do menisco em equilíbrio com a casca sólida <sup>(19)</sup>.

Em 1989, Delhalle descreveu três mecanismos de formação das marcas baseada na solidificação da primeira casca sólida: (a) transbordamento da poça líquida e formação do gancho; (b) transbordamento da poça líquida somada à refusão da pele; (c) dobramento da pele devido á pressão ferrostática, ocasionando depressão transversal, conforme a figura 13.

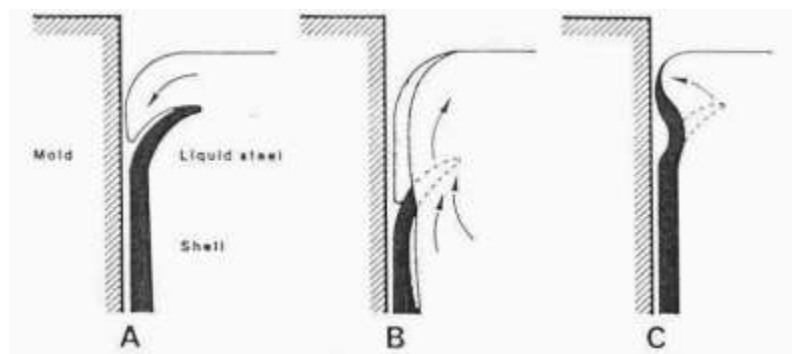


Figura 13. Modelo descrito por Delhalle: (a) Transbordamento, (b) Transbordamento mais refusão, (c) dobramento devido a pressão ferrostática.

Sengupta aperfeiçoou o mecanismo de formação de das marcas de oscilação, transformando em duas etapas predominantes: a curvatura da casca sólida formada durante o estripamento negativo e pelo subsequente transbordamento de aço líquido.



A figura 14 representa as etapas segundo Sengupta.

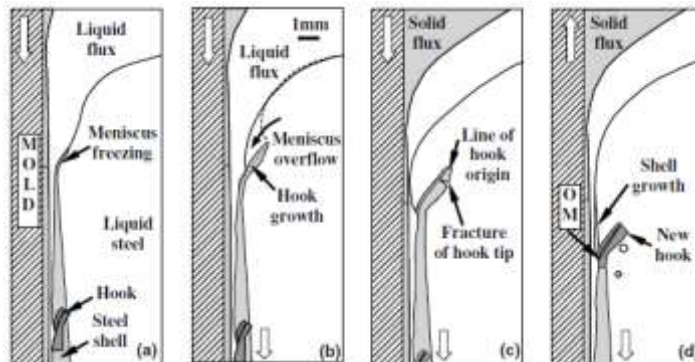


Figura 14. Mecanismo de formação segundo Sengupta. Congelamento do menisco e transbordamento de aço líquido.

O detalhamento da formação das marcas e do gancho é relatado através das seguintes etapas:

I – Formação do gancho através da solidificação do menisco. O formato instantâneo orienta a linha de curvatura do gancho. Esta etapa ocorre durante o estripamento negativo, conforme figura 14 a.

II – A espessura do gancho cresce devido ao crescimento dendrítico em direção ao aço líquido, originados através de sítios ao longo da linha do gancho.

III – Uma porção de aço fundido entra em contato com o menisco, penetrando entre as dendritas do gancho. Esta composição química é revelada durante ataques ácidos, onde há presença de segregação positiva, conforme figura 14b.

IV – Outra porção transborda o menisco formado em direção a parede do molde. Nesta etapa, pequenas dendritas crescem em sentido contrário, acima da linha do gancho. Portanto, em torno de todo o gancho há a presença de dendritas grosseiras devido ao longo tempo de solidificação <sup>(20)</sup>.

V – Duas orientações cristalográficas são bem distintas nos grãos que envolvem o gancho. Isto se deve ao diferente momento no qual ocorre a solidificação do menisco e o transbordamento de fluido fundido, conforme figura 15.

VI – O formato final do gancho é completo quando a ponta deste sofre uma quebra e é carregado pelo aço líquido, conforme Figura 14 c.

VII – A região que recebe o transbordamento de aço e esta em contato com o molde da origem a nova marca de oscilação, conforme Figura 14 d.

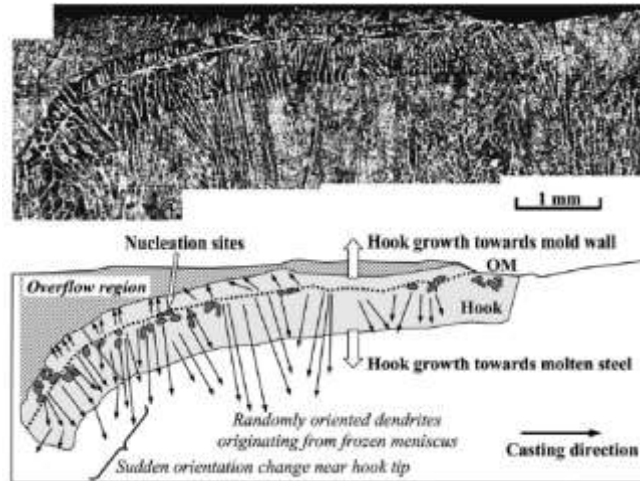


Figura 15. Crescimento dendrítico e gancho revelado através de ataque especial.

Cada gancho apresenta uma linha de origem do gancho, na qual indica a forma que o menisco solidificou-se.

Existe uma variação muito grande na forma desses ganchos (profundidade e comprimento), o que indica a complexidade do evento que por sua vez é dependente do tempo e da forma em solidificação.

A equação de Bikerman considera a linha de origem do gancho como sendo o balanço entre as forças de tensão de superfície e a pressão ferrostática, provando que a formação do gancho ocorre durante a solidificação. O cálculo da linha do gancho leva em conta os seguintes fatores, conforme as equações 4, 5 e 6, onde:

- $x$  é a distância perpendicular da parede do molde, em m;
- $z$  é a distância vertical da parede do molde, em m;
- $\Delta\gamma$  é a diferença de tensão superficial entre o aço líquido e a escória líquida, em N/m.
- $\Delta\rho$  é a densidade relativa entre o aço líquido e a escória líquida, em kg/m<sup>3</sup>.
- $g$  é a aceleração gravitacional, 9,81 m/s<sup>2</sup>.

$$x - x_0 = -\sqrt{2a^2 - z^2} + \frac{a}{\sqrt{2}} \ln \frac{a\sqrt{2} + \sqrt{2a^2 - z^2}}{z} \quad (4)$$

$$x_0 = a - \frac{a}{\sqrt{2}} \ln(\sqrt{2} + 1) \quad (5)$$

$$a = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta\gamma}{\Delta\rho \cdot g}} \quad (6)$$

Outros fatores que alteram a marca de oscilação são listados a seguir:

- Mudanças bruscas no nível de aço do molde;
- Elevada turbulência devido ao jato de aço líquido no molde;
- Fluxante do molde muito fluido. Pode interromper o a formação da marca e em casos extremos formar uma pele rugosa;

Posição das marcas no tarugo. Próximo ao canto as marcas são mais profundas devido ao baixo sobreaquecimento e também a alta pressão do fluxante nos cantos do molde <sup>(21)</sup>.

### *Influência das Marcas de Oscilação*

A oscilação do molde é necessária para facilitar a extração dos tarugos de dentro do molde, de forma suave, para evitar agarramento e posterior rompimento da pele do aço.

A formação de marcas de oscilação e ganchos sub-superficiais estão associadas ao movimento vertical do molde com significante alteração <sup>(22)</sup>:

- Na extração de calor local;
- No fluxo do lubrificante líquido que percorre o espaçamento entre a pele e a parede do molde;
- Na solidificação inicial do menisco;

Demais efeitos são listados a seguir:

- Presença de segregação positiva no interior da marca, contendo elementos fragilizantes como Fósforo, Enxofre, Hidrogênio <sup>(23)</sup>;
- Presença de pó de molde na microestrutura sub-superficial das marcas de oscilação. A figura 16 revela a imagem de pó de molde ao longo do gancho, através de análise de EPMA (Electron Probe Micro Analysis);

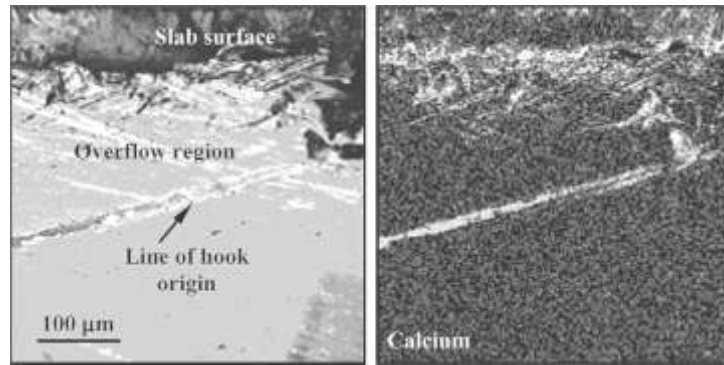


Figura 16. Linha subsuperficial do gancho com a presença de cálcio oriundo do pó de molde lubrificante <sup>(22)</sup>.

- Concentração de tensão devido ao entalhe que a marca de oscilação proporciona.
- Lubrificação adequada entre pele/molde. Araki et al <sup>(24)</sup> criou um índice que correlaciona a distância percorrida em estripamento negativo e o tempo em estripamento positivo, de acordo com a equação 4 <sup>(24)</sup>.

$$LI \text{ (Lubrication Index)} = R_{NA}^{0.3} \times t_P^{0.5} \quad (7)$$

Em seu trabalho, verificou-se que curvas de oscilação com maior amplitude e assimetria proporcionam melhores condições de lubrificação, conforme figura 17.

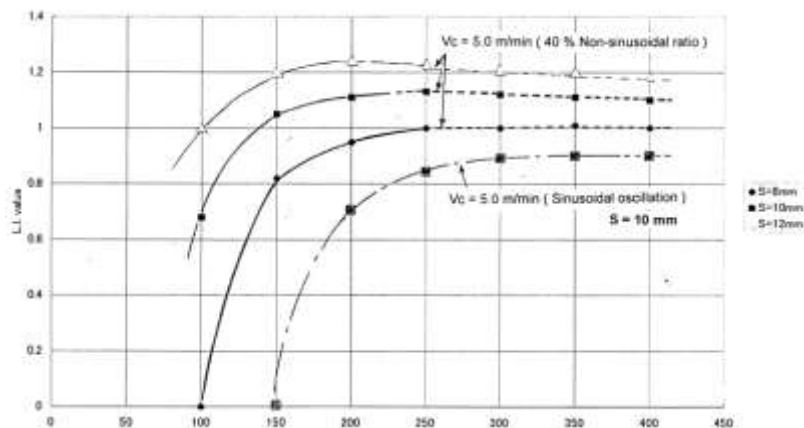


Figura 17. Efeito da amplitude no índice de lubrificação.

A distancia entre as marcas de oscilação é uma função da relação entre a velocidade de lingotamento e a frequência de oscilação, conforme a equação 4:

$$D_{om} = \frac{V_c}{f} \quad (8)$$

Demais correlações são verificadas na literatura que propiciam aumento de profundidade das marcas:

- Maior a distância entre as marcas devido à menor frequência de oscilação, conforme figura 18<sup>(9)</sup>.

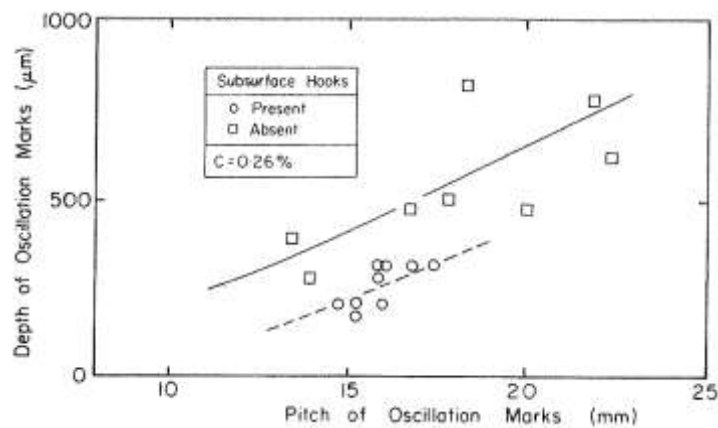


Figura 18. Efeito da distância (Pitch) versus profundidade (Depth) das marcas. <sup>(18)</sup>

- B. G. Thomas, em um de seus inúmeros trabalhos, propôs uma nova equação que define a profundidade da marca de oscilação correlacionando o tempo de estripamento negativo, velocidade de lingotamento e propriedades do pó de molde, constate k, conforme a equação 5.

$$(D_{OM})_{estimated} = k \times t_n^{0.272} \times v_s^{-1.04} \quad (9)$$

Os pós fluxantes com baixa temperatura de solidificação propiciam marcas de oscilação rasas. Isso ocorre devido à formação de pequeno cordão de escória.

Entretanto Hill<sup>(25)</sup>, afirmou que o efeito do fluxante nas marcas de oscilação ocorre devido à viscosidade da escória. Quanto menor a viscosidade, mais fácil será o transbordamento do fluxo viscoso na região do menisco e menores serão as marcas<sup>(25)</sup>.

Os gráficos da figura 19 mostram onde estão correlacionadas as variáveis de amplitude, frequência, percentual de estripamento negativo e tempo de estripamento negativo.

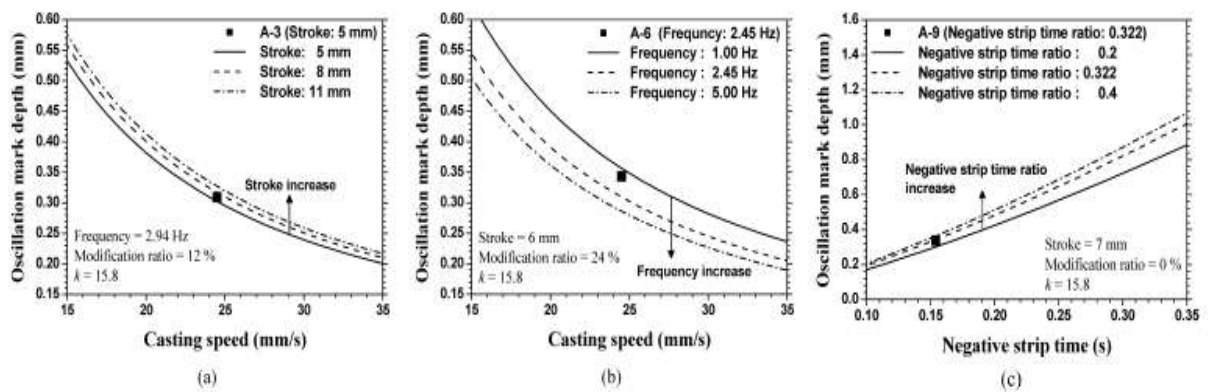


Figura 19. Influencia da velocidade e amplitude (a), velocidade e freqüência (b), tempo e percentual de estripamento negativo (c).

Demais correlações entre marcas de oscilação e parâmetros do lingotamento: quanto maior o estripamento negativo e menor velocidade de lingotamento mais profundas serão as marcas. A característica dos fluxantes também afetam as marcas. Quanto menor a viscosidade, maior serão as marcas. Quanto a composição química do aço, o efeito mais pronunciado das marcas se dá nos aços peritéticos, conforme figura 20. Flutuação no nível de aço líquido no molde também pode afetar em maiores marcas de oscilação.

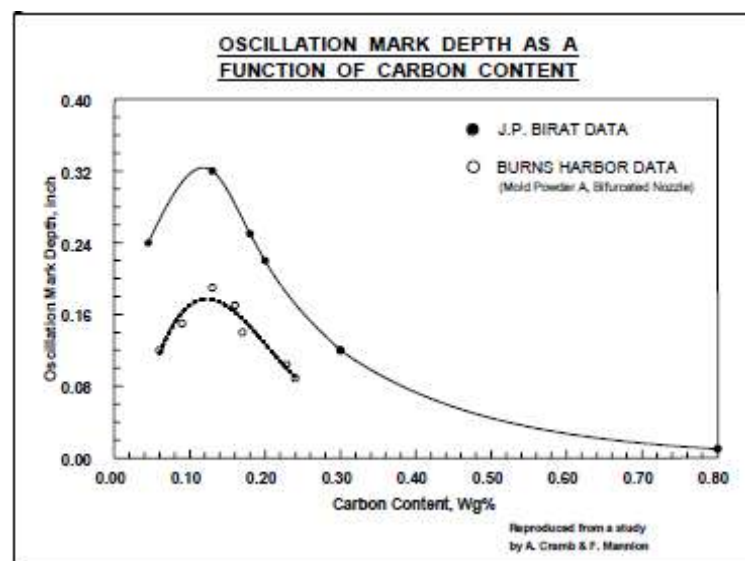


Figura 20. Efeito do carbono na profundidade das marcas de oscilação.

## Tipos de Defeitos Superficiais

Vários problemas de qualidade interna e superficial que surgem nos tarugos podem ser verificados na figura esquemática 21.

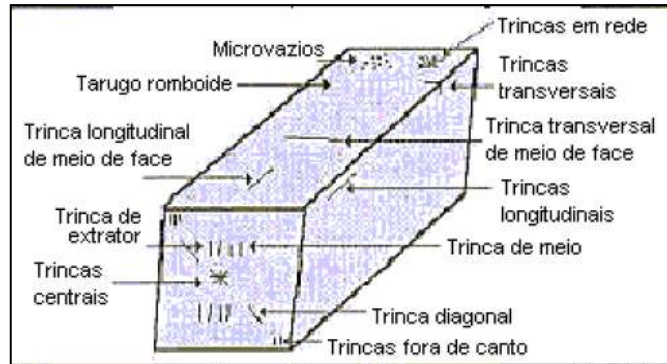


Figura 21. Defeitos Típicos em Lingotamento Contínuo.

O conceito de faixas de fragilidade em função da temperatura explica a perda de ductilidade do material em determinada condição.

Existem três faixas de temperatura definida na literatura onde diferentes elementos fragilizam a material, conforme a figura 22, que mostra um esquema das faixas BTR (faixas de temperatura frágil).

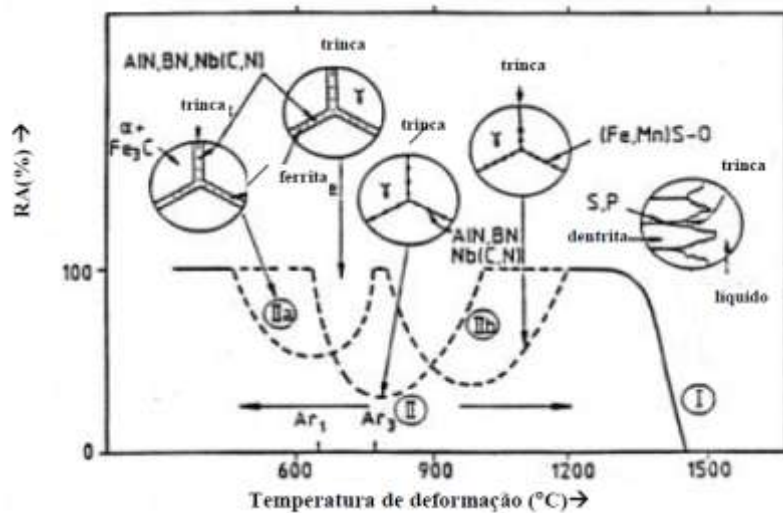


Figura 22. Esquemas das microestruturas nas faixas de temperaturas.

As trincas em BTR I estão relacionadas com a estrutura dendrítica colunar primária. Estas trincas são preenchidas por aço rico em soluto (segregação de Mn, P e S). O Enxofre reduz a faixa de temperatura frágil. A ZDT (temperatura de ductilidade zero) é afetada pelo aumento na concentração de Enxofre<sup>(26)</sup>, conforme a figura 23.

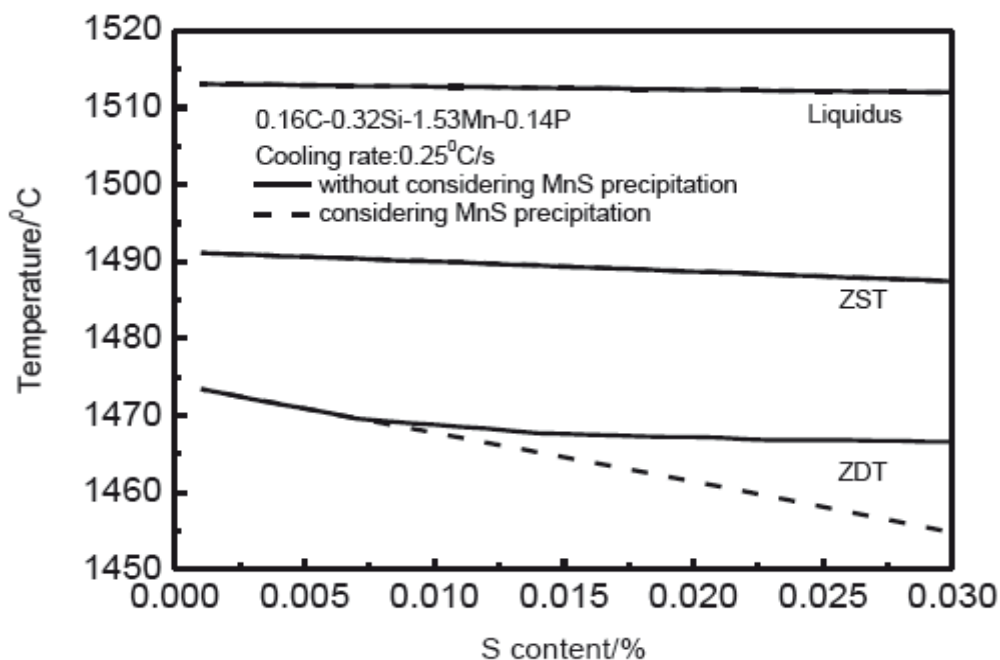


Figura 23. Efeito do Enxofre na Temperatura de Ductilidade Zero.

As trincas em BTR II e III estão relacionadas a grãos austeníticos grosseiros devido a taxas de extração lenta em locais onde há espaçamento entre tarugo e parede do molde.

### Trincas Longitudinais

As trincas longitudinais ocorrem entre o meio e a ¼ do canto do tarugo. Trata-se de defeitos associados a depressões na superfície, rasos, causado por uma série de fatores, tais como <sup>(27)</sup>:

- propriedade mecânica em alta temperatura;
- efeito de elementos fragilizantes;
- extração de calor (design do molde, pó de molde apropriado, temperatura de lingotamento).
- fluxo de aço no molde.

Manter a estabilidade de fluxo de calor no lingotamento é fundamental para reduzir trincas longitudinais, pois estas surgem na posição mais fina da pele solidificada.



## Trincas Transversais

As trincas transversais são observadas nas faces e principalmente nas quinas dos tarugos e placas. Estas são perpendiculares à direção de lingotamento e preferivelmente localizadas ao longo das marcas de oscilação.

As trincas transversais são formadas durante a passagem dos tarugos pela região de endireitamento <sup>(28)</sup>, devido a tensões de tração aplicadas. Logo, trincas transversais estão associadas à fragilização intergranular que ocorre ao longo da temperatura de transição de fase, entre 700 e 900 °C, para a maioria dos aços ao carbono.

Para aços proeutetóides, a nucleação de trincas ocorre nos veios de ferrita, que contornam os grãos austeníticos.

Além disso, nitretos e carbonitretos de Al, Nb, Ti e V precipitam no contorno do grão e diminuem a ductilidade do aço, para o mesmo intervalo de temperaturas, conforme pode ser visto na figura 24.

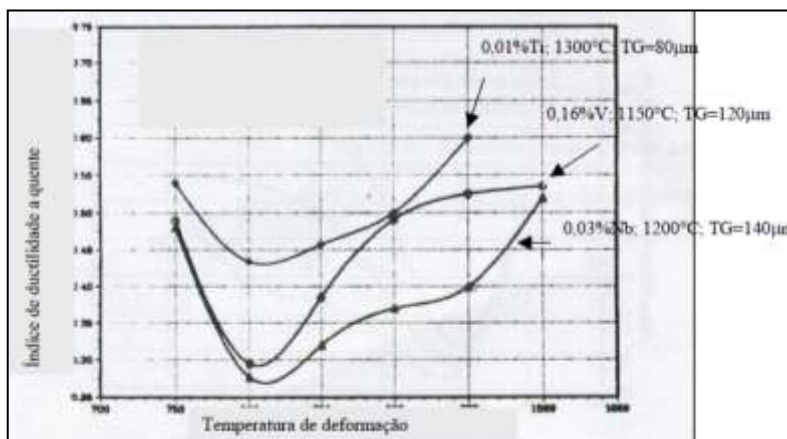


Figura 24. Curvas de ductilidade a quente para aços C-Mn-V e Nb com aproximadamente o mesmo tamanho de grão <sup>(29)</sup>.

## Trincas Transversais Associadas as Marcas de Oscilação

A respeito do efeito das marcas de oscilação na formação de trincas, o entalhe no interior da marca sugere um ponto de baixa tenacidade à fratura durante o endireitamento.

Entretanto, Tanaka <sup>(30)</sup> investigou metalograficamente o interior das marcas de oscilação e verificou que havia finas trincas em regiões de segregação positiva de Fósforo e de Manganês ao longo dos ganchos sub-superficiais. A figura 25 demonstra a segregação no interior do gancho, através de *Computer Aided X-ray Micro Analyser*.

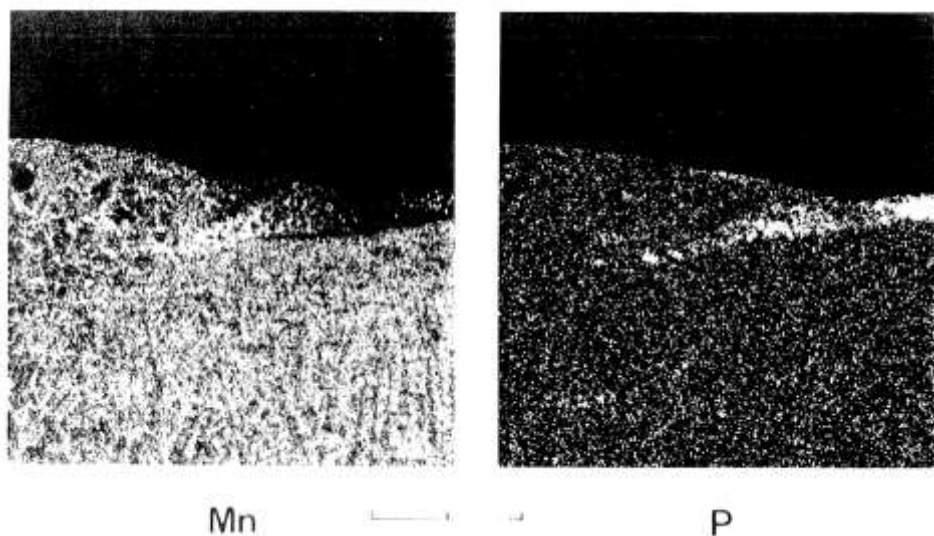


Figura 25. Segregação positiva de Manganês e de Fósforo ao longo do gancho através de CMA (Computer Aided X-ray Micro Analyser).

Devido à maior profundidade das marcas de oscilação, maior era o conteúdo de segregado de Fósforo.

Fortes segregações sub-superficiais vêm a aflorar à superfície durante a laminação. Isto implica em problemas de qualidade do produto final.

A quantidade de segregação positiva aumenta com o aumento do tempo de estripamento negativo.

Foi observado por Saucedo <sup>(31)</sup> a diferença na morfologia da microestrutura entre o topo e o vale das marcas de oscilação. Os grãos de ferrita-perlita no vale das marcas são muito mais grosseiros quando comparados ao topo, conforme figura 26. Grãos mais grosseiros são mais frágeis que grãos refinados, logo as trincas transversais ocorrem na base das marcas.

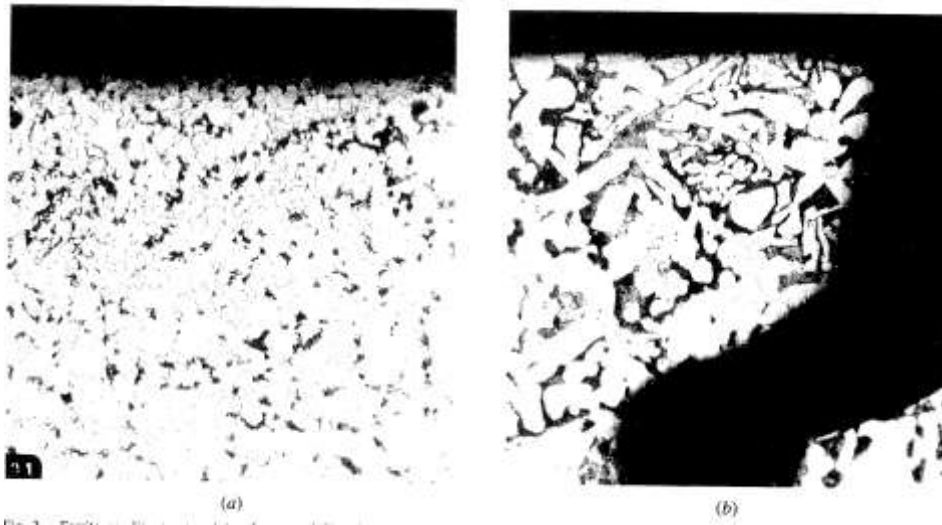


Figura 26. Grãos finos no topo da marca (a) e grãos grosseiros na base da marca (b).

De acordo com B.G. Thomas, <sup>(22)</sup> os grãos formados acima da linha de origem do gancho são mais desorientados que os formados abaixo. Essa diferença relativa na desorientação não desaparece nas transformações de fase (de ferro delta para ferro gama). Pelo contrário, essa desorientação nos grãos primários pode potencializar nova recristalização e formar grãos secundários mais grosseiros durante o lingotamento. Isso implicará em trincas transversais.

Carpenter <sup>(32)</sup> argumenta em sua tese que trincas transversais iniciam nos filmes grosseiros de ferrita que contornam os grãos austeníticos. A ductilidade e tensão de escoamento é muito menor em grãos ferríticos do que nos austeníticos.

### Efeitos da Taxa de Deformação na Ocorrência de Trincas

A deformação dos tarugos ocorre na região de extração/endireitamento onde o aço líquido no núcleo está parcialmente solidificado.

Conforme Suzuki, a deformação crítica para o surgimento de trincas pode ser estimado a partir da redução de área (%RA).

A fragilização que ocorre entre 700°C e 900°C aumenta conforme a taxa de deformação reduz. Isso ocorre por que:

- não há tempo suficiente para a formação de precipitados induzidos pela deformação;
- diminui o escorregamento dos contornos de grão;
- não há tempo suficiente para a formação e aumento controlado por difusão de vazios para subsequente precipitação.

Conforme a figura 27 mostra, a taxa de deformação e a temperatura são dois fatores determinantes para o surgimento de trincas, pois o percentual máximo sem redução de área reduz drasticamente.

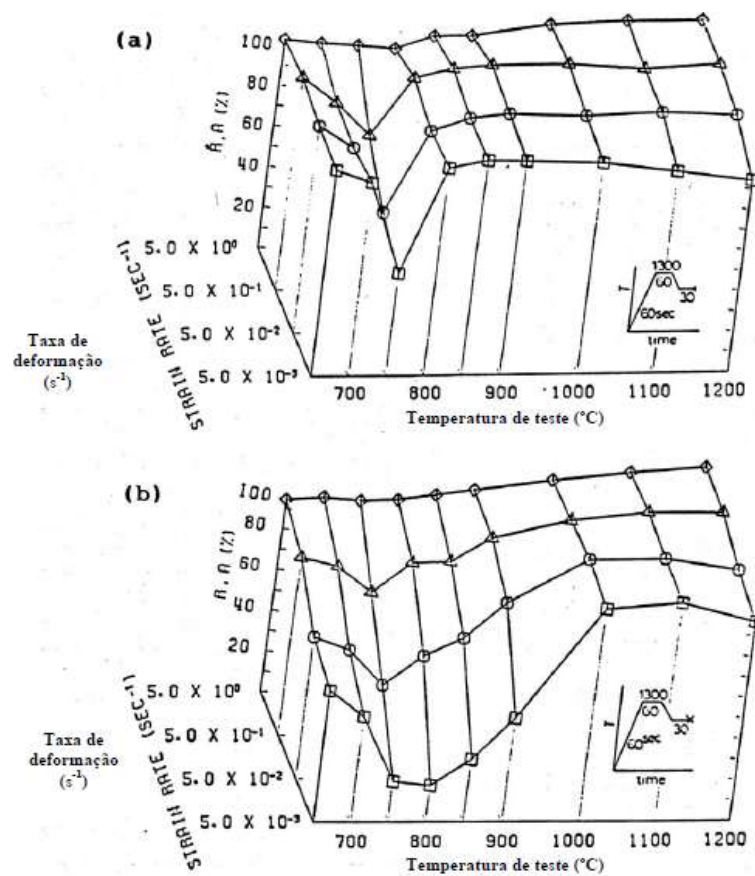


Figura 27. Influência da taxa de deformação e temperatura na ductilidade a quente para um aço carbono comum (a) e para um aço peritético com 0,04% de Nb, 0,03% de Al e 0,006 de N<sup>(33)</sup>.

## Fluxantes

No processo de lingotamento contínuo de aços é usual a utilização de pós fluxantes ou óleos com o objetivo de lubrificar o molde devido a agarramentos da pele solidificada.

Os pós de molde fundem formando uma poça líquida de escória e uma fina camada de escória sólida (vítrea e/ou cristalina) conforme figura 28.



Figura 28. Esquema dos componentes que envolvem a região superior interna do molde.

Os fluxantes atuam em dois momentos <sup>(34)</sup>:

- Na interface aço líquido – superfície: com os objetivos de evitar a perda de temperatura, a reoxidação do aço e absorver inclusões endógenas.
- Na interface aço líquido – parede do molde: com os objetivos de lubrificar a parede do molde e controlar a extração de calor.

Escórias oriundas da fusão do pó de molde podem ser líquidas, cristalinas ou uma mistura de ambas. Essa constituição vai depender da composição química da escória e do resfriamento local <sup>(35)</sup>.

A densidade de calor que é extraído depende da basicidade e temperatura de solidificação do pó fluxante. A cristalinidade da escória atua como um redutor na extração de calor, devido ao incremento na resistência à passagem de calor. A causa desse fenômeno ainda é discutida na literatura, pois pode estar atrelado ao coeficiente de absorção de calor ou pelos vazios que a estrutura cristalina proporciona <sup>(36)</sup>.

### Efeitos dos Parâmetros de Oscilação na Lubrificação

É sabido que o tempo de estripamento negativo é essencial para melhorar as condições de interface entre metal/molde.

Autores explicitam demais fatores de oscilação com a lubrificação:

-Amplitude: quanto maior a amplitude de oscilação, maior será o consumo de lubrificante por unidade de área. Isso se deve ao alongamento do molde durante o estripamento negativo <sup>(36)</sup>;

-Frequência: quanto maior a frequência, menor será o consumo de lubrificante.

-Taxa de modificação senoidal: quanto maior a taxa, maior será o consumo de lubrificante.

-Tempo de estripamento negativo: durante este tempo, as forças de fricção do molde mudam de comportamento de tensão para compressão (da condição de agarre para a condição de descolamento). Este efeito é devido à pressão que ocorre no fluxante neste período.

- Tempo de estripamento positivo: quanto maior tempo de estripamento positivo, maior será o consumo de lubrificante.

## Tipos de Aços

Segundo Fernandes, a primeira grande classificação que se faz aos aços que são produzidos no lingotamento contínuo diz respeito ao potencial de ferrita (FP), ou seja, a fração de ferrita primária formada durante a solidificação <sup>(37)</sup>. Estudos feitos por Wolf mostram que o comportamento dos aços dentro do molde se diferencia pelo potencial de ferrita e pelo Carbono Equivalente da reação peritética (Cp). Aços que possuem valor de FP entre a faixa de 0,85 e 1,05 caracterizam-se por contrair a pele solidificada dentro do molde, causando depressões e irregularidades superficiais. Enquanto que aços fora dessa faixa possuem a tendência de agarrar dentro do molde <sup>(38)</sup>.

As equações 10 e 11 a seguir mostram como é calculado o Cp e FP. A figura 29 demonstra o efeito do FP dos aços dentro do molde, de acordo com Wolf.

$$Cp = [\%C] - 0,04[\%Mn] - 0,1[\%Ni] - 0,14[\%Si] - 0,04[Cr] - 0,1[\%Mo] - 0,4[\%Ti] \quad (10)$$

$$FP = 2,5(0,5 - [Cp]) \quad (11)$$

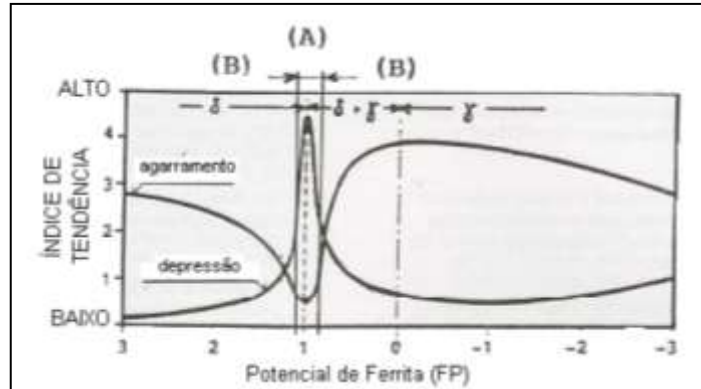


Figura 29. Tipos de aços (A e B) em função do potencial de ferrita mostrando tendência à depressão ou agarramento dentro do molde <sup>(39)</sup>.

O fenômeno de contração da pele solidificada dentro do molde pode ser mapeado com sensores ópticos para avaliação do comportamento térmico dos aços baixo e médio carbono. Conforme a figura 30 <sup>(40)</sup>, é verificado que os aços com baixo carbono extraem menos calor devido ao afastamento entre pele/molde em função da reação peritética. Para minimização deste fator, pós de molde de alta viscosidade são empregados.

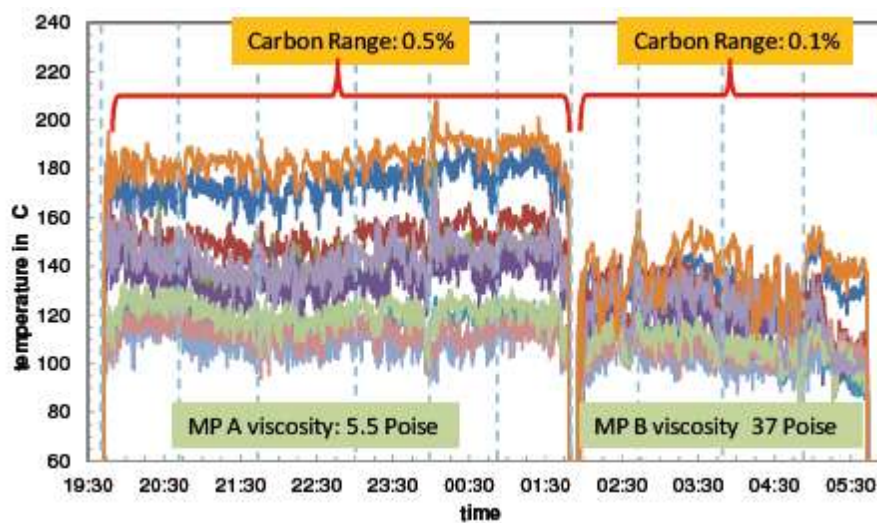


Figura 30. Extração de calor diferenciada entre teores de carbono diferenciados.

## Laminação

O processo de deformação plástica de metais através de sua passagem entre dois cilindros é conhecido como laminação. Este processo proporciona aumento de

produtividade na transformação de metais. O processo de laminação pode ser classificado, dependendo da temperatura de trabalho, como laminação a quente ou a frio <sup>(41)</sup>.

Durante a laminação a quente, os aços são aquecidos até atingirem temperatura necessária para serem austenitizados. Em seguida, iniciam-se as etapas de conformação. Portanto, a laminação convencional pode ser separada em quatro etapas:

- Reaquecimento;
- Desbaste;
- Acabamento;
- Resfriamento.

Do ponto de vista metalúrgico o desbaste tem o objetivo de transformar a estrutura bruta de fusão, compostas de grãos colunares e equiaxiais grosseiros, em grãos menores e mais homogêneos e posteriormente promover o refino da estrutura conformada, com a combinação de deformações seguidas de recristalizações, nos intervalos entre passes <sup>(42)</sup>.

### **Influência da Laminação para Surgimento de Trincas**

De acordo com Silva <sup>(43)</sup> a seqüência entre passes de laminação e a temperatura de laminação são os principais fatores para o surgimento de trincas superficiais. O motivo está associado à ductilidade a quente do material.

Outros fatores como, calibração, vida dos cilindros, remoção de carepa, tensão entre outros podem influenciar na incidência das trincas.

As variações em temperatura afetam drasticamente a resistência a conformação. Para temperaturas baixas, a resistência aumenta possibilitando o surgimento de trincas devido à baixa ductilidade a quente.



## METODOLOGIA E EXPERIMENTOS

### Descrição do Problema

A motivação à realização dos experimentos conduzidos neste trabalho teve como objetivos a caracterização das marcas de oscilação dos tarugos de seção quadrada - 155x155 mm, do aço Din16MnCr5mod e os impactos em defeitos superficiais de barras laminadas redonda com 50,80 mm diâmetro.

Na parte experimental buscou-se avaliar o impacto dos parâmetros de oscilação na formação das marcas de oscilação nos tarugos, bem como o impacto em defeitos superficiais encontrado nas barras laminadas.

A figura 32 apresenta uma peça de 500 mm que foi cortada a partir de corrida teste. Nesse formato foi possível avaliar a distância entre as marcas de oscilação, profundidade e abertura.



Figura 31. Amostra do tarugo com jateamento para caracterização das marcas.

Na figura 33 está representado o típico defeito de trinca cuja origem pode ter sido ocasionada na base de uma marca de oscilação.

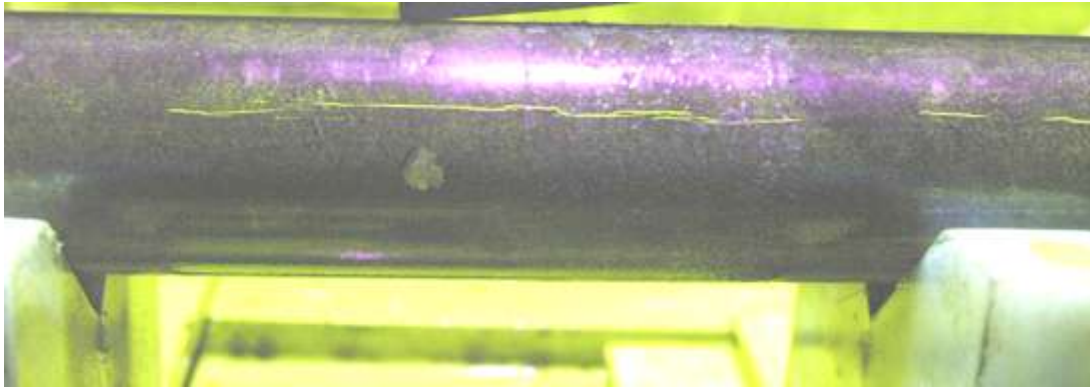


Figura 32. Típico defeito do tipo trincas de aciaria em barra laminada.

## Equipamentos

Os experimentos foram realizados em uma siderúrgica localizada em Charqueadas e lingotados em seção quadrada de 155x155 mm - máquina de fabricação Concast.

As principais características dessa máquina podem ser verificadas na tabela abaixo:

Tabela 1. Dados da máquina de lingotamento contínuo

Fabricante	Concast
Número de veios	3
Seções (mm)	155x155
Tipos de Molde	Convex
Comprimento do molde (mm)	900
Raio de curvatura (m)	9
Transporte do aço panela-distribuidor	Tubo Longo
Transporte do aço distribuidor-molde	Válvula Submersa (SEN)
Abastecimento de pó no molde	Semi-automático pneumático
Controle de fluxo (distribuidor molde)	Haste Tampão
Controle de Nível de aço	Radioativo
Número de zonas de resfriamento secundário	2
Sistema de corte de tarugos	Tocha

## Materiais

O aço escolhido para os testes foi o Din16MnCr5. Este aço apresenta como característica principal a contração da pele solidificada devido ao efeito do fator ferrítico.

Na tabela 2 segue a faixa de composição química deste aço:

Tabela 2. Faixa de Composição Química do aço Din 16MnCr5.

	C	S	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Al	Sn	Cu	Pb	N	H2
Min	0,150	0,170	1,050		0,020	0,950		0,030	0,015	0,020				0,0090	
Máx	0,170	0,270	1,200	0,025	0,035	1,100	0,250	0,060	0,025	0,040	0,030	0,300	0,010	0,0120	2,500

Os tarugos foram aplicados para laminar na bitola redonda 50,80 mm, em trem aberto.

## Metodologia

O teste constituiu na modificação dos parâmetros de oscilação em quatro condições diferenciadas ao longo de uma corrida a fim de evitar ruídos de outros fatores que geram defeitos superficiais.

Foi avaliado o aspecto visual dos tarugos, bem como a caracterização das marcas de oscilação em cada condição e atrito entre o metal-molde.

Foi analisado também o índice de rejeição por defeitos superficiais tipo trincas na inspeção de barras laminadas em equipamento Circoflux, responsável pela identificação de defeitos superficiais a partir de aplicação de um campo magnético.

A realização de um projeto de experimentos em dois níveis com dois fatores foi utilizada para determinar a influência nas marcas de oscilação de maneira combinada. Na tabela 3 ressalta-se os fatores que compõe o teste e seus valores extremos.

Tabela 3. Fatores avaliados.

Fatores	Nível Alto	Nível Baixo
Tempo de Estripamento Negativo (s)	0,110	0,094
Freqüência (ciclos/minuto)	210	200

Os testes geraram quatro condições diferentes, com os seguintes parâmetros de oscilação:

Tabela 4. Parâmetros de oscilação empregados para o teste.

Ordem do teste	Velocidade de Lingotamento (m/min)	Frequência (ciclos/min)	Amplitude (mm)	NST (s)
1	2,12	200	6,0	0,094
2	2,12	210	6,2	0,094
3	2,12	200	8,2	0,110
4	2,12	210	9,0	0,110

O pó fluxante utilizado nos teste foi mantido constante. Na tabela 5 segue a composição química do fluxante.

Tabela 5. Composição Química do pó fluxante.

Composição Química (%)												
Limites	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Li <sub>2</sub> O	F	MnO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C Livre	C Total
Mínimo	27,0	26,5	4,0	4,0	-	-	3,5	1,5	-	-	15,5	16,0
Médio	29,0	28,5	5,0	5,0	-	-	4,5	2,5	-	-	16,5	17,5
Máximo	31,0	30,5	6,0	6,0	1,0	-	5,5	3,5	2,5	1,0	17,5	19,0

As amostras de tarugos foram inspecionadas e analisadas em laboratório metalúrgico nos seguintes equipamentos:

Microscópio Óptico: OLYMPUS BX60M

Estereomicroscópio (lupa): OLYMPUS SZ60

Microscópio Eletrônico de Varredura - ZEISS - LEO 440

## RESULTADOS

Para demonstrar os resultados, foram amostrados 500 mm de tarugos de cada condição de oscilação pré-estabelecida.

O primeiro corte foi realizado transversalmente ao sentido de lingotamento. Após foi realizado outro corte da face lateral do tarugo, onde as marcas não sofreram esforços mecânicos no endireitamento, como mostra a figura 34.

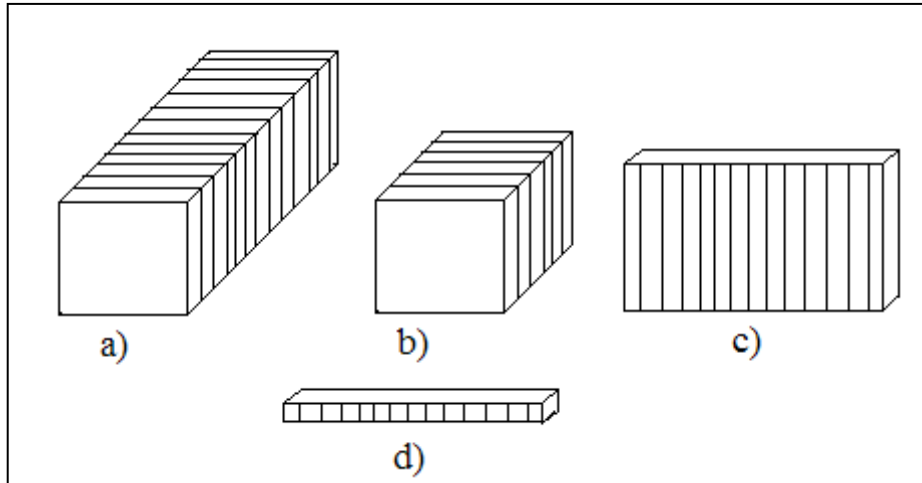


Figura 33. (a) Tarugo; (b) Corte Transversal ao sentido de lingotamento; (c) Corte longitudinal ao sentido de lingotamento; (d) Amostra do corte.

Em equipamento de jateamento mecânico, as amostras de tarugos foram decapadas, evidenciando as marcas de oscilação. Foi realizada fotografia em máquina Canon, inspeção dos tarugos em ensaio de partícula magnética e medidos as distâncias e profundidade através de paquímetro e micrometro respectivamente.

No ensaio de partícula magnética, não foi verificado trincas superficiais nas amostras coletadas.

A seguir, da figura 35 a 46 mostram a sequencia de imagens da superfície analisada em cada condição.

Condição 1: Frequência 200 e NST 0,094.



Figura 34. Tarugo da condição 1.



Figura 35. Detalhe das marcas da condição 1.

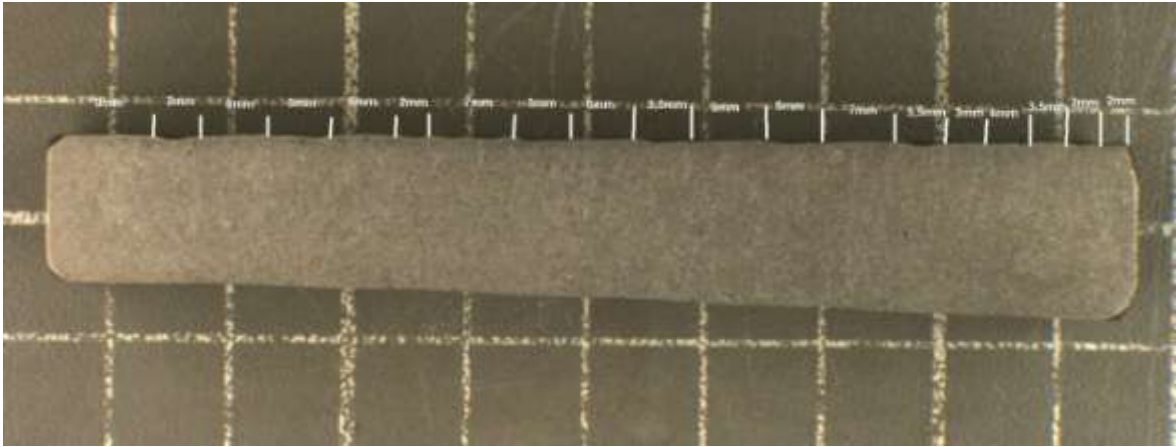


Figura 36. Distância das marcas de oscilação da condição 1.

Condição 2:Frequencia 210 e NST 0,094.



Figura 37. Tarugo da condição 2.



Figura 38. Detalhe das marcas da condição 2.

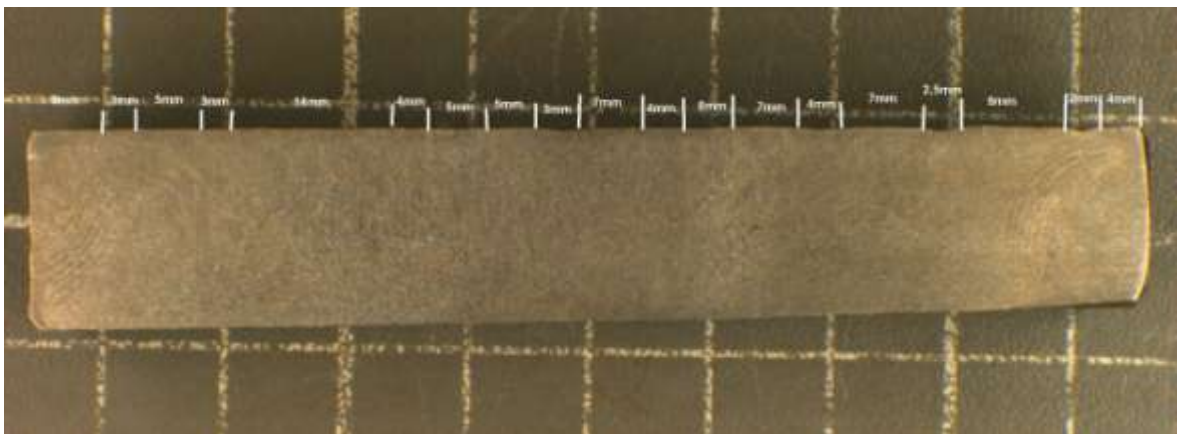


Figura 39 Distância das marcas de oscilação da condição 2.



Condição 3: Frequencia 200 e NST 0,110.



Figura 40. Tarugo da condição 3.



Figura 41. Detalhe das marcas de oscilação da condição 3.

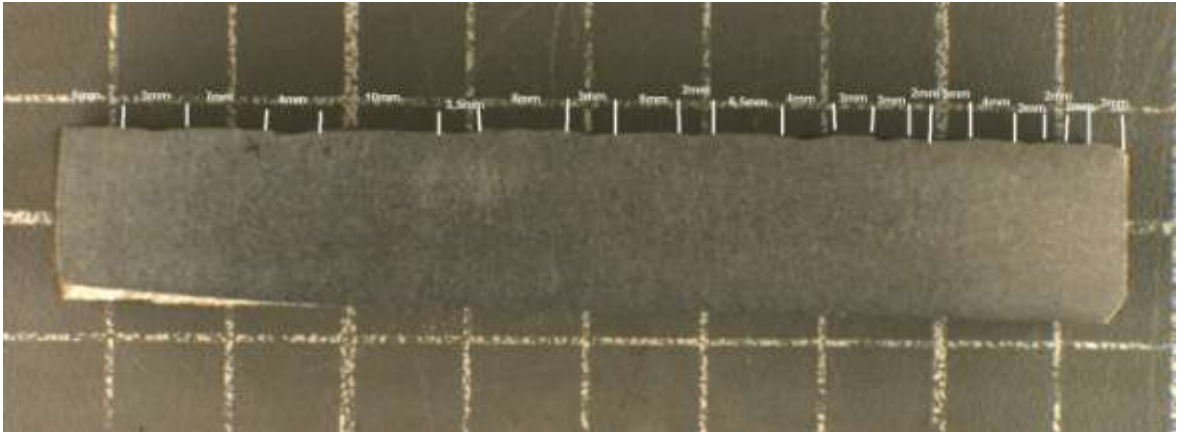


Figura 42. Distância das marcas de oscilação da condição 3.

Condição 4: Frequencia 210 e NST 0,110



Figura 43. Tarugo da condição 4.



Figura 44. Detalhe das marcas de oscilação da condição 4.

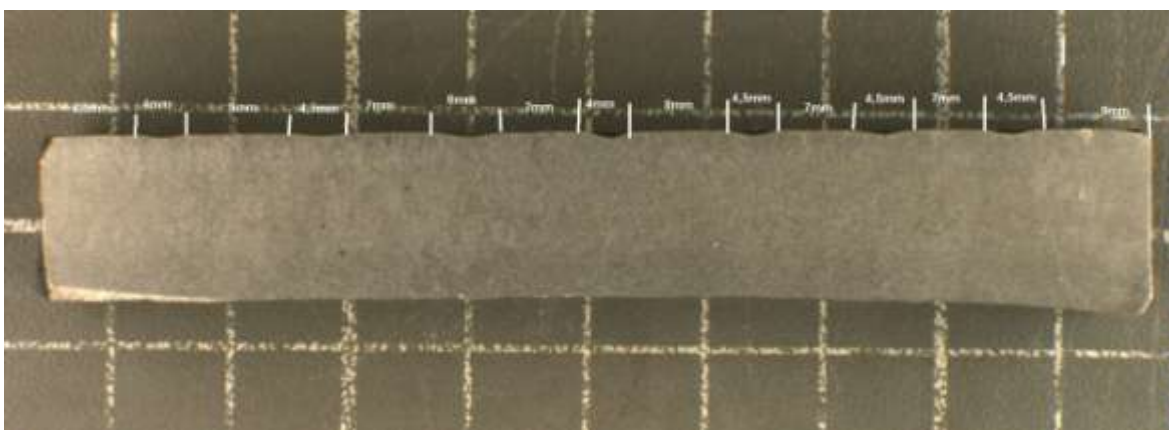


Figura 45. Distância das marcas de oscilação da condição 4.

## Distância entre as Marcas de Oscilação

As medidas de espaçamento entre as marcas de oscilação foram feitas a partir de amostras das laterais dos tarugos em cada condição de trabalho. Foram tomadas dez medidas para cada condição.

Conforme evidenciado na revisão bibliográfica, a distância das marcas foi afetada pela combinação dos fatores – frequência e NST. Entretanto, não seguiu a regra simples da razão entre frequência e velocidade. Isto se deve a modificação dos demais fatores (NST e Amplitude).

O resultado é mostrado nas figuras 47 e 48, nas quais é possível notar que a distância é reduzida pelo NST baixo e frequência alta.

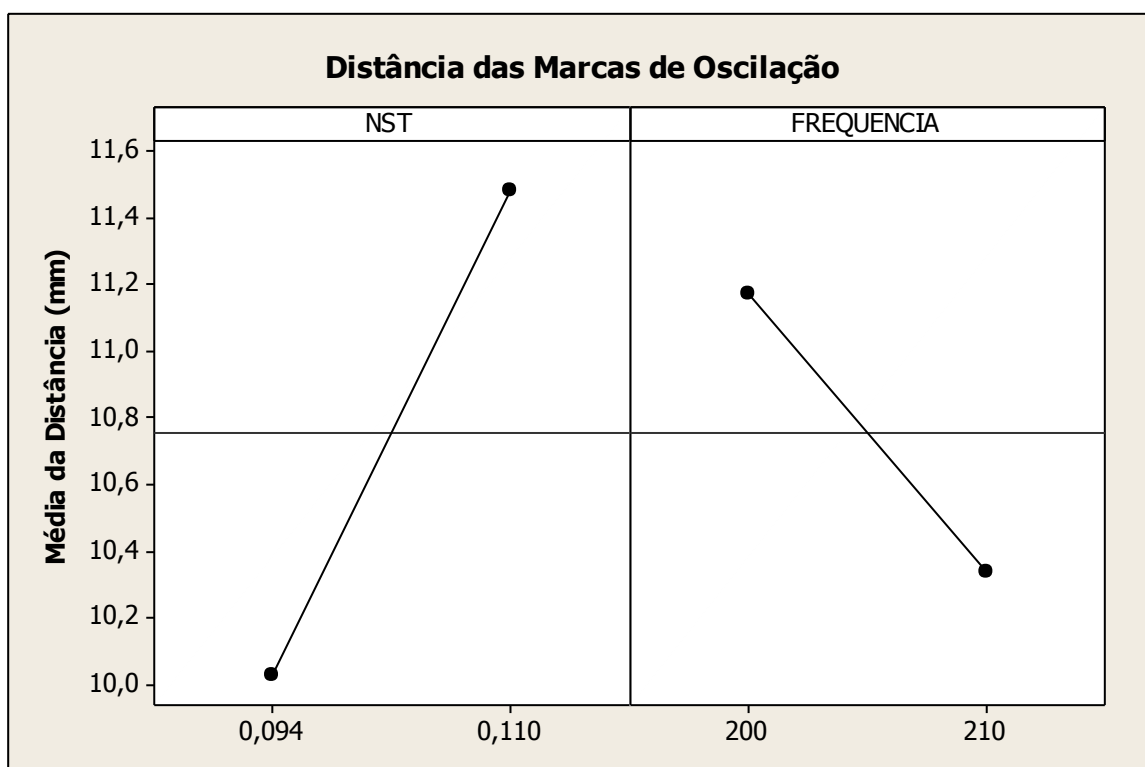


Figura 46. Impacto do NST e Frequência na distância média entre as marcas.

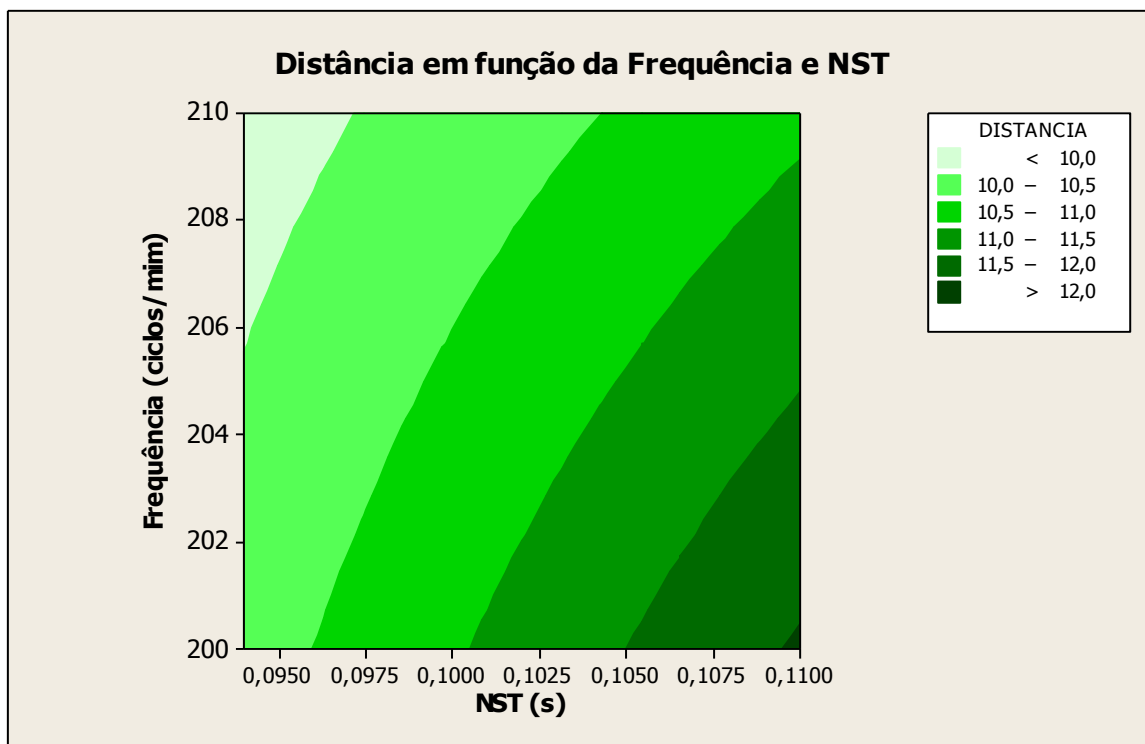


Figura 47. Curvas de contorno para a correlação entre NST, Frequência e Distância das Marcas de Oscilação.

## Profundidade das Marcas de Oscilação

As medidas de profundidade entre as marcas de oscilação foram feitas a partir de amostras das laterais dos tarugos em cada condição de trabalho. Foram tomadas cinco medidas para cada condição.

Verificou-se forte influência do NST na profundidade das marcas, no qual a frequência de oscilação impactou de maneira moderada. Esses fatores podem ser vistos nas figuras 49 e 50, nas quais as combinações dos fatores conduzem à menor ou maior profundidade.

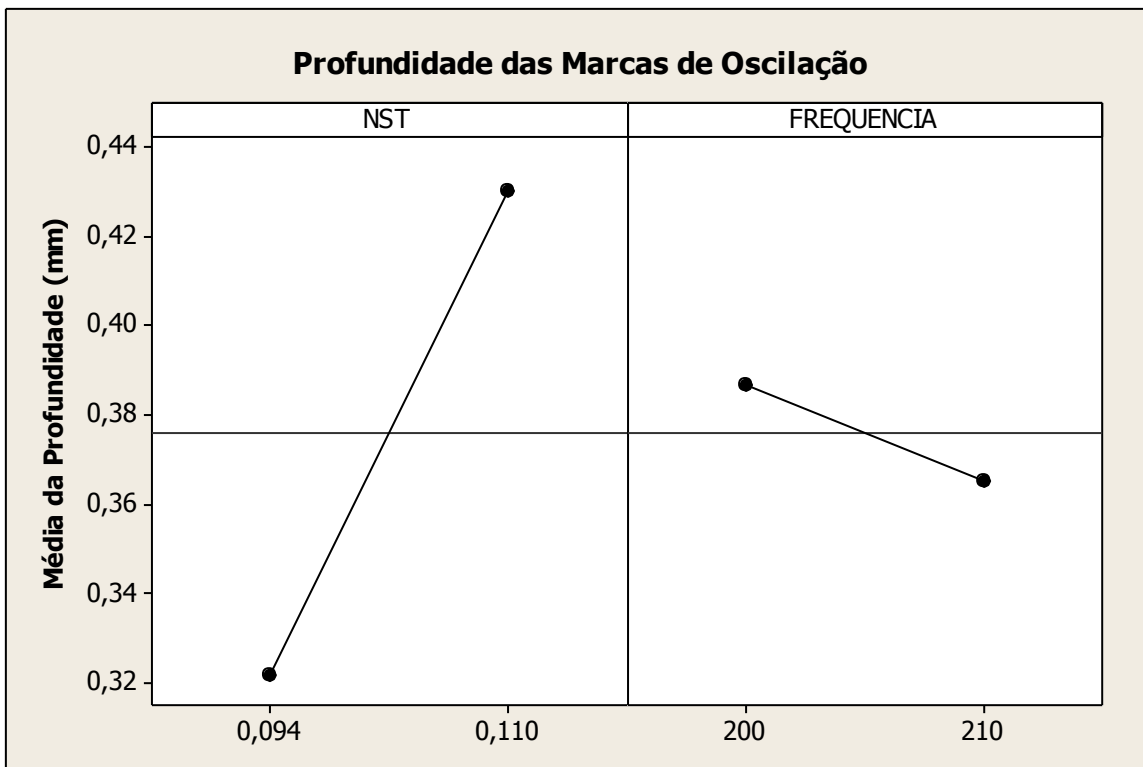


Figura 48. Profundidade das marcas em função do NST e Frequência.

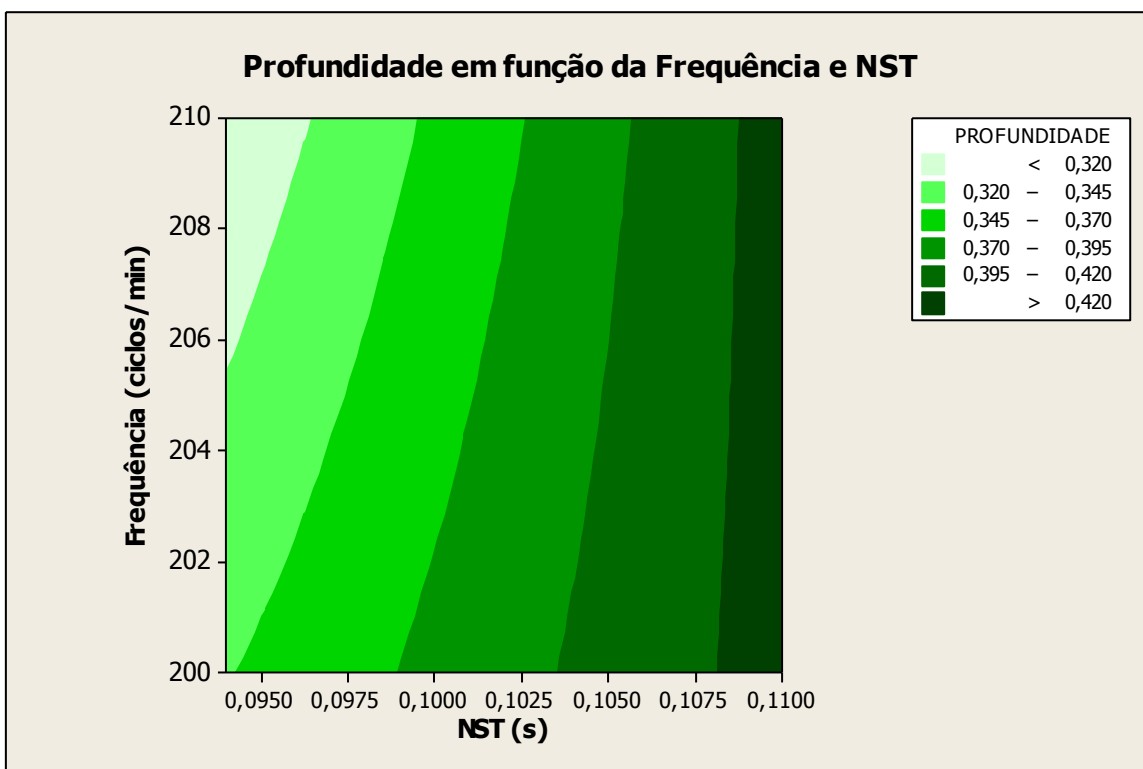


Figura 49. Curvas de contorno para a correlação entre NST, Frequência e Profundidade das Marcas de Oscilação.

## Abertura das Marcas de Oscilação

A abertura das marcas de oscilação segue a mesma tendência da distância e profundidade. Quanto maior o NST, maior a abertura das marcas de oscilação. Esse efeito aumenta o descolamento do metal, aumentando a contração durante a solidificação, conforme figura 51.

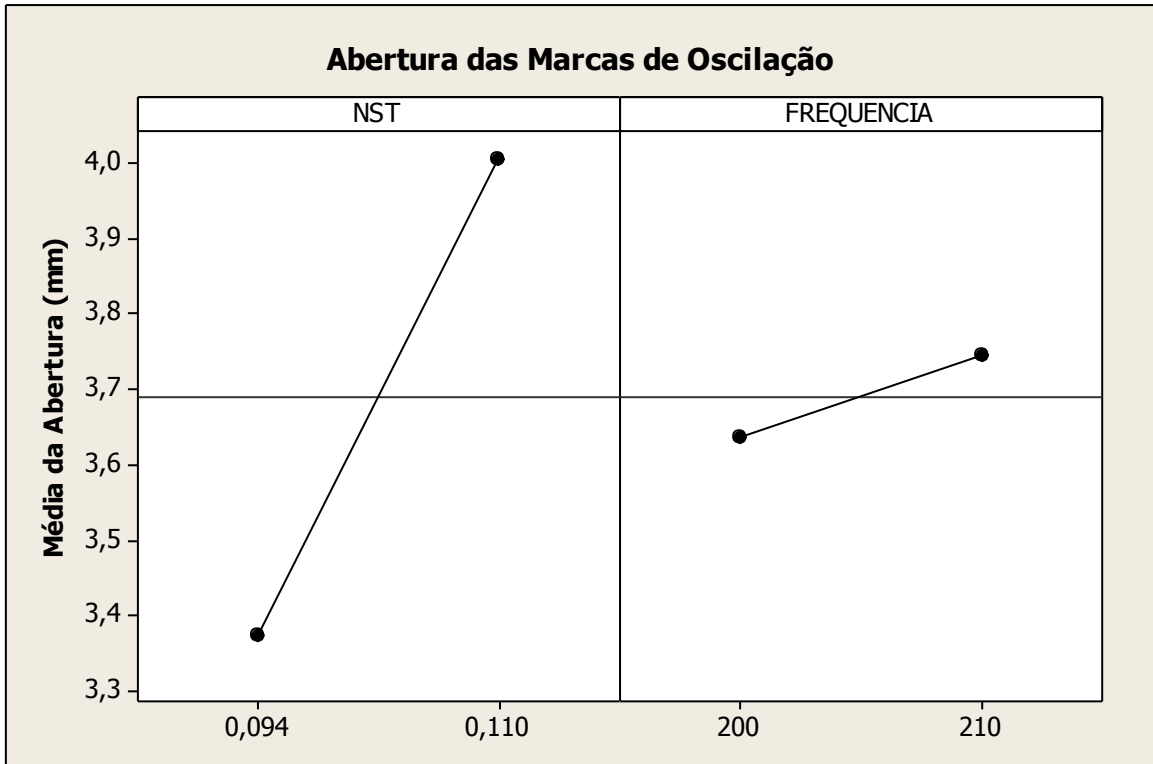


Figura 50. Abertura das marcas de oscilação em função do NST e Frequencia.

## Atrito Tarugo - Molde

A força de atrito entre o tarugo e o molde durante o lingotamento foi medido através da força em que o mecanismo de oscilação atua durante o movimento vertical do molde. Para cada condição de oscilação, verificou-se que o comportamento de atrito era alterado, conforme a figura 52.

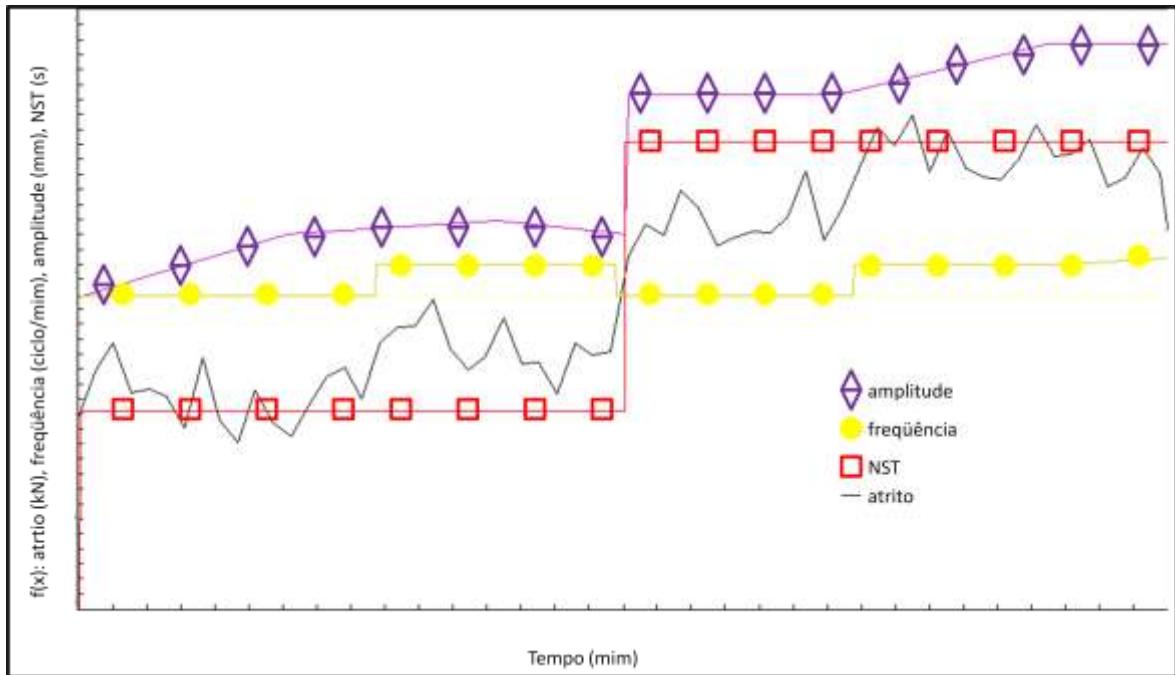


Figura 51. . Correlação entre Força de Atrito e variáveis de oscilação.

O atrito aumentava à medida que a taxa de estripamento negativo aumentava, em módulo. Pois conforme a literatura, a lubrificação é governada pela taxa de estripamento positivo, que neste caso decrescia, conforme figura 53.

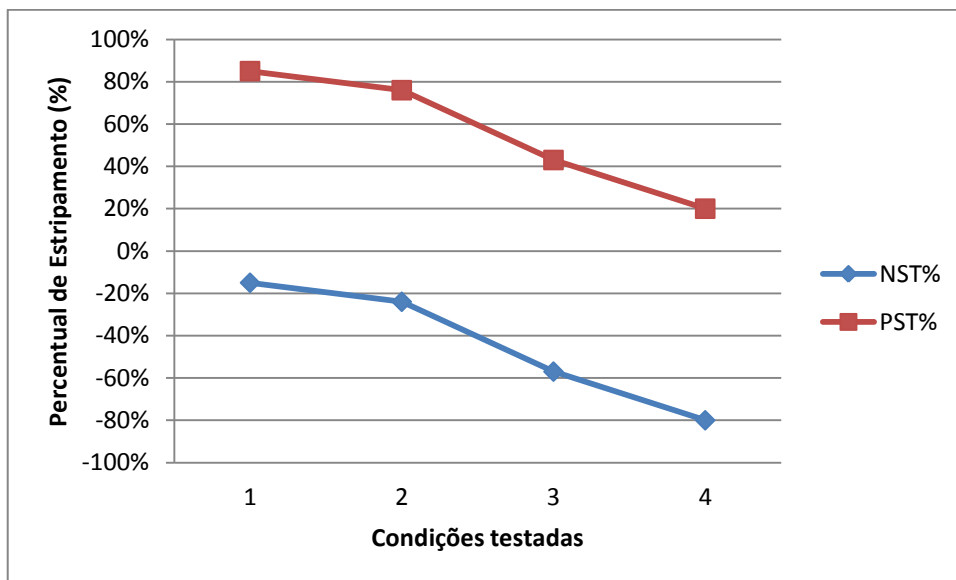


Figura 52. Gráfico da taxa de estripamento negativo e positivo, em percentual, em cada condição.



## Índice de Rejeição por Trincas Superficiais em Barra Laminada

O índice de rejeição por trincas superficiais em barras laminadas foi avaliado nas quatro condições. Verificou-se que as melhores condições superficiais condizem com a menor profundidade, uma vez que os melhores resultados apontaram para as condições de baixo NST e alta Frequência, conforme figura 54, 55 e 56.

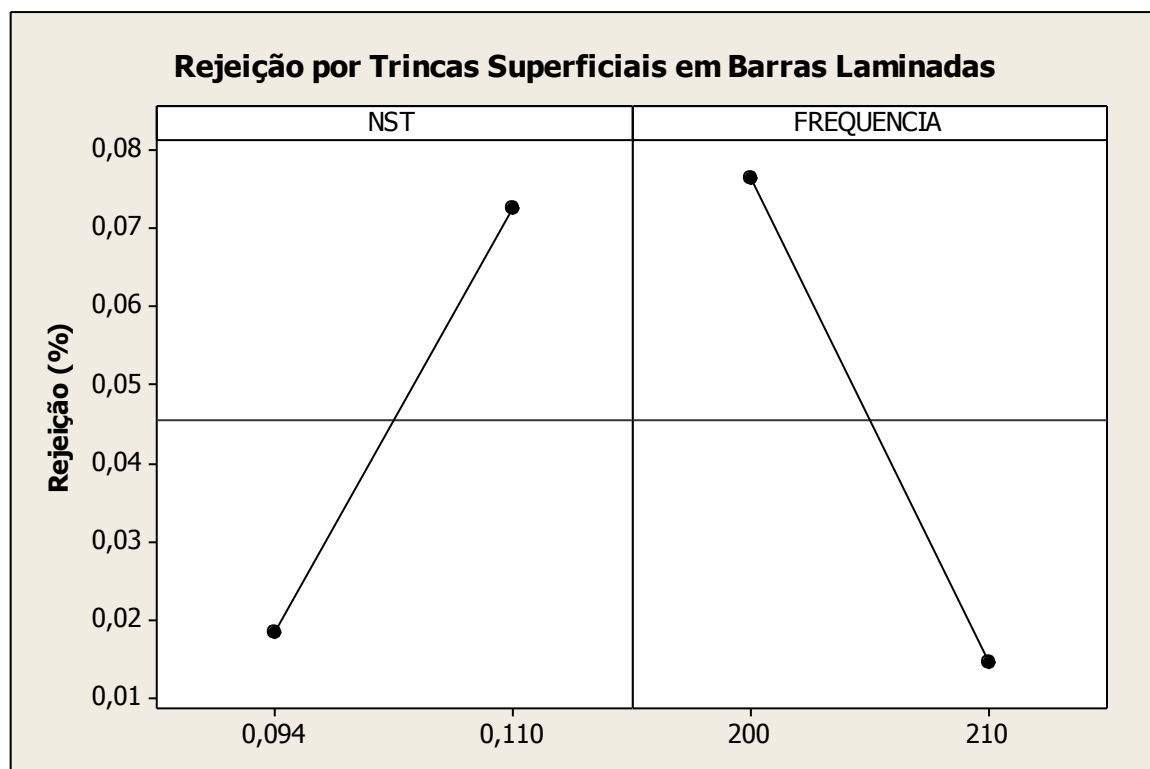


Figura 53. Influência do NST e Frequência de oscilação na rejeição por trincas superficiais.

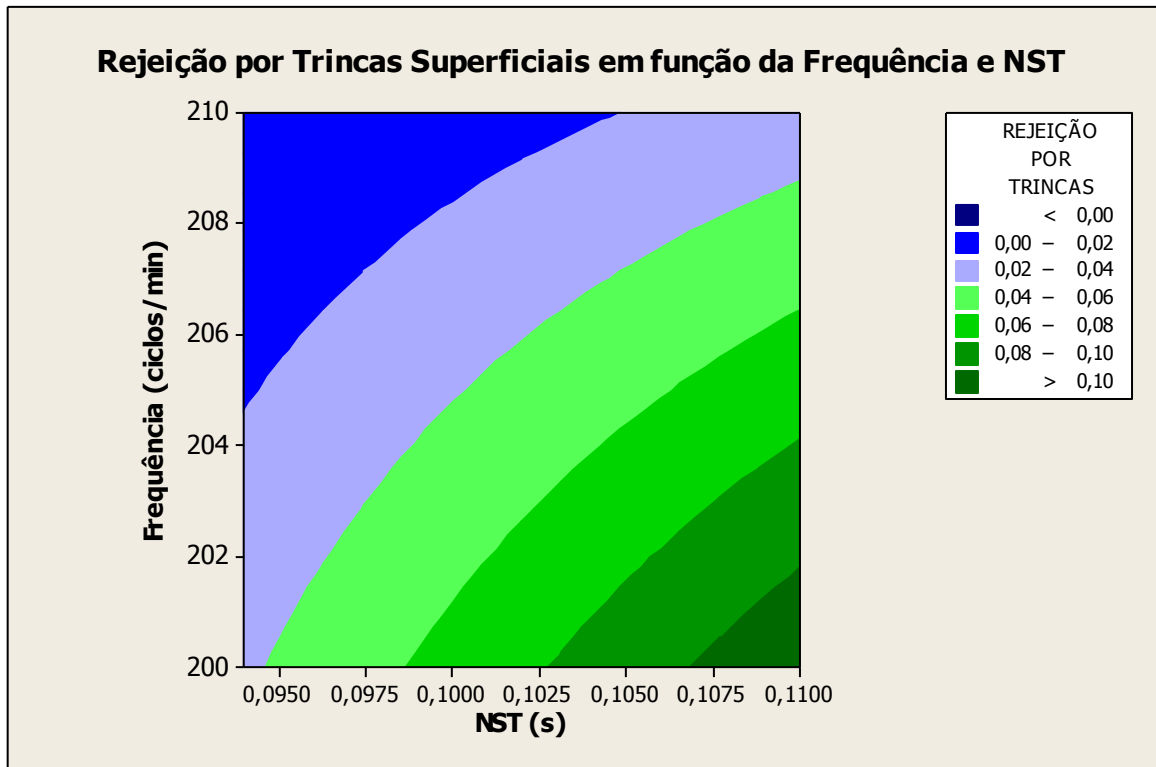


Figura 54. Rejeição em função da Frequencia e NST.

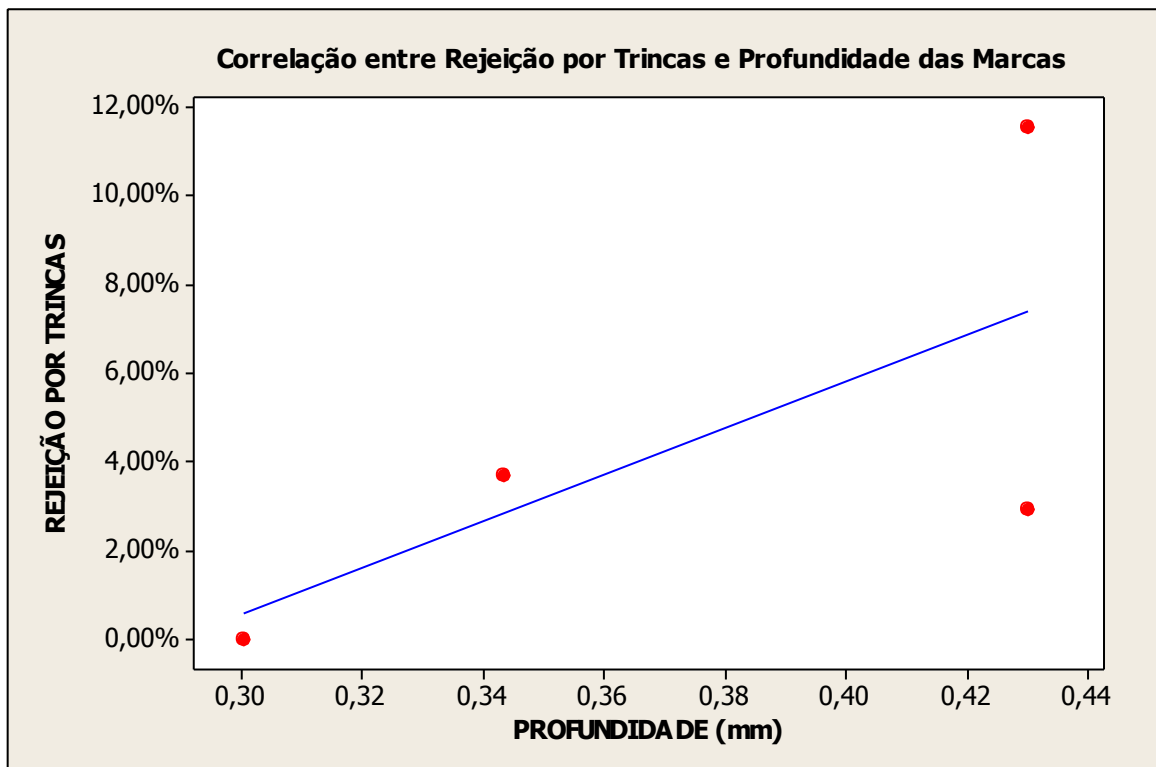


Figura 55. Correlação entre trincas superficiais e profundidade das marcas de oscilação.

## Caracterização da Microestrutura das Marcas de Oscilação

A característica intrínseca das marcas de oscilação em aço baixo carbono refere-se à presença de microestrutura sub-superficial conhecida por “hook”, ou gancho.

É indesejada no processo, pois pode aprisionar bolhas de gases e óxidos, transformando o entorno em uma região frágil.

Para as condições estudadas, foi possível detectar a presença de ganchos em poucas amostras. Essa dificuldade está associada ao teor de carbono do aço envolvido no teste – superior ao limite que a literatura demonstra como de fácil formação e revelação micrográfica.

Na figura 57 está evidenciada a presença do gancho na base da marca de oscilação. Nota-se no detalhe a presença da linha do gancho, microestrutura diferenciada, gases e óxidos aprisionados.

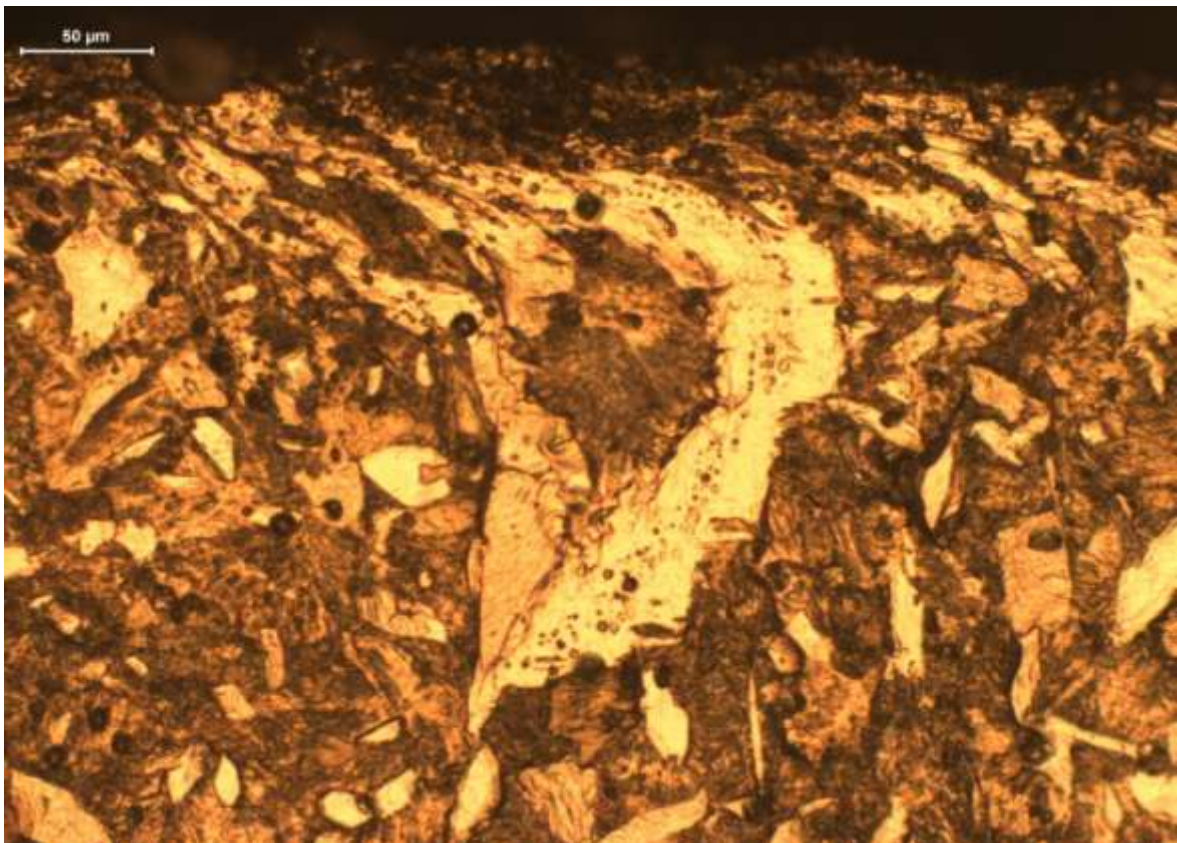


Figura 56. Imagem do gancho via microscopia ótica.

Analisando a microestrutura sub-superficial da marca, foi constatada a presença de inclusões endógenas e exógenas oriundas do processo de solidificação, conforme figuras 58, 59, 60 e 61.

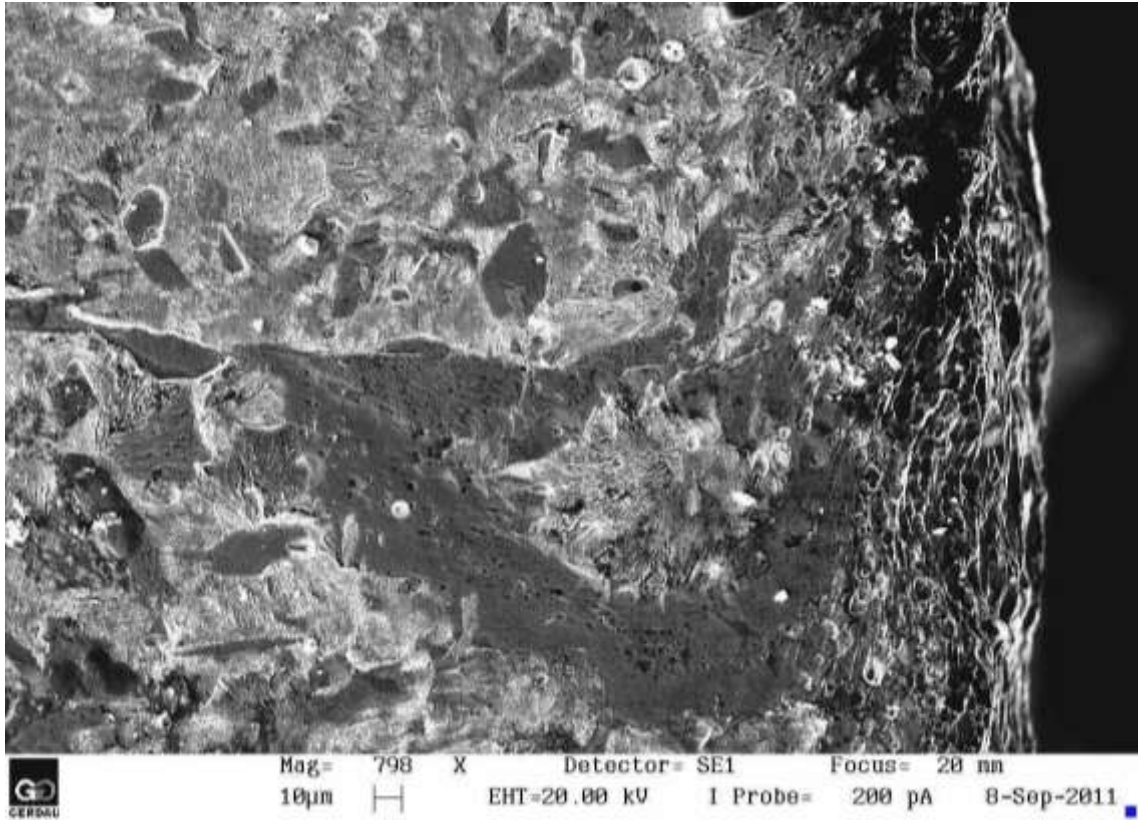


Figura 57. Imagem do gancho via MEV.

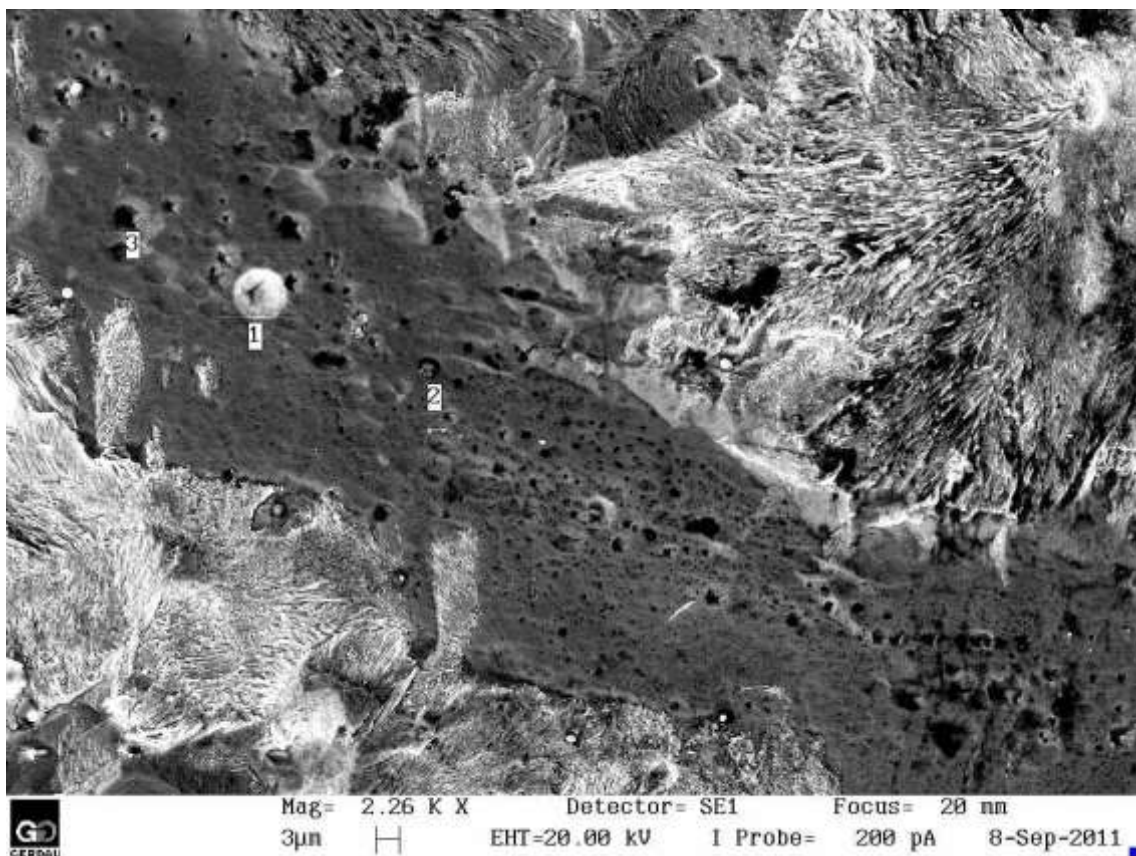


Figura 58. Micrografia eletrônica revelando a presença de óxidos segregados no gancho.

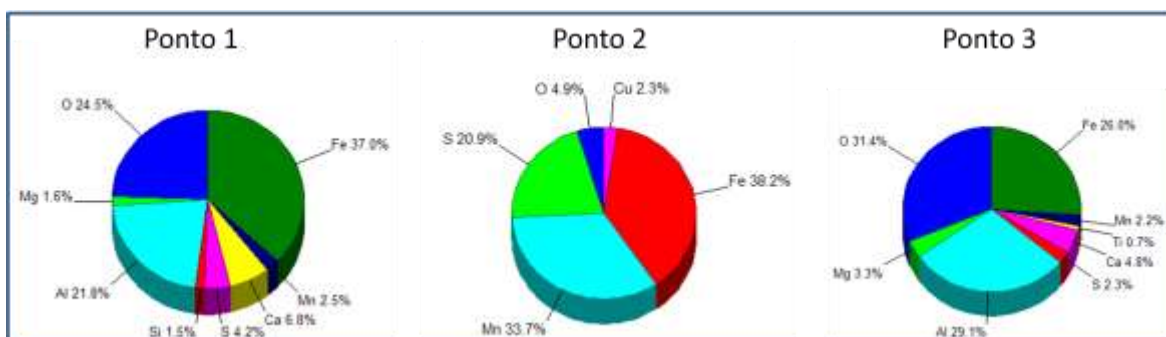


Figura 59. Composição química das inclusões dentro do gancho.

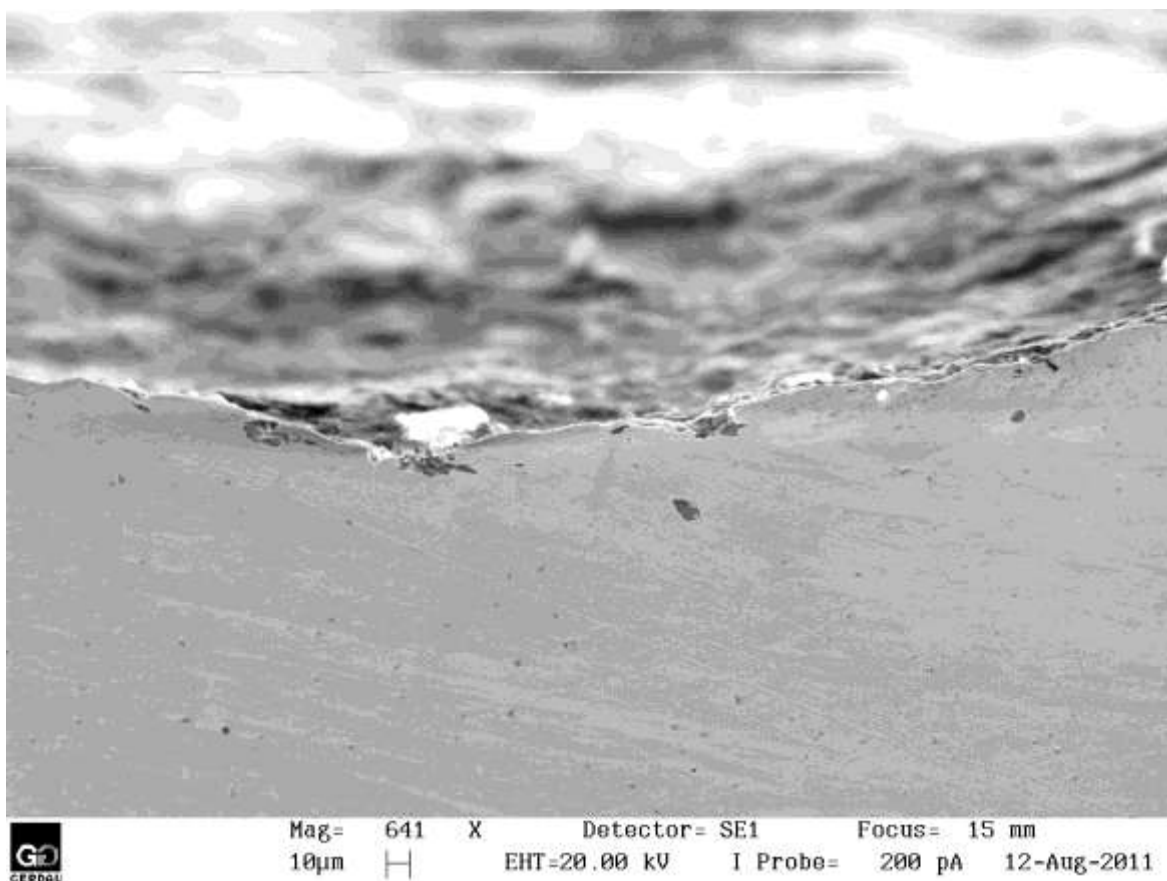


Figura 60. Micrografia eletrônica revelando a marca de oscilação.

Em outra amostra, foi encontrada a ponta de um gancho, que submergiu para dentro da piscina de aço líquido durante a solidificação, conforme a figura 62.

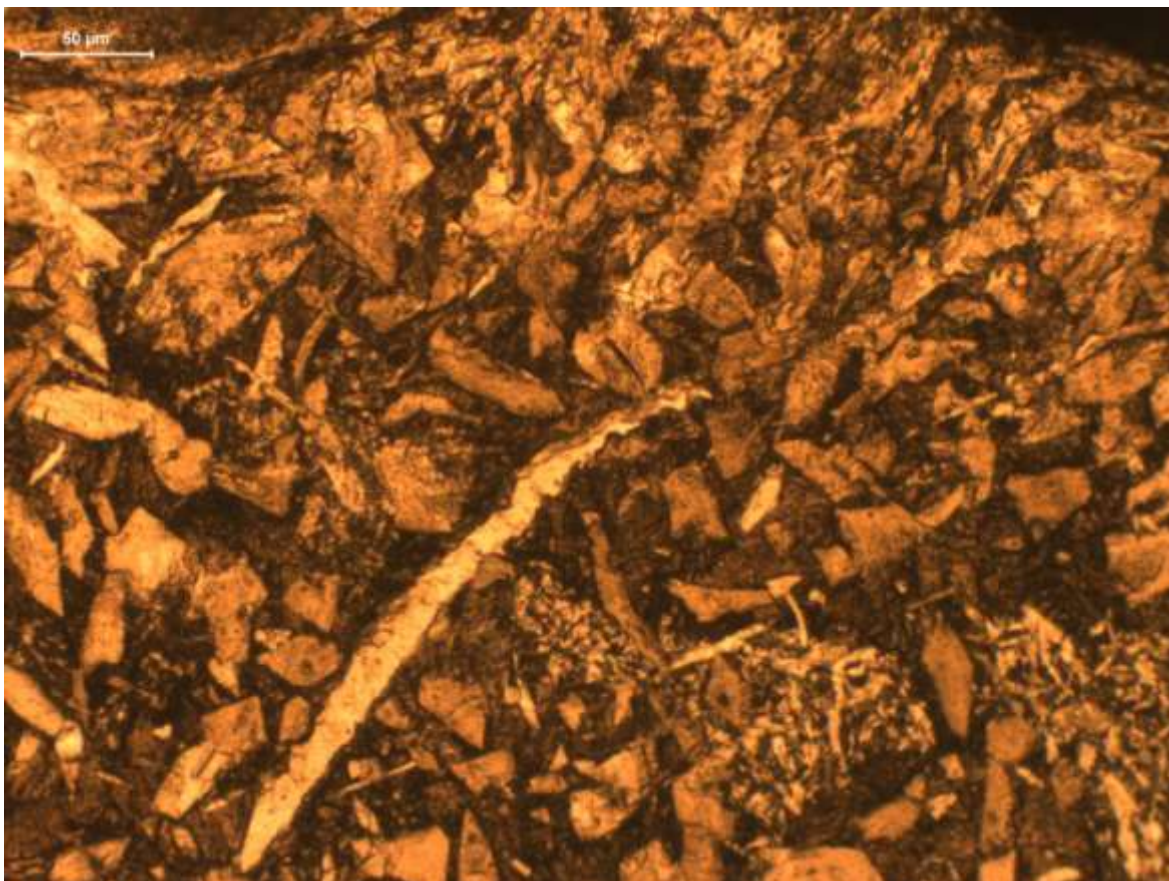


Figura 61. Ponta de um gancho sem contato com a superfície.

As considerações mais conclusivas acerca dos resultados estão a seguir:

Embora quem governe a formação de marcas e contração da pele solidificada é o tipo de aço, os parâmetros de oscilação, quando combinados, atuam fortemente no aspecto das marcas de oscilação.

Os tempos de estripamento negativo constante empregado nos testes foram menores do que citados pela literatura. A faixa utilizada foi de 0,094 a 0,110 segundos. A literatura sugere faixa de trabalho entre 0,110 a 0,180.

A profundidade encontrada variou entre 0,32 a 0,42 mm. Valores encontrados na literatura para estes tipos de aço, na qual foi fortemente influenciada pelo NST;

O atrito entre a pele solidificada e molde aumenta a medida que o NST e a amplitude aumentam.

## CONCLUSÕES

A partir do estudo realizado pode se chegar a resultados de relevância ao processo de lingotamento contínuo. O domínio dos parâmetros de oscilação proporcionou melhoria no desempenho dos aços frente a defeitos superficiais.

Máquinas mais modernas de lingotamento, que possibilitem trabalhar com tempo de estripamento negativo constante, podem trabalhar com velocidades variadas com a marca de oscilação constante.

Também foi evidenciado neste trabalho que valores de profundidade entre 0,3 e 0,4 mm podem ser obtidos através da alteração do NST e frequência, correlacionando menores valores de profundidade com menor profundidade de marca.

Foi encontrado e caracterizado a microestrutura sub-superficial das marcas de oscilação, revelando os ganchos, ou “hook”, os quais são danosos para o processo devido a presença de óxidos que fragilizam a microestrutura.

## TRABALHOS FUTUROS

Como este trabalho foi todo baseado em uma qualidade específica de aço – aços peritéticos, tornar-se-ia interessante avaliar em outros tipos de aços o comportamento das marcas frente a alterações de processo.

Outros fatores como influência dos pós de molde poderiam ser avaliados em relação à morfologia das marcas de oscilação, mantendo os parâmetros de oscilação constante.



## BIBLIOGRAFIA

1. Steel Year Book 2009, Worldsteel Association.
2. Steel Statistical Year Book 1998, International Iron and Steel Institute.
3. Elfsberg, Jessica. Oscillation Mark Formation in Continuous Casting Processes. 2003.
4. Irving, W.R. London. Continuous casting of steel. The Institute of Materials. 1993.
5. Garcia, A., Spim J.A., Santos, C.A., Cheung N. Lingotamento contínuo de aços. 2006.
6. <https://agora.cs.illinois.edu/display/cs519sp11/Lance+C.+Hibbeler+Project+Page>. [Online]
7. Mold Heat Transfer and Lubrication Control – Two Major Functions of Caster Productivity and Quality Assurance. Wolf, M. M. s.l. : Process Technology Conference Proceedings, Iron and Steel Society, 1995. 13 (1995): pp 99–117..
8. The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, PA. Continuous Casting of Steel Billets, Chapter 18. 2003.
9. Ramires-Lopes, P, et al. A Unified Mechanism for Oscillation Mark Formation. METEC. 2010.
10. Thomas., B. G. Basic Aspect of Mould. s.l. : Brimacombe Continuous Casting Course.2011.
11. I.V. Samarasekera, J.K. Brimacombe and R. Bommaraju. ISS Transactions,v 5, pp. 79-94. 1984
12. Szekeres, E. S. Overview of mold oscillation in continuous casting. 1996.
13. Halliday, I. M. D. Some features of Continuous Casting at Barrow. Journess Internationales de Siderurgie, Liege, Luxemburg, Charleroi et Bruxelles, June 18-28, 1958, pp 371-377. 1958.
14. THOMAS, B. G. XXVII Stellmaking Seminar – International Brazilian Association of Materials and Metallurgy. Porto Alegre, May 21st, 2006.
15. Nakajima, K., et al. Sumitomo Metals, pp. 6-18. 1993.
16. Elfsberg, J. Oscillation Marks Formation in Continuous Casting Processes. Royal Institute of Technology, Sweden. Apud Sato R., Steelmaking proceedings, Vol. 62, Detroit, Michigan, 25-28 Mar, PP 48-67. 1979.
17. Saucedo I.G., Beech J., Davies G. J. Conference on Solidification Technology in the foundry and cast house, Warwick, Coventry. 15-17 September 1980.
18. Takeuchi E., Brimacombe J.K. The Formation of Oscillation Marls in the Continuous Casting of Steel Slabs. Metalurgical Transactions B. Vols. Volume 15B.. PP. 493-509 September 1984.
19. Suzuki T., Miyata Y., Kunieda T., J. Japan Inst. Metals. Vol. 50, No.2. PP. 208-214. 1986.
20. Sengupta apud Sengupta J. Thomas B. G., Shin H.J., Kim S.H.,. Metall Mater Trans A,. 2005.

21. Go-Gi Lee, Brian G. Thomas, Seon-Hyo Kim, Ho-Jung Shin, Seung-Kwan Baek, Choon-Haeng Choi, Dong-Su Kim, Sung-Jong Yu. Microstructure near corners of continuous-cast steel slabs. 2007.
22. J. Sengupta, H.J. Shin, B.G. Thomas, S.H. Kim. Micrograph evidence of meniscus solidification and sub-surface microstructure evolution in continuous-cast ultralow-carbon steels. *Acta Materialia*. 2005.
23. Yamamura H, Mizucami Y, Misawa K,. *ISIJ Int (Suppl)*. 36: S223-6;. 1996.
24. Araki T., Ikeda M. Optimization of mold oscillation.1999.
25. J. M. Hill, Y. H. Wu, B. Wiwatanapataphee. *J. Eng. Math*. 36, 311. 1999.
26. Sen, L, Miao-Yong, Z and Cheng, J. The Effect of Solute Microsegregation on ZST and ZDT of Continuous Casting Steel. *METEC*. 2011.
27. Sun, Y, et al. Longitudinal Surface Cracks of Thin Slabs. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2010.
28. E. Takeuchi, J. K. Brimacombe. Effect of Oscillation-Mark Formation on the Surface Quality of Continuously Cast Steel Slabs. *Metalurgical Transactions B*, Volume 16B, PP 605-608. 1985.
29. Fernandes, apud Fu, J. Y. et Al. On the hot ductility of Continuously Cast Microalloyed Steels. In: 8th PTD Conference Proceeding, pp 43-49, 1988.
30. E. Takeuchi, J. K. Brimacombe. Effect of Oscillation-Mark Formation on the Surface Quality of Continuously Cast Steel Slabs. *Metalurgical Transactions B*, Volume 16B, PP 605-608 apud S. Tanaka, H. Misumi, H kibe, T Ohta, and S. Mizoguchi: T. 1985.
31. E. Takeuchi, J. K. Brimacombe.. Effect of Oscillation-Mark Formation on the Surface Quality of Continuously Cast Steel Slabs. *Metalurgical Transactions B*, Volume 16B, September 1985, PP 605-608 apud I. Saucedo, J. Beech, and G. J. Davis: *Proc 6th Intl. Vac*.
32. Carpenter, K.R. PhD Thesis, University of Wollongong. 2004.
33. Fernandes, P.F., apud Suzuki, H. G., Nishimura, S. and Yamaguchi, S. Characteristics of Hot Ductility in Steels Subjected to the Melting and Solidification. In: *Transactions ISIJ*, v. 22, 1982, p. 48-56.
34. Fox, K. C. Mills and A.B. *ISIJ Int*. 43, 2003.
35. Y. Meng, B.G. Thomas. *Metal Maters Trans. B*. 34B. 707, 2003.
36. T. Araki, M. Ikeda. *Can Metall Q.*, 38 295, 1999.
37. Fernandes, P. F. Otimização dos Parâmetros de Lingotamento Contínuo para minimizar a ocorrência de trincas superficiais no aço DIN 20MnCr5 Mod. *Dissertação de Mestrado - UFRGS*. 2005.

38. WOLF, M.M. Estimation of Crack Susceptibility for New Steel Grades. In: 1st European Conference on Continuous Casting, Florence, Italy, p. 2489-2499, 1991.
39. —. Mold Heat Flux and Lubrication Control – two major functions of caster productivity and quality assurance, In: Process Technology Conference Proceedings, v. 13, p. 99-117, 1995.
40. Lamp, T., et al. Optical Monitoring of Initial Solidification in a Billet Continuous Casting Mould. Metec. 2011.
41. DIETER, G.E. Mechanical Metallurgy, 2.ed., 1976.
42. Regone, W. Simulação da Laminação a Quente de um aço livre de intersticiais (IF) através do ensaios de torção. In: São Carlos, SP Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. 2001.
43. Silva, F. L. MELHORIA DA QUALIDADE SUPERFICIAL EM BARRAS LAMINADAS. 2010. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, UFRGS. 2010. .