

REDUÇÃO NA VARIAÇÃO DE NÍVEL DE AÇO NO MOLDE EM PLACAS DE AÇOS HSLA PERITÉTICOS PRODUZIDOS PARA A LAMINAÇÃO DE BOBINAS A QUENTE CONFORME NORMA ASTM A588-B*

Alisson Paulo de Oliveira¹

Edson Hugo Ross²

Jorge Adam Cleto Cohn³

Cleiton Arlindo Martins⁴

Carlos Vinícius Domingos de Carvalho⁵

Carlos José Carneiro Filho⁶

Resumo

Incentivado pela diversificação dos produtos em aço, a demanda por graus cuja composição química esteja próxima da faixa peritética, tais como os aços HSLA (*High Strength Low Alloy*) e AHSS (*Advanced High Strength Steel*), tem aumentado. As crescentes exigências nas propriedades mecânicas e a redução de custo nas ligas são as razões para que esses aços sejam projetados próximos à faixa peritética, com o teor de carbono entre 0,09 e 0,16%. A produção de placas do aço ASTM A588-B, com o teor de carbono visado igual a 0,10%, apresentava expressiva variação do Nível de Aço no Molde (Ou **Mould Level Fluctuation, MLF**), aumentando a probabilidade de ocorrência de “*Break-Out*” (Rompimento de Pele) e a redução da qualidade de superfície das placas, com eventual ocorrência de Trincas Longitudinais. Outra limitação é a impossibilidade de troca de largura das placas, dependente da estabilidade do processo de Lingotamento Contínuo. Serão discutidas as ações tomadas visando a redução do MLF, baseada em alterações no Projeto de Liga, a comparação entre variáveis-chave do processo de Lingotamento Contínuo de Placas em dois cenários de Projeto de Liga além dos impactos em características de Propriedades Mecânicas do produto laminado, no caso bobinas processadas em Laminador Steckel.

Palavras-chave: Reação Peritética; Transformação Peritética; Lingotamento Contínuo de Placas; Variação de Nível de Aço no Molde.

MOULD LEVEL FLUCTUATION REDUCTION ON PERICTETIC HSLA STEEL SLABS PRODUCED FOR THE HOT ROLLED COIL MILL ACCORDING TO ASTM A588-B STANDARDS

Abstract

Encouraged by the diversification of the steel products, the demand for the grades whose chemical composition is close to the Perictetic Region, as for example the HSLA (High Strength Low Alloy) and AHSS (Advanced High Strength Steel) Steels are growing. The always increasing demands on the Mechanical Properties and the reduction of alloying costs are the main reasons for the chemical composition to be near the Perictetic Region, with the Carbon content between 0,09% and 0,16%. The production of Continuously Cast Slabs, Steel Grade ASTM A588-B, with the Carbon content equal to 0,10%, shown expressive Mould Level Fluctuation, MLF, increasing the probability of occurrence of Break-Outs and the reduction of slab's surface quality. Longitudinal Cracks can occur with this scenario. Another problem is the impossibility to change the width of the slabs, a process that is highly dependent on

* Contribuição técnica ao 48° Seminário de Aciaria, Fundição e Metalurgia de Não-Ferrosos, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 06 de outubro de 2017, São Paulo, SP, Brasil.

the process stability. This paper will discuss the actions performed with the objective to reduce the MLF based in some changing of the Alloy Design, the comparison between Slab Continuous Casting Key Process Variables in two different scenarios of Steel Grades and the impact on alloying cost and the Mechanical Properties of Hot Rolled Coils from a Steckel Mill.

Keywords: *Peritectic Reaction; Peritectic Transformation; Slab Continuous Casting; Mould Level Fluctuation.*

- ¹ *Engenheiro Metalurgista, Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Assessor Técnico de Pesquisa e Desenvolvimento da Laminação de Tiras a Quente, Gerdau Aços Brasil, Ouro Branco-MG, Brasil;*
- ² *Engenheiro Metalurgista, Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Consultor Técnico de Pesquisa e Desenvolvimento da Laminação de Tiras a Quente, Gerdau Aços Brasil, Ouro Branco-MG, Brasil*
- ³ *Engenheiro Metalurgista, Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Consultor Técnico de Pesquisa e Desenvolvimento da Laminação de Tiras a Quente, Gerdau Aços Brasil, Ouro Branco-MG, Brasil*
- ⁴ *Engenheiro Metalurgista, Mestre em Engenharia Mecânica, Assessor Técnico de Pesquisa e Desenvolvimento da Laminação de Tiras a Quente, Gerdau Aços Brasil, Ouro Branco-MG, Brasil;*
- ⁵ *Engenheiro Metalurgista, Mestre em Engenharia de Materiais, Assessor Técnico de Lingotamentos Contínuos, Gerdau Aços Brasil, Ouro Branco-MG, Brasil;*
- ⁶ *Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Gerente de Pesquisa e Desenvolvimento da Laminação de Bobinas a Quente, Gerdau Aços Brasil, Ouro Branco-MG, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O Lingotamento Contínuo tem como principal função a solidificação de produtos semi-acabados para processamento posterior visando uma ampla gama de aplicações finais. Dentre esses produtos lingotados podemos citar as Placas, Tarugos, Blocos e *Beam Blanks*. Uma variável crítica de processo de lingotamento é a variação, ou flutuação, de nível de aço no molde (***Mould Level Fluctuation, MLF***). Esta variável indica o quão estável operacionalmente é o processo de Lingotamento Contínuo. Recomenda-se que sua amplitude seja sempre inferior a 10mm¹. Tanto a estabilidade operacional quanto a qualidade de superfície dos produtos lingotados são fortemente influenciados pelos fenômenos que ocorrem durante os estágios iniciais da solidificação, na região do menisco no molde. Diante desse cenário, os aços peritéticos são aqueles que exibem os maiores desafios para a estabilidade do processo de lingotamento, uma vez que apresentam teor de carbono entre 0,09 e 0,16%, faixa essa típica da Reação/Transformação Peritética. Esta instabilidade de processos, representada pelo MLF, pode ocasionar:

- ✓ Trincas de superfície das placas de Lingotamento Contínuo²: Trata-se de um problema particularmente grave e que de certa forma permanece no produto laminado. É possível recuperar a superfície da placa através de processos de escarfagem ou mesmo descarte da região afetada, mas são operações que reduzem a produtividade e o rendimento metálico além de apresentar alto custo;
- ✓ Aumento significativo do risco de “*Break-Out*”, ou rompimento de veio, devido à contração de volume associado com a Reação/Transformação peritética a qual resulta na formação do *gap*, ou descolamento da pele em relação à parede do molde, e disso decorre um decréscimo no fluxo de calor, levando a ocorrência dos pontos quentes (“*Hot Spots*”);
- ✓ Impossibilidade de alterar o *set-up* de largura das placas durante o Lingotamento.

Além de determinadas características de Composição Química, inerentes aos Aços Peritéticos, temos mais algumas variáveis do processo de Lingotamento Contínuo que impactam no MLF^{3,4}: Fluxo de argônio no molde, *Pick-Up* de nitrogênio, *clogging* na válvula submersa, operação imprópria, problemas no resfriamento secundário, menor tempo de residência, problema no mecanismo do tampão, elevado volume de escória de panela no distribuidor, operação com baixo nível de aço no distribuidor, abaulamento (Ou *Bulging*) da pele entre rolos, deformação e vibração no *Bender*, e pressão hidráulica instável.

O foco desse trabalho será relativo à influência da Composição Química no MLF, em especial o impacto da contração volumétrica devido à Reação Peritética e a Transformação Peritética. Será investigado também o comportamento do MLF frente aos processos de Resfriamento Primário e Secundário.

O aço Peritético se caracteriza por apresentar as seguintes reações e transformações:

- ✓ Reação Peritética (Ferrita-Delta + Líquido → Austenita);
- ✓ Transformação de fase peritética:
 - Ferrita-Delta → Austenita;
 - Líquido → Austenita.

A reação peritética ocorre sob condições onde se caracteriza a coexistência das três fases (Líquido, Ferrita-Delta e Austenita), e as fases Líquido e Ferrita-Delta reagem para formar a Austenita.

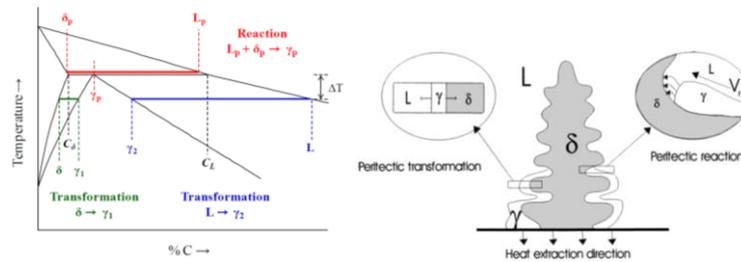


Figura 1. A Reação e a Transformação Peritética. [5]

A Transformação Peritética implica em contração de volume devido à mudança no Sistema Cristalino do Reticulado Atômico: De Ferrita-Delta, Cúbica de Corpo Centrado (CCC) para Austenita, Cúbica de Face Centrada (CFC). A Ferrita-Delta apresenta volume molar entre 2,50 e 3,00% superior à Austenita. Dessa forma uma importante contração de volume acompanha a Transformação Peritética.

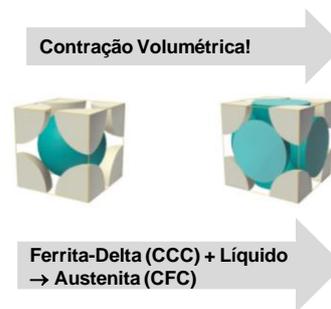


Figura 2. Mudança do Sistema Cristalino associado à Transformação Peritética.

Assim sendo esses aços mostram tendência à formação mais acentuada, se comparados aos aços com baixo e alto teor de carbono, de um *gap*, ou espaçamento, entre a pele solidificada e a parede do molde, na Zona de Resfriamento Primário, conforme ilustrado abaixo:

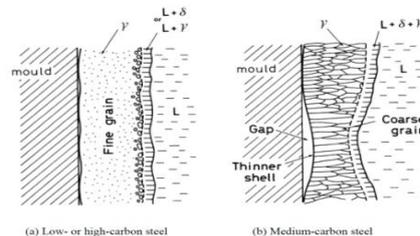


Figura 3. O *gap* (ou espaçamento) entre a pele solidificada e a parede do molde. [6]

A seqüência de eventos devidos à Reação e Transformação Peritética que induzem a formação do *gap* e, por conseqüência, o MLF é a seguinte:

- ✓ Próximo ao menisco o aço é rapidamente resfriado de modo que a transformação Ferrita-Delta → Austenita ocorra na superfície. A contração volumétrica resultante da Transformação Peritética induz o *gap*;
- ✓ O *gap* causa uma descontinuidade devido à redução da transferência de calor na interface aço/molde, a qual leva ao reaquecimento da camada solidificada e provoca perda de resistência mecânica;
- ✓ A pressão ferrostática exercida pelo aço líquido acima do molde tende a empurrar o sólido novamente contra a parede do molde;
- ✓ A deformação do sólido gera uma descontinuidade na superfície;
- ✓ Na interface entre o sólido e a parede do molde observa-se nas regiões onde o fluxo do calor é reduzido pela formação do *gap*, menor espessura da pele solidificada, a qual apresenta aparência irregular, ou heterogênea.

É importante frisar que, no limite, essa seqüência de acontecimentos leva à ocorrência de “*Break-Out*” e trincas de superfície.

No gráfico abaixo é mostrado o MLF, série temporal, para o aço peritético em questão. Percebe-se comportamento anômalo do nível do molde, com flutuações periódicas e frequentes. Os dados são referentes a placas de meio de seqüência.

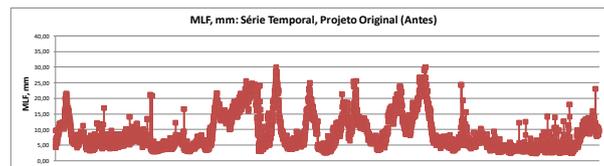


Figura 4. Seqüência Temporal do MLF. Cada ponto no gráfico equivale a 50cm no comprimento da placa lingotada.

Após tratamento estatístico dos dados temos:

Aço	Faixa de Larguras, mm	Veio	Média de MLF, mm	Desvio Padrão de MLF, mm	n corridas
Projeto Original	<1.600mm Total		7,73	4,94	47
	≥1.600mm Total		11,17	5,93	22
	Total geral		8,77	5,49	69

Tabela 1. MLF, Média e Desvio Padrão, para o Projeto de Liga Original, por faixa de larguras.

Pesquisas relacionadas às características de crescimento e deformação termal livre da pele inicialmente solidificada através de testes de imersão revelaram que a uniformidade da espessura desta está intimamente relacionada ao teor de carbono do aço. A camada, ou pele, solidificada heterogênea é um fator importante que contribui para o abaulamento instável, o qual causa o MLF⁷.

Exceto pelas causas de processo de Lingotamento Contínuo citadas anteriormente a mudança de volume devido ao abaulamento instável na zona de Resfriamento Primário, causado pela heterogeneidade da pele, é a maior causa controlável do MLF.

Outra causa importante do MLF é o abaulamento entre rolos, já na zona de Resfriamento Secundário. Para o veio, a partir da saída do molde, há um aumento na pressão ferrostática na pele devido ao intervalo entre os rolos de suporte. A

resistência à deformação por abaulamento é determinada, principalmente, pela temperatura de superfície local, ou intensidade de Resfriamento Secundário.

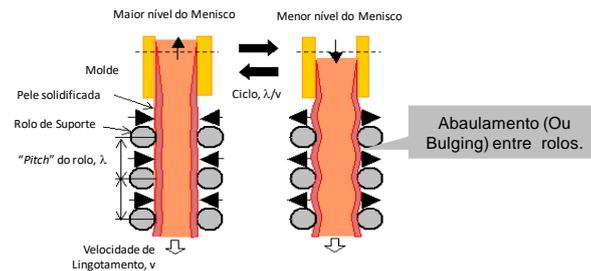


Figura 5. Abaulamento entre rolos. [8]

Recentemente¹ foi desenvolvido um método de cálculo da faixa peritética para os aços com a consideração da contribuição total do carbono e outros elementos em solução, o qual foi adotado com sucesso para a seleção de fluxantes, para a obtenção de resfriamento e crescimento de pele uniforme para dados graus de aço. Pequenos ajustes na composição química dentro dos limites requeridos para o respectivo grau de aço provou-se uma efetiva maneira de modificar a criticidade do processo de lingotamento, o qual foi utilizado para alterar a solidificação e a proporção relativa de Austenita (γ) e Ferrita (δ) e assim melhorar o crescimento desigual da pele inicialmente solidificada.

O C_C , ou teor de carbono no ponto peritético, vide figura 6, pode ser calculado¹, levando em consideração o efeito dos elementos de liga, como abaixo, onde w representa o teor em peso do elemento químico em questão, representado por colchetes:

$$1. C_C = 0.1967 + 0.0036w[Al] - 0.0316w[Mn] - 0.0103w[Si] + 0.1411w[Al]^2 + 0.05w[Al] \cdot w[Si] - 0.0401w[Ni] + 0.03255w[Mo] + 0.0603w[V] + 0.0024w[Cr] + 0.00142w[Cr]^2 - 0.00059w[Cr] \cdot w[Ni] + 0.0266w[W].$$

A heterogeneidade da pele inicialmente solidificada depende principalmente da quantidade de contração durante a solidificação e da posterior transformação de fase sólida. Conforme a Regra da Alavanca a relação de fases de Ferrita-Delta para Líquido, por massa, é reduzida com menores valores de $C_C - w[C]$, o que pode reduzir a taxa de contração durante a transformação de fases, Ferrita-Delta \rightarrow Austenita, e conseqüentemente a heterogeneidade da pele inicialmente solidificada.

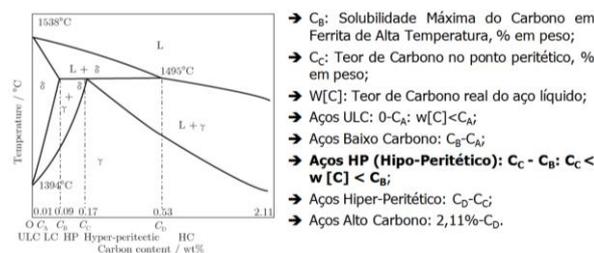


Figura 6. Diagrama Fe-C: Aços HP, Hipo-Peritéticos, com %C entre 0,09 e 0,17%. [1]

De acordo com a Regra da Alavanca, $w\delta/wL$ é reduzido com menores valores de $C_C - w[C]$, implicando na redução de MLF. Portanto, quando o teor real de carbono do

aço Hipo-Peritético está próximo ao ponto peritético calculado (C_c), o abaulamento instável relatado, e associado a ele o MLF, é reduzido devido à menor heterogeneidade da pele inicialmente solidificada.

Outros elementos de liga comuns aos aços podem também alterar a reação peritética do aço em diferentes extensões, levando a diferentes comportamentos de solidificação e contração.

Para os aços HP, com $C_B < w[C] < C_c$, o valor de $C_c - w[C]$ deve ser mínimo dentro dos limites de composição química. Conforme a equação 1, o $w[C]$ e o $w[Mn]$ devem ser posicionados nos valores máximos, enquanto $w[Mo]$, $w[V]$ e $w[W]$ devem ser posicionados no valor mínimo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As principais alterações realizadas foram o aumento do teor de **Carbono** (De 0,10% para 0,13%), a redução do teor de **Manganês** (De 0,97% para 0,80%, para garantia de Propriedades Mecânicas) e revisões pontuais nos teores de **Cromo**, **Vanádio**, **Nióbio** e **Cobre**. Tais revisões visaram a manutenção do Índice de Corrosão, uma vez que a resistência a esse fenômeno é uma das principais exigências para o aço patinável, conforme especificação ASTM A588-B, e também a Soldabilidade. O novo Projeto de Liga apresentou redução de custo de produção do Aço Líquido.

Calculando-se $C_c - w[C]$ conforme a equação 1 acima, lembrando que $w[C]$ é o teor de carbono real do aço líquido (Amostra de Distribuidor), obteve-se os seguintes resultados para os dois Projetos de Liga:

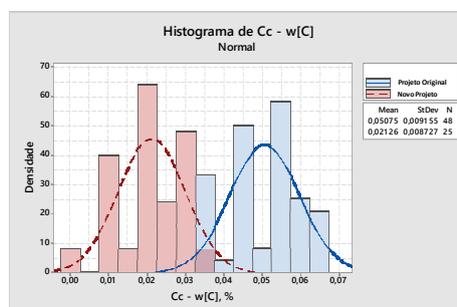


Figura 7. $C_c - w[C]$ para os dois Projetos de Liga.

Observou-se a redução nas médias obtidas de $C_c - W[C]$, de 0,051 para 0,021%. A seguir veremos os impactos no MLF.

3 EXPERIMENTAÇÃO, RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da produção de 25 corridas com o novo Projeto de Liga foi possível realizar, além da verificação do impacto no MLF, um estudo comparativo entre diversas variáveis críticas de processo de Lingotamento Contínuo de Placas. Adotou-se estratificação das larguras de placas ($<1.600\text{mm}$ e $\geq 1.600\text{mm}$) em função de observações de processo com maior MLF em placas de largura acima de 1.600mm.

3.1 Impactos do novo Projeto de Liga na Média e no Desvio Padrão do MLF

Obteve-se o seguinte impacto no MLF:

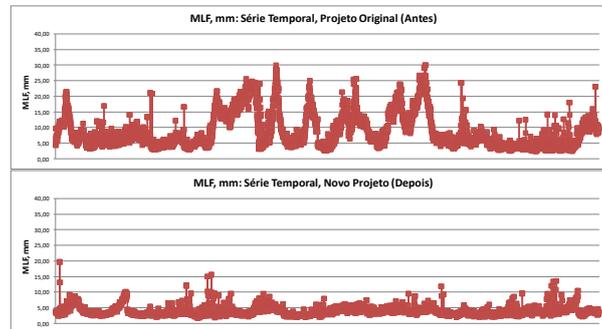


Figura 8. Seqüência Temporal (Antes e Depois) do MLF. Cada ponto no gráfico equivale a 50cm no comprimento da placa lingotada.

Aço	Faixa de Larguras, mm	Veio	Média de MLF, mm	Desvio Padrão de MLF, mm	n corridas
Novo Projeto	<1.600mm Total		4,25	1,64	14
	≥1.600mm Total		3,57	1,44	11
	Total geral		3,99	1,60	25

Tabela 2. MLF, Média e Desvio Padrão, para o Novo Projeto de Liga, por faixa de larguras.

Abaixo a comparação entre os resultados do Projeto Original e do Novo Projeto:

		Delta %, Novo Projeto/Projeto Original		
%	Faixa de Larguras, mm	Veio	Média de MLF, mm	Desvio Padrão de MLF, mm
Novo Projeto/Projeto Original	<1.600mm Total		-45,04	-66,77
	≥1.600mm Total		-68,07	-75,76
	Total geral		-54,51	-70,82

Tabela 3. Redução percentual no MLF, para os dois Projetos de Liga, por faixa de larguras.

No resultado geral obteve-se redução de 54,51% no MLF médio e 70,82% na média de Desvio Padrão do MLF. A estatística realizada inclui somente as placas de meio de seqüência eliminando, assim, placas que apresentam processo de lingotamento ainda não estabilizado (Início e Fim de Seqüência). Em suma:

- ✓ Largura <1.600mm: Redução de 45,04%;
- ✓ Largura ≥1.600mm: Redução de 68,07%.

Segue-se análise comparativa entre o MLF e diversas variáveis de Lingotamento Contínuo, importantes para o processo de solidificação, estando relacionadas à espessura da pele inicialmente solidificada, bem como sua homogeneidade.

3.2 Relação de MLF com a Velocidade de Lingotamento

Pode-se observar que em toda a faixa de variação de velocidade de lingotamento a Média de MLF para o novo Projeto de Liga se apresentou constantemente abaixo do Limite Superior de Especificação estabelecido, igual a 10mm. E tal desempenho se repetiu em ambas as estratificações de largura.

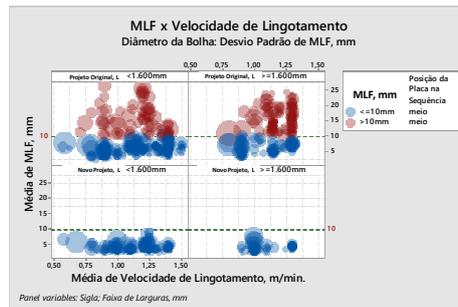


Figura 9. Média de MLF (Cada Bolha representa uma Placa) x Velocidade de Lingotamento.

Um aspecto importante é o fato do novo Projeto de Liga apresentar Média de MLF abaixo de 10mm em uma ampla faixa de Velocidades de Lingotamento.

3.3 Relação de MLF com o Resfriamento Primário

Abaixo temos o MLF em função das Vazões de Água do Resfriamento Primário no Molde, onde NL = *Face Estreita Esquerda*; NR = *Face Estreita Direita*; WF = *Face Ampla Fixa* e WL = *Face Ampla Móvel*, que são as regiões do Molde. Observa-se que em toda a faixa de variação de vazões a Média de MLF para o Novo Projeto de Liga apresenta-se constantemente abaixo de 10mm.

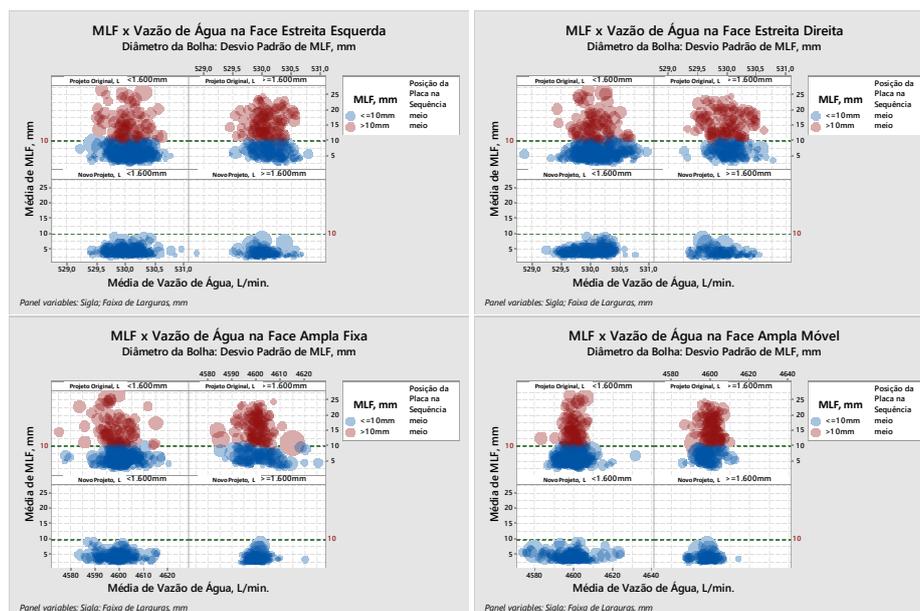


Figura 10. Média de MLF (Cada Bolha representa uma Placa) x Resfriamento Primário (Molde).

De forma análoga à Velocidade de Lingotamento, observamos comportamento semelhante para a vazão de água no Resfriamento Primário. Para o novo Projeto de Liga não houve ocorrência de Média de MLF acima de 10mm. Faixas de vazões de água semelhantes no Molde, para os dois Projetos de Liga, indicam condições de extração de calor similares no Molde, embora para o novo Projeto de Liga espera-se que o *gap* seja menos acentuado em função da menor contração volumétrica e maior contato entre a pele e a parede do Molde, aumentando assim sua espessura. A pele resultante apresenta aparência regular e homogênea.

3.4 Relação de MLF com o Resfriamento Secundário

Pode-se observar que em toda a faixa de variação de vazões, para cada uma das Zonas de Resfriamento (De 1 a 4), a Média de MLF para o novo Projeto de Liga apresentou-se constantemente abaixo de 10mm, para as duas faixas de largura.

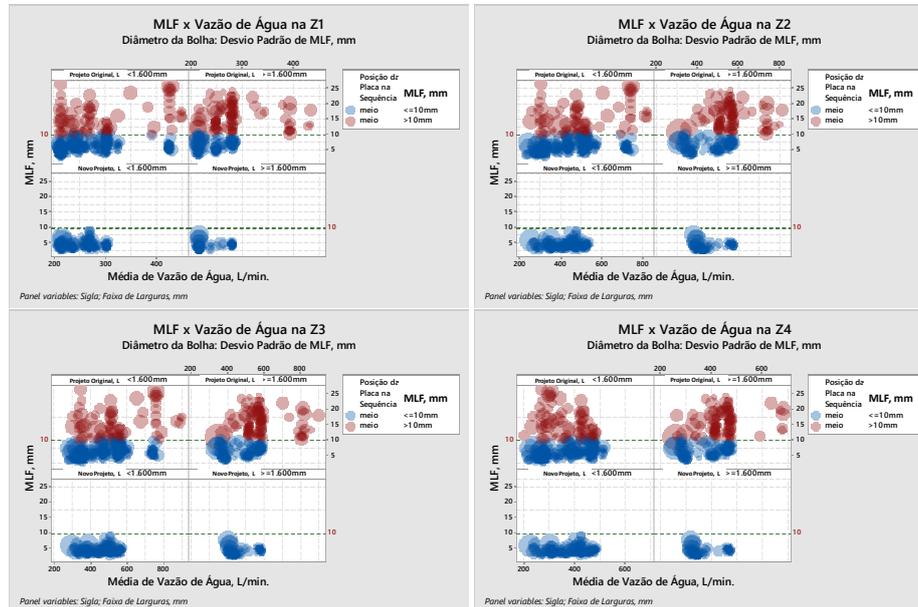


Figura 11. Média de MLF (Cada Bolha representa uma Placa) x Resfriamento Secundário, Z1 à Z4.

Temos faixas de vazões médias de água semelhantes para os dois Projetos de Liga com resultados de MLF bastante diferentes. Para o Novo Projeto de Liga não houve ocorrência de Média de MLF acima de 10mm. Devido a essa semelhança, que indica condições similares de extração de calor na zona de Resfriamento Secundário e da espessura de pele homogênea, considerou-se não haver influência do abaulamento entre rolos no MLF e sim o efeito da contração volumétrica, ou abaulamento instável, devido à Reação e Transformação Peritética.

3.5 Relação de MLF com $C_c - w[C]$

Observa-se que a redução de $C_c - w[C]$ implicou na significativa diminuição da Média de MLF para o novo Projeto de Liga: Resultados abaixo de 10mm.

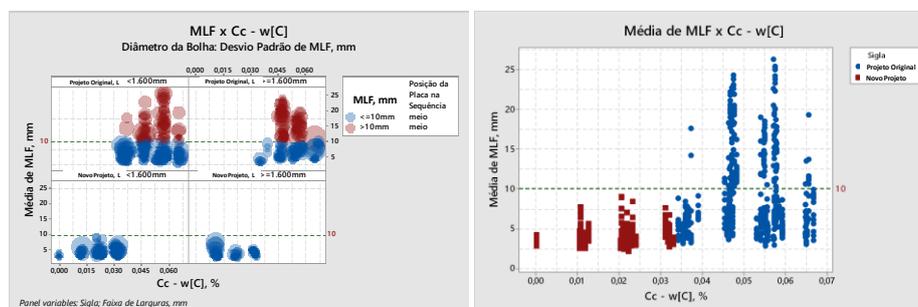


Figura 12. Média de MLF (Cada Bolha representa uma Placa) x $C_c - w[C]$.

Levando em consideração os resultados demonstrados nas seções 3.2 a 3.4, a redução acentuada de C_c , de 0,051% para 0,021%, implica em notável diminuição de MLF, mesmo existindo variações semelhantes para os dois Projetos de Liga em variáveis críticas, tais como o Resfriamento Primário e Secundário e a Velocidade de Lingotamento. Cálculos de Capabilidade Estatística mostram evolução importante no Ppk para MLF Médio $\leq 10\text{mm}$: De 0,08 para 1,29, no novo Projeto de Liga.

3.6 Impactos do novo Projeto de Liga nas Propriedades Mecânicas das Bobinas Laminadas

A especificação desse aço segue a norma ASTM A588-B que apresenta as seguintes restrições:

- ✓ Ensaio de Tração: LE, Limite de Escoamento: $\geq 345\text{MPa}$; LR, Limite de Resistência: $\geq 485\text{MPa}$ e A, Alongamento: $\geq 16\%$;
- ✓ Energia de Impacto conforme cliente: $\geq 5\text{J}@-10^\circ\text{C}$ (2,50X10mm).

A seguir análise comparativa entre os dois Projetos de Liga.

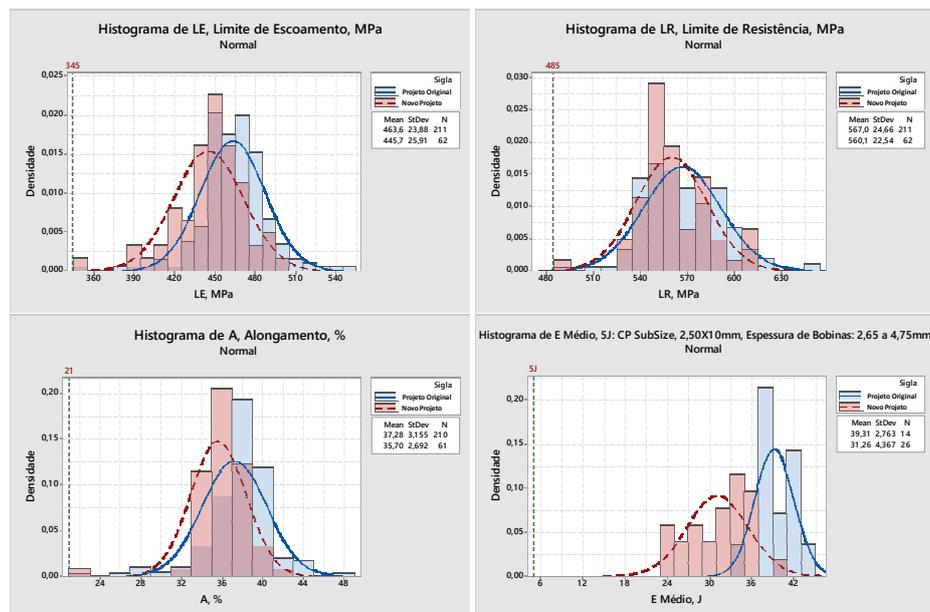


Figura 13. Impacto nas Propriedades Mecânicas para os dois Projetos de Liga.

4 CONCLUSÃO

Dentre as ações possíveis relatadas na Bibliografia para a minimização do problema relatado, percebeu-se que a alteração no Projeto de Liga representava elevado impacto no MLF, diminuindo sua ocorrência. A principal mudança realizada foi o deslocamento do teor de carbono, de 0,10 para 0,13% e, para garantia de Propriedades Mecânicas, a redução do Manganês, de 0,97% para 0,80%. Outros elementos químicos foram revisados visando manutenção do Índice de Corrosão e na Soldabilidade.

Análises comparativas entre as variáveis de Lingotamento Contínuo mostraram condições similares de processo, porém com MLF significativamente reduzido para o

novo Projeto de Liga. A revisão acima ocasionou redução nos custos de produção do aço líquido.

Análises posteriores, relativos à incidência do MLF por Largura Nominal de Placa, mostraram elevados valores em larguras próximas e acima de 1.600mm, exclusivamente para o Projeto Original. O novo Projeto de Liga apresentou valores semelhantes de Média de MLF para todas as larguras de placas. Os Eventos de Qualidade com impacto na qualidade de superfície apresentaram redução. Alarmes de Rompimento de Veio não ocorreram durante a produção das corridas.

As Propriedades Mecânicas, nas bobinas laminadas, foram aprovadas, perante as especificações técnicas adotadas. A Energia de Impacto, também aprovada em todos os lotes, mostrou resultados similares àqueles obtidos pelo Projeto Original.

Considera-se que ótimos resultados foram obtidos com a revisão do Projeto de Liga do aço ASTM A588-B, conseguindo-se atingir também os seguintes objetivos:

- ✓ Maior possibilidade de troca de larguras durante a produção, o que facilita o processo de Planejamento da Produção;
- ✓ Excelente correlação entre os resultados práticos e os previstos na Bibliografia.

REFERÊNCIAS

- 1) Li, Y. Zhang, X. Lan, P. Zhang, J. Control of mould level fluctuation through the modification of steel composition. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, Volume 20, Number 2, February 2013, Page 138.
- 2) Korojy, B. Nassar, H. Fredriksson, H. Hot crack formation during peritectic reaction in steels. Ironmaking and Steelmaking 2010 Vol 37, 1.
- 3) Tathicherla, R. Kumar, A. S. To Identify the Root Cause for Mould Level Fluctuations in Continuous Casting of Slab. International Journal of Recent Development in Engineering and Technology. Volume 6, Issue 1, 2017.
- 4) Kadli, R. Reddy V. Anilkumar, S. The Effect of Mould Level Fluctuation in Continuous Casting of Slab. Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR) Vol-3, Issue-1, 2017.
- 5) Moon, S.C. The Perictetic Phase Transition and Continuous Casting Practice. Tese de Doutorado, University of Wollongong, 2015.
- 6) Curso de Lingotamento Contínuo de Placas, ABM, 2008.
- 7) Lee, J. D. Hee, C. H. The Mechanism of Unsteady Bulging and Its Analysis with the Finite Element Method for Continuously Cast Steel. ISIJ International, Vol. 40 (2000), No. 8, pp. 765–770.
- 8) Sumitomo Metals, Development of High-Efficiency Continuous Casting Technologies. Japão. [Acesso em 01/05/2017]. Disponível em <http://www.sumitomometals.co.jp/e/press/2008/news2008-10-16-02.html>.