



## REDUÇÃO DO ÍNDICE DE SUCATEAMENTO POR ROMBOIDADE NA ACIARIA DA VOTORANTIM SIDERURGIA – RESENDE – RJ<sup>1</sup>

Alencar Souza Santos<sup>2</sup>  
Bruno Veiga Fontana<sup>3</sup>  
Ely da Silva Araújo Júnior<sup>4</sup>  
Guilherme O. Nogueira dos Reis<sup>5</sup>  
Jadir Sebastião da Costa<sup>6</sup>  
Jonathan Nicholas da Silva Navarro<sup>7</sup>  
Wesley Raimundo Clemente<sup>8</sup>

### Resumo

No processo de produção de aços longos via lingotamento contínuo, um dos defeitos mais comuns que comprometem o índice de qualidade das aciarias é a romboidade. A romboidade é determinada pela diferença entre as diagonais da seção transversal do tarugo. É considerada severa se ultrapassar 6 mm a 9 mm. A romboidade pode gerar trincas de canto com ângulo obtuso ou trincas diagonais, além de comprometer as etapas seguintes do processo de produção do aço. Uma série de fatores pode originar a romboidade, entre elas o resfriamento não uniforme do molde (geometria do molde) e na câmara de sprays; vazão de água utilizada, pureza da água utilizada, relação Mn/S do aço, tempo de estripamento negativo, dentre outras. Aços que possuem composição de carbono próximo a composição peritética são os mais sensíveis a romboidade, pois, ao resfriarem, passam por uma transformação de fase de ferrita delta  $\delta$  para austenita  $\gamma$  que ocorrem na fase sólida e possui como consequência a contração do tarugo, isto é, a pele torna-se desigual e sua formação é mais lenta devido ao menor contato com a parede do molde. Neste trabalho foram investigadas as principais causas da geração de romboidade na aciaria da Votorantim Siderurgia – Resende - RJ e toda a tratativa deste defeito. Reduziu-se o índice de sucateamento por romboidade de 1.000 toneladas/mês para 180 toneladas/mês.

**Palavras-chave:** Lingotamento contínuo; Romboidade; Refrigeração; Qualidade.

### REDUCTION OF BILLET SCRAP INDEX DUE TO ROMBOIDITY AT VOTORANTIM SIDERURGIA – RESENDE, RJ MELTSHOP

### Abstract

In the continuous casting of long products, one of the most common defects found on billets is romboidity, which may greatly affect the quality and rejection indexes of meltshops. Romboidity is characterized by the difference between the diagonals on the cross section of the billet. In billet sections it can be considered severe when this difference reaches 6 to 9 mm ( ~ 2 to 3% ). This romboidity may generate off-corner cracks of different severity, diagonal cracks on the obtuse corner and furthermore, generate problems in the following process of steel rolling. A series of factors may lead to romboidity on billets, among them and mostly : uneven cooling in the mould ( mould geometry, etc ) and sprays zone ( 1st zones ); inadequate water flow volume in the mould; quality of mould and spray waters; Mn/S ratio in steel and NSt ( Negative Strip time ). Steel that has a carbon chemical range close to the peritetic reaction are the most sensible to romboidity since, during cooling, they go thru phase transformation from ferrite (delta  $\delta$ ) to austenite (gama  $\gamma$ ), i.e., in the solid phases generating as consequence a big localized billet contraction near the meniscus, losing contact with mould wall and therefore more prone to generating uneven and slow shell steady growth formation. In this study the main causes generating romboidity in medium carbon grades at Votorantim Siderurgia – Resende - RJ meltshop were investigated as well as all counter measures to reduce it. The billet scrap index due to romboidity was reduced from 1000 t/month to 180 t/month.

**Key words:** Billet continuous casting; Romboidity; Billet Cooling; Quality

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 43º Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2012, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Consultor de Lingotamento Contínuo; Votorantim Siderurgia – Resende.

<sup>3</sup> Graduando em Engenharia Metalúrgica; UFF – Volta Redonda.

<sup>4</sup> MSc, Engenheiro de Processo; Votorantim Siderurgia – Resende.

<sup>5</sup> MSc, Gerente de Tecnologia em Aciaria; Votorantim Siderurgia – Resende.

<sup>6</sup> Gerente de Aciaria; Votorantim Siderurgia – Resende.

<sup>7</sup> Engenheiro de Processo; Votorantim Siderurgia – Resende.

<sup>8</sup> Técnico Especialista em Lingotamento Contínuo; Votorantim Siderurgia – Resende.



## 1 INTRODUÇÃO

Desde a partida da operação da planta da Votorantim Siderurgia unidade Resende, RJ, a aciaria enfrentou grandes problemas de romboidade dos tarugos produzidos via lingotamento contínuo.

Romboidade é definido como um defeito de forma do tarugo lingotado continuamente onde sua secção quadrada sofre uma distorção na qual uma diagonal se apresenta maior que a outra (Figura 1).

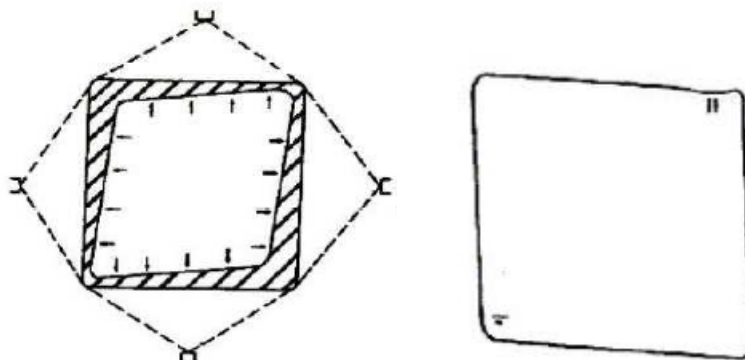


Figura 1. Descrição do defeito romboidade.<sup>(1)</sup>

Várias usinas consideram uma diferença de diagonal maior que 6 mm inaceitável pois pode causar problemas nos processos subsequentes de laminação, especialmente para graus de aço mais críticos, gerando deformações durante laminação (trincas, baixa utilidade etc). Além disto, romboidades excessivas podem gerar trincas ao longo destas diagonais e nos cantos dos tarugos.

Para as aplicações da VS-Resende os limites de aprovação foram estendidos para  $R_{max} = 12$  mm após testes de laminação. Entretanto, para alguns aços produzidos com médio teor de carbono (MTC), representando um alto % da produção, valores de 15 mm, 17 mm e até 21 mm de romboidade foram detectados.

A Figura 2 apresenta a evolução mensal de geração de sucata e o impacto em percentual da produção destes aços.

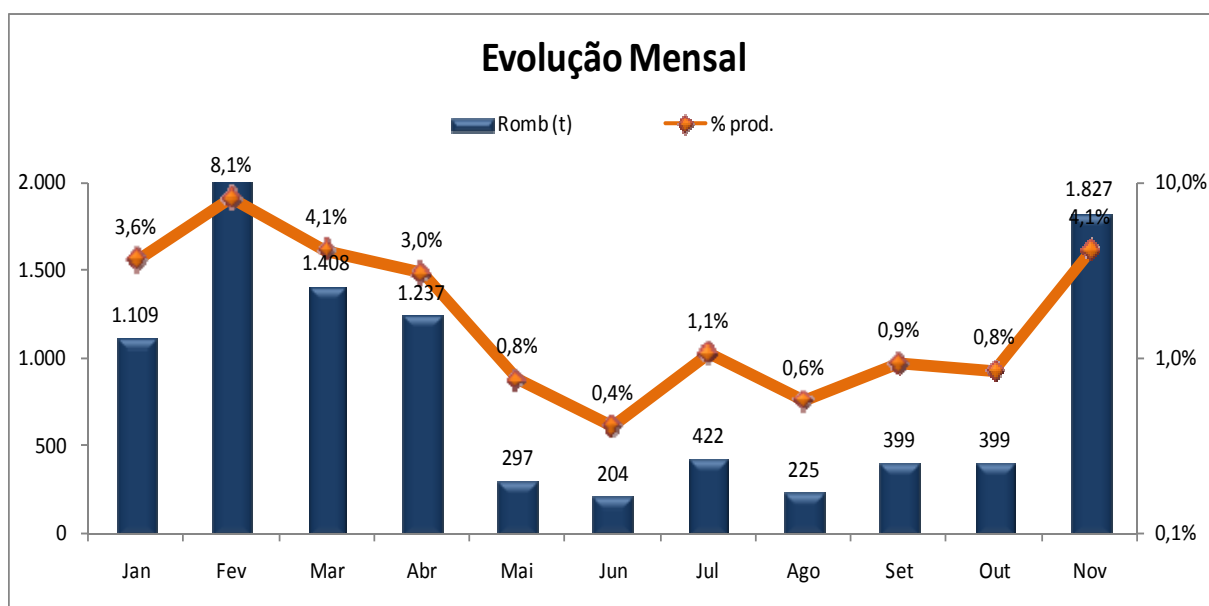


Figura 2. Evolução do percentual de geração de romboidade da aciaria de Resende em 2010.



## 2 OBJETIVO

Este trabalho visa investigar os efeitos de parâmetros operacionais e variáveis, que impactam na geração de romboidade assim como as tratativas para minimizar o impacto deste defeito.

## 3 ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA METALÚRGICA

Estudos anteriores realizados pelo Grupo de Lingotamento de Tarugos da UBC (University of British Columbia – Canadá) mostraram que especialmente para lingotamento contínuo de tarugos com jato aberto e óleo, a romboidade está associada principalmente a uma extração calórica não uniforme na região do menisco no molde, sendo a magnitude desta transferência e o % de carbono no aço também importante.

Kumar, Samarasekera e Brimacombe,<sup>(1)</sup> mostraram que o impacto da resfriamento não uniforme do tarugo é maior para aços com taxas de extração calórica razoavelmente alta e, ao mesmo tempo, com uma faixa de solidificação pequena, tais como aços médio carbono (C=0,25 a 0,40%), C= 0,32% para o caso estudado (Figura 3).

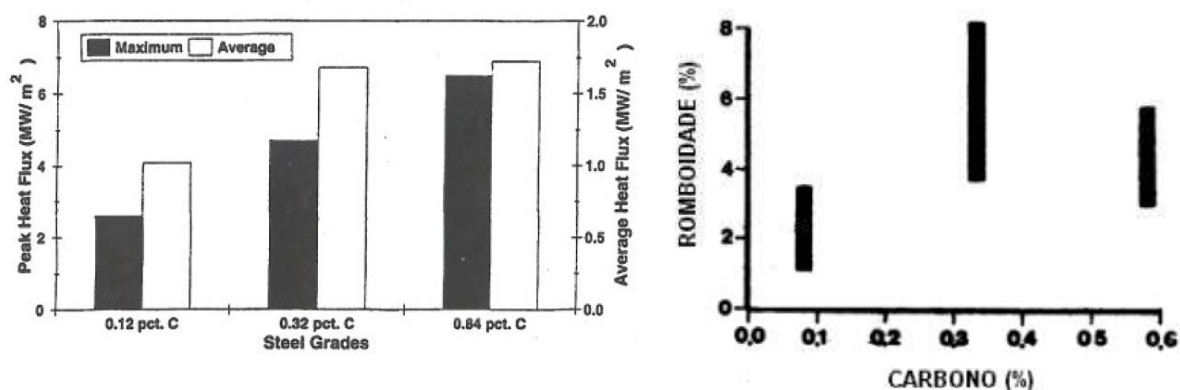


Figura 3. Impacto do resfriamento do tarugo x % de carbono no aço.<sup>(1)</sup>

Nestes casos (aços MTC), eles apresentam uma alta taxa de transferência de calor no menisco por não apresentarem uma pele rugosa originária da reação peritética (C = 0,12%). Por outro lado, possuem também uma faixa de solidificação pequena (distancia  $T_L - T_S$ ) de apenas 40°C ~ 50°C, enquanto que aços alto teor carbono (ATC), C = 0,70% por exemplo, possuem faixa de solidificação,  $T_L - T_S = 100^\circ\text{C}$  (Figura 4).

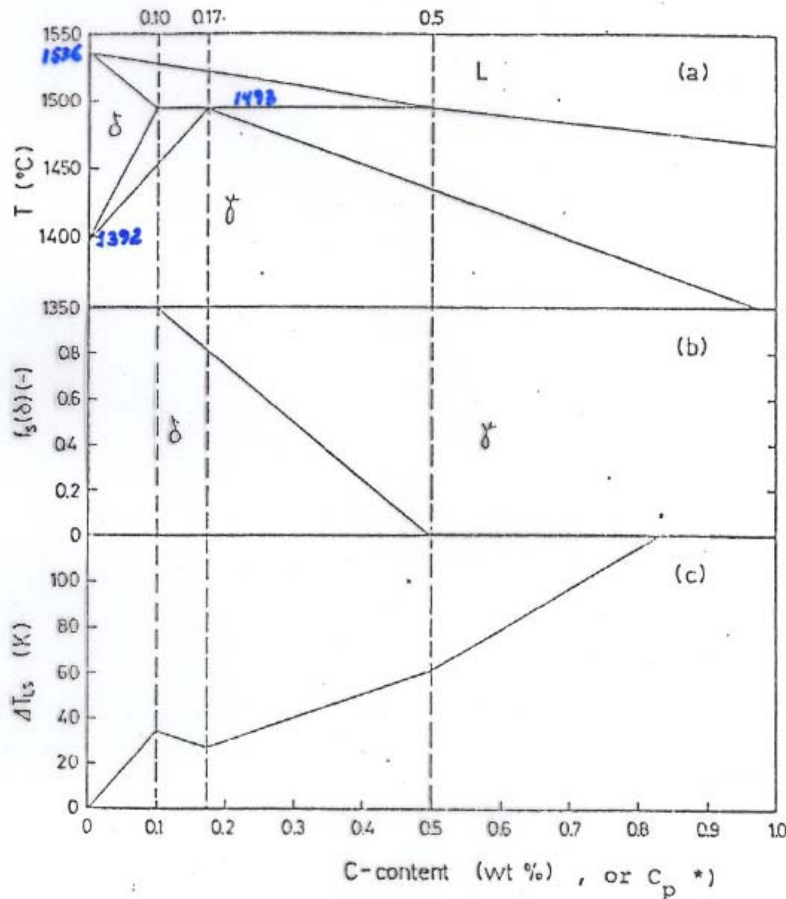


Figura 4. Diagrama Fe-C.<sup>(1)</sup>

Ou seja, os aços MTC solidificam-se rapidamente, contraindo e formando o chamado “gap de ar”, perdendo sustentação do molde e contato após curta distância do menisco.

Os aços que estão próximos a região de transformação de fase peritética também podem apresentar problemas de romboidade, mas neste caso devido à grande contração gerada pela mudança de fase  $\delta(\text{CCC}) \Rightarrow \gamma(\text{CFC})$ , especialmente para extração calórica não uniforme, gerando gaps de ar também não uniformes. Estes aços (C = 0,10%) apresentam grande contração “localizada”, mas menor contração “total” (menor espessura de pele) devido a maior maleabilidade da pele que sofre fácil efeito da pressão ferrostática, aproximando e afastando da parede do molde (pele rugosa).

A extração de calor não uniforme pode ser gerada por mau alinhamento das camisas d’água (gerando velocidades de passagem de água diferenciadas entre as faces do molde), má centragem do jato de aço no molde, má qualidade da água gerando depósitos na parede dos moldes (inibição de extração calórica, principalmente no menisco), bem como todos aqueles fatores favorecendo a geração do “gap de ar” entre pele em solidificação e molde.

Todos os fatores que favorecem um melhor contato do veio em solidificação com o molde, eliminando porções com existência de “gap de ar”, meio de maior resistência a uma boa transferência de calor, são classificados como de extrema importância para minimizar problemas de romboidade, principalmente em aços mais propensos a este defeito de forma (MTC e Peritéticos). A existência de gaps de ar aumenta à medida que o veio caminha dentro do molde e em direção aos cantos do tarugo em



formação, devido à maior contração do aço nestas posições. Portanto, uma conicidade adequada do molde de cobre acompanhando a contração do aço e minimizando a formação do “gap de ar” é também favorável ao controle da romboidade, bem como o controle da deformação do molde, principalmente no menisco, ponto de início de solidificação. Neste sentido Kumar, Samarasekera e Brimacombe,<sup>(1)</sup> recomendam a operação com “moldes frios”, ou seja, resfriados adequadamente de forma a garantir uma temperatura da face quente (interna) abaixo da temperatura de recristalização do cobre e conseqüente deformação na região do menisco. Este “molde frio” é obtido com velocidades de passagem de água na camisa entre 11 m/seg e 15 m/seg e temperaturas de entrada da água no molde de ~ 30°C. Velocidades de água maiores alteram o regime de fluxo de laminar para turbulento e conseqüente diminuição de retirada de calor (“molde quente”).<sup>(2)</sup>

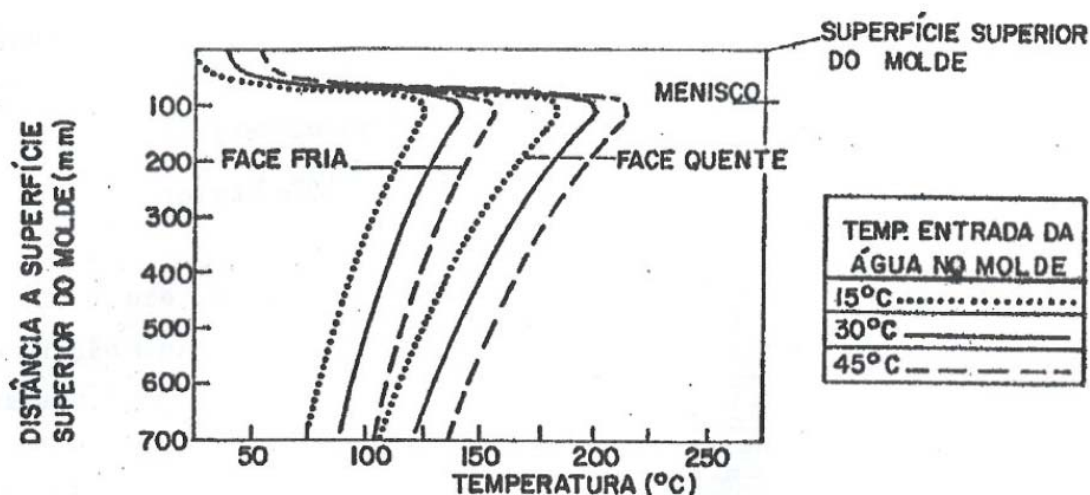


Figura 5. Impacto da temperatura da água na contração do aço lingotado.<sup>(1)</sup>

Apesar da grande influência da extração calórica no “molde”, a complementação da solidificação na zona secundária, principalmente nos 2 metros iniciais abaixo do molde também afeta a geração de uma forma romboidal no tarugo principalmente para resfriamento não uniforme entre as faces do tarugo pelos sprays (alinhamento, entupimentos etc.), levando a uma torção do tarugo. Para acelerar a solidificação dos aços que perdem contato com o molde, um maior resfriamento logo a saída do molde com sprays deve ser objetivada,<sup>(2)</sup> bem como uma sustentação da pele frágil e da sua forma por rolos de pé. No caso de espessuras de pele distintas na saída do molde, a refrigeração por *spray* (extração de calor direta) pode agravar a romboidade, portanto, mesmo *sprays* alinhados e uniformes podem aumentar a distorção de peles não uniformes geradas no molde.

Outros pontos são mencionados na literatura, um deles é que ao tornar a pele mais fina ou maleável na saída do molde (perda de sustentação da forma objetivada) favorecem a geração de romboidade e trincas subsuperficiais. Entre eles podemos citar um maior sobreaquecimento do aço ( $\Delta T$ ) e baixas relações Mn/S gerando líquido interdendrítico de FeS de baixo ponto de fusão durante solidificação.<sup>(3)</sup>

Portanto quanto mais fina for a pele sólida saindo do molde, maior também a possibilidade de deformação geradas pelas tensões térmicas e mecânicas durante a fase inicial de solidificação do tarugo. Entretanto, a uniformidade de espessura ao longo do perímetro é o fator preponderante, ou seja, uma pele mais fina e de espessura uniforme tem menor propensão a deformação de forma que uma pele



mais espessa, mas com variações de espessura significativas ao longo do perímetro do tarugo. Neste sentido, por exemplo, o M-EMS (Agitador eletromagnético no molde) que minimiza os gradientes de temperaturas no perímetro do molde e por conseguinte uma extração calórica mais uniforme, gera uma pele e estrutura sólida (equiaxial) que possibilita condições de operação mais adversas (temperatura de lingotamento maiores etc.) com menor tendências a geração de problemas de forma ou trincas (Figura 6).

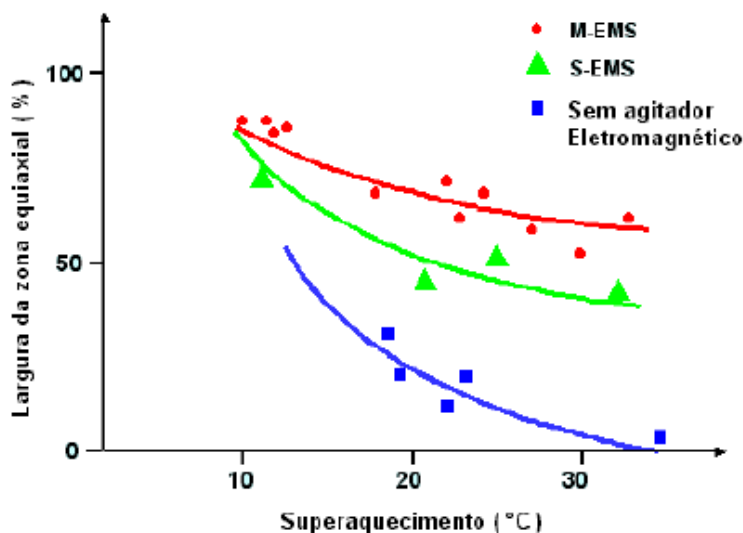


Figura 6. Efeito da utilização do agitador eletromagnético sobre a solidificação do tarugo lingotado.<sup>(2)</sup>

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Baseado nos estudos metalúrgicos acima mencionados, extraídos de diversas fontes bibliográficas, ações foram tomadas ao longo destes 2,5 anos visando minimizar os efeitos adversos das diferentes variáveis do processo na ocorrência do rejeito de tarugos por romboidade na VS- Resende.

### 4.1 Ajuste das Condições de Refrigeração de Projeto

Tanto para a 1ª zonas de resfriamento secundário (*sprays*), como para o resfriamento primário (molde) foram necessários ajustes ao projeto inicial, visando:

- reduzir o regime de fluxo da água do molde de turbulento para laminar, mantendo a prática de “molde frio”, mas passando a vazão de 2.200 l/min (conforme projeto) para 1.900 l/min.

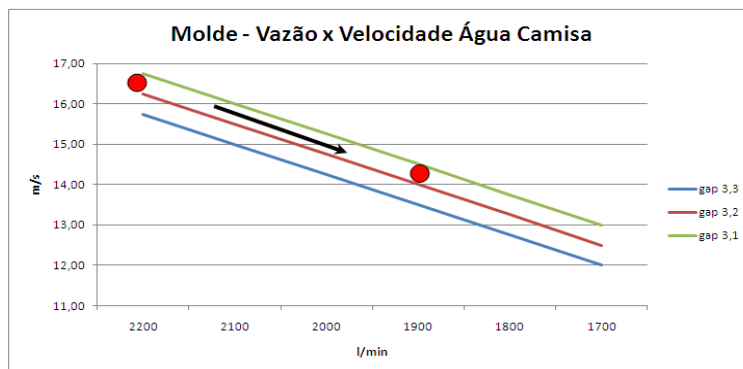


Figura 7. Vazão x velocidade de água da camisa.



- aumentar a extração calórica logo à saída do molde (anel + Zona II), aumentando a vazão de 1 l/kg para 1,7 l/kg e ajustando os bicos de *spray* de projeto para possibilitar distribuição de água na região dos anéis de 20% da água secundária para 25% da água secundária e com maior diâmetro de furo de passagem (menor entupimento).

Tabela 1. Dados comparativos entre o spray original e o novo spray.

	<b>Spray Original</b>	<b>Novo Spray</b>
Diâmetro passagem	1,4 mm	1,6 mm
Vazões (0,5 bar)	1,5 l/min	3,3 l/min
5 bar	4,8 l/min	9,4 l/min

## 4.2 Alteração da Composição Química

Alteração da composição química do principal grau de aço MTC com incidência de romboidade.

Levando-se em consideração as limitações de características físicas do produto final e do processo na laminação, optou-se por substituir o aço SAE 1027 pelo SAE 1030 para aumentar um pouco a faixa de solidificação do aço ( $T_L - T_S$ )

## 4.3 Melhoria na Qualidade da Água do Molde

Ajustes no tratamento da água do molde e revisão constante dos reservatórios para evitar depósitos nas camisas. As lingoteiras apresentavam depósitos bem pequenos devido à alta velocidade de água de passagem no “*gap d’água*” camisa/molde praticada (“molde frio”).



Figura 8. Molde de lingotamento contínuo.



## 4.4 Mudança da Conicidade do Molde

O molde fornecido junto com o projeto da MLC foi dimensionado para máxima produção do lingotamento contínuo, ou seja, velocidade mínima de 3 m/min e máxima de 3,5 m/min.

Entretanto, face ao menor ritmo do 1º ano após o *start-up* e de modo a permitir o seqüenciamento de corridas nesta situação, as velocidades praticadas estavam com velocidade mínima de 2,2 m/min e máxima de 2,7 m/min.

Portanto o molde com conicidade quádrupla demonstrado na Tabela 2 se mostrou inadequado para as velocidades praticadas e, portanto, para as contrações observadas, principalmente para os aços MTC. Neste sentido novos moldes foram adquiridos e testados, com conicidade parabólica de 2,84%/m a 0,51%/m, compatível com as recomendações da literatura. Este molde continua em operação atualmente, mesmo para velocidades máximas da ordem de 3,2 m/min (seção 150 mm x 150 mm) sem problemas.

Tabela 2. Conicidades ao longo do molde

Porção do Molde	Conicidades
0 mm – 240 mm	2,20%/m
240 mm – 440 mm	1,10%/m
440 mm – 640 mm	0,60%/m
640 mm – 1.000 mm	0,35%/m

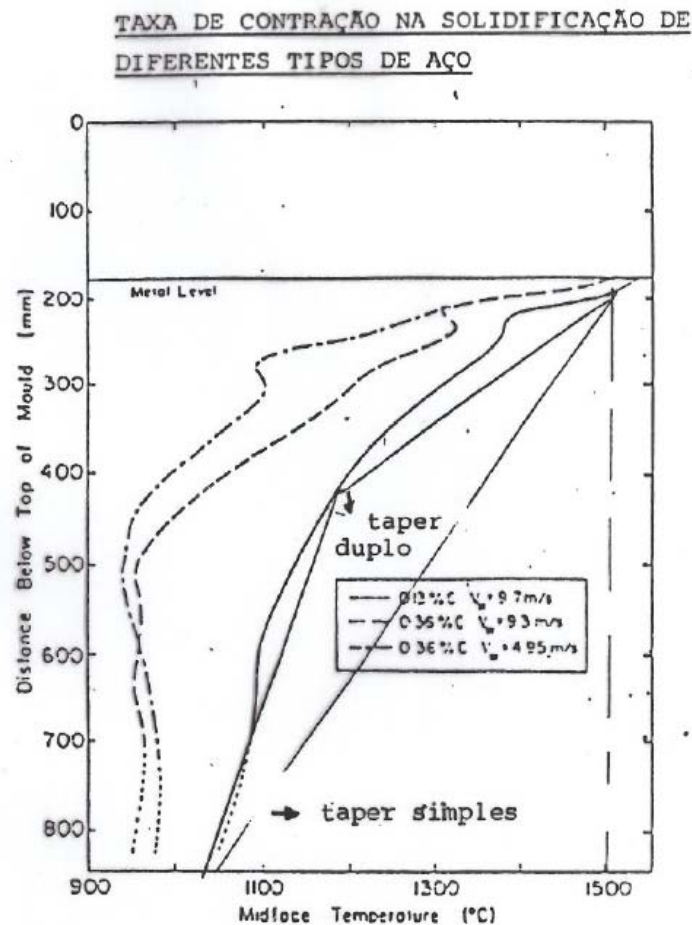


Figura 9. Taxa de contração da solidificação de diferentes tipos de aços.<sup>(4)</sup>





## 4.5 Menor Temperatura de Entrada da Água do Molde

Devido a entupimentos no trocador de calor, causados por resíduos de obra encontrados na tubulação, a vazão da água secundária sofria reduções por vezes de 12.000 l/min para até 6.000 l/min fazendo assim a temperatura da água de entrada no molde operar em determinados períodos com temperaturas superiores a 40°C, favorecendo assim a ocorrência de romboidade por maior temperatura da face quente do molde de cobre. O sistema de abertura e limpeza das placas do trocador de calor era difícil e demorado. Para solucionar este problema, a Manutenção da aciaria da VS – Resende desenvolveu um sistema de retro-lavagem do trocador que diminuiu muito a frequência de necessidade de abertura do sistema, beneficiando assim a minimização da romboidade.

## 4.6 Ajuste nos Padrões de Processo e Estabilidade de Operação

Em final de Março/2011 foram revisados os Padrões de Processo visando adequar ainda mais a operação nos seguintes parâmetros:

- temperaturas de saída do forno panela para diferentes condições operacionais (condições de panela, número de veios em operação, tempo de espera de panela etc.) foram ajustadas e também as temperaturas de lingotamento objetivando sobreaquecimento ( $\Delta T$ ) de 25 +/- 10°C. Com a implantação dos PP revisados e um melhor controle deste parâmetro, as temperaturas atingiram 90% da faixa especificada;
- implantação de melhorias nos processos de dessulfuração objetivando uma relação Mn/S > 30. Após a revisão dos PP as corridas passaram a apresentar 100% na faixa objetivada;
- de forma a manter o maior tempo de contato possível molde/veio, obtendo assim uma transferência de calor e espessura da pele mais uniforme, as velocidades de lingotamento foram ajustadas no processo do lingotamento contínuo de 2,4 m/min para 2,8 +/- 0,2 m/min, sendo que 99,5% estiveram dentro da faixa objetivada nos meses subseqüentes;
- devido a inexistência de um equipamento para medir a deformação dos moldes (*taper tracer*), foi definido operar estes aços com lingoteiras com limite de vida de 200 corridas. Estas lingoteiras são re-utilizadas em outros graus de aço até uma vida bem maior. Uma análise realizadas no mês de Junho mostrou que apenas 10% das peças foram lingotados em lingoteiras com mais de 200 corridas, devido a problemas diversos, entretanto, 36% da peças com romboidade acima do especificado foram lingotados nestas lingoteiras.

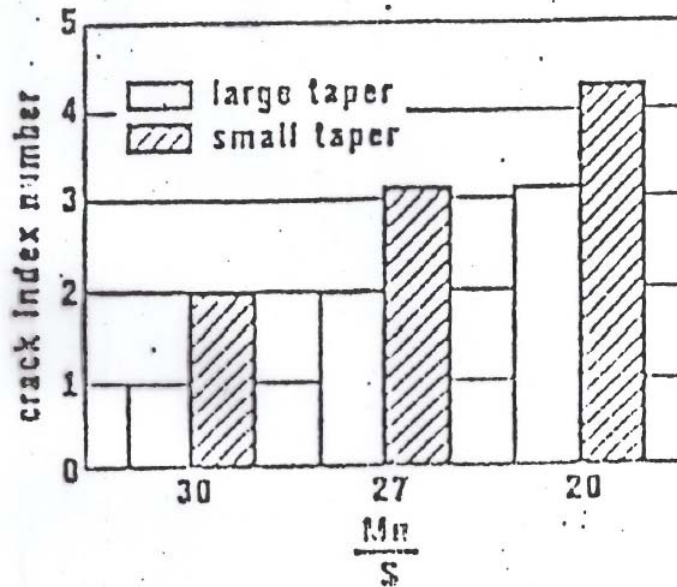


Figura 10. Influência da relação Mn/S no índice de trincas.<sup>(9)</sup>

## 4.7 Controle da Refrigeração Secundária

Para evitar que o trabalho árduo de controle da romboidade no molde e processos precedentes fosse prejudicado durante o resfriamento secundário, um controle rígido de verificação de alinhamento e obstrução de bicos foi implementado também em meados de 2011, nas paradas horosazonais precedentes as campanhas de aços com maior propensão a romboidade. Este trabalho apresentou resultados importantes, inclusive evidenciando a alta ocorrência de entupimento de bicos devido a qualidade da água utilizada em relação aos sólidos em suspensão. Neste sentido serão adicionados novos filtros ao sistema secundário, já adquiridos, mas até o momento não implantados.

Neste intervalo, um trabalho mais forte foi realizado na parte de tratamento de águas do sistema de resfriamento secundário da máquina pela equipe de utilidades da VS-Resende, tendo gerado uma evolução que já pôde ser observado no mês de novembro/11 na ocorrência de romboidade.

## 5 AÇÕES FUTURAS

As ações futuras para reduzir ainda mais este defeito de forma que aflige tantas aciarias, prevê o investimento em equipamentos como:

- filtros auto-limpantes para o sistema de água secundário;
- traçador de conicidade (*taper tracer*) para acompanhar o desgaste dos moldes;
- medidor online de romboidade;
- sistema de monitoração dos desvios de oscilação, que afetam não apenas defeitos de forma mas também ocorrências de trincas e perfurações de veios.



## 6 CONCLUSÕES

Para as condições investigadas, as seguintes conclusões puderam ser obtidas. Reduziu-se o índice de sucateamento por romboidade de 550 toneladas/mês para 50 toneladas/mês representando um ganho de rendimento metálico de 1,2%. Reduziu-se também o número de paradas da GAE em função de romboidade, ganhando em utilização, ritmo e produção e desta forma aumentou-se a vida dos distribuidores e lingoteiras garantindo uma maior estabilidade do processo.

## REFERÊNCIAS

- 1 KUMAR,S.; SAMARASEKERA,I.V.; BRIMACOMBE, J.K.; Mold Thermal Response and Formation of Defects in the Continuous Casting of Steel Billets, Part 2: Romboidity, **ISS Transactions**, p. 51 – 66, December 1998.
- 2 TACONI, L.L.; Análise Térmica do Molde de Lingotamento Contínuo de tarugos; **Dissertação de Mestrado Redemat**; p. 43 – 64; Maio 2007.
- 3 PENNA, L.V.; Trinca de solidificação “off-corner” no lingotamento contínuo de tarugos; **Dissertação de mestrado UFMG**; p. 33 – 41 & 87 – 90; Abril 2005.
- 4 LISBOA, R.S.M.; ASSUNÇÃO, A.L.; GONÇALVES, M.A.C.; SANTOS, V.C.; MARTINS, L.P.; TACONI, L.L.; Romboidade em Tarugos de Aço Médio Carbono de Lingotamento Contínuo; **XXXIII Seminário de Fusão Refino e Solidificação dos Metais**, p. 49 – 58; Maio 2002.
- 5 PINHEIRO, C.A.M.; Mould Thermal Response, Billet Surface Quality and Mould-Flux Behavior in the Continuous Casting of Steel Billets with Powder Lubrication, **PHD Thesis UBC**, p. 181 – 203, December 1997