

Investigação da Qualidade Subsuperficial de Tarugos de Aço Válvula Martensítico Produzidos via Lingotamento Contínuo*

Eduardo Netto de Souza¹
Eriberto Pereira Giardini Filho²
Robson Leandro Silva³
Bruno Pessoa Ramos⁴

Resumo

Os aços válvulas martensíticos produzidos na Villares Metals têm tido uma crescente participação na utilização do lingotamento contínuo, rota reconhecidamente mais econômica, contribuindo dessa forma, para a competitividade e participação expressiva no mercado mundial de aços para válvulas de motores. Os elevados níveis de qualidade exigidos nesse produto é um requisito fundamental solicitado por esse mercado e, nesse contexto, objetivou-se caracterizar o mecanismo de formação de trincas subsuperficiais em tarugos e avaliar as possíveis ações de melhoria. A metodologia utilizada incluiu uma intensiva investigação dos tarugos obtidos pelo processo de lingotamento contínuo, através de análises por meio de equipamentos de ultrassom juntamente com os parâmetros de processo, tais como, condições de oscilação, temperatura no distribuidor e tipo de molde. Desse modo, estabeleceram-se correlações dentro do processo com os resultados das análises macro e microestruturais do produto em estudo. Os resultados encontrados mostraram uma melhor compreensão dos fenômenos na formação de trincas subsuperficiais e, por conseguinte, foram realizadas contramedidas para a solução do problema, melhorando o rendimento e a qualidade dos tarugos.

Palavras-chave: Lingotamento contínuo; Aços válvulas; Trincas *off-corner*.

Evaluation of Subsurface Quality in the Valve Steel Billets

Abstract

The majority of martensitic valve steel production at Villares Metals is produced by continuous casting route in order to take advantage of cost reduction that this route offers, contributing to support Villares Metals in the competitive world-wide valve steel market. In order to keep a high level of quality, it was aimed to better understand the formation mechanism of subsurface cracks and evaluate possible countermeasures in order to guarantee final products free of defects. It was investigated the quality using an ultrasonic equipment with process parameters including oscillation system, pouring temperature and mold type. The results showed the best understanding of the metallurgical process involved in the occurrence of this defect. The process conditions was modified based on the investigations in order to improve the yield and quality of the billets.

Keywords: Continuous Casting; Valve Steel; Off-corner crack.

¹ *Doutor em Engenharia, Pesquisador do Centro de P&D – Villares Metals S.A., Sumaré, SP.*

² *Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Processos, Villares Metals S.A., Sumaré, SP.*

³ *Mestre em Engenharia Metalúrgica, Engenheiro de Processos, Villares Metals S.A., Sumaré, SP.*

⁴ *Engenheiro Metalurgista, Diretor de Produção, Villares Metals S.A., Sumaré, SP..*

1 INTRODUÇÃO

A Villares Metals vem produzindo aços válvulas martensítico na rota do lingotamento contínuo, via que chegou a sua excelência em termos de qualidade através de tratamento térmico de solubilização de carbonetos e conseqüente processo de conformação mecânica. O resultado desse sucesso deve-se muito à intensa investigação na qualidade dos tarugos com análise e minimização na formação de trincas subsuperficiais. Esses aços durante o uso, geralmente como válvulas de admissão de motores para indústria automobilística, são submetidos a diferentes níveis de tensões mecânicas, térmicas e de fadiga, características essas que impulsionam um alto nível de controle de processo em toda cadeia produtiva, visando obter um processo que garanta um produto final com alto grau de reprodutibilidade de propriedades mecânicas e metalúrgicas.

Nesse contexto, observou-se que as condições de solidificação desses aços são extremamente sensíveis às variações no processo de lingotamento contínuo e que podem levar a ocorrência de defeitos nos tarugos, que por sua vez, reduzem o rendimento e/ou prejudica a programação da produção. Alterações no processo foram realizadas a fim de melhorar a qualidade dos tarugos, de forma a aumentar o rendimento.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

O lingotamento contínuo é um processo que se caracteriza pela sua alta capacidade de extração de calor, sendo que a taxa de resfriamento pode apresentar variações bruscas, à medida que o tarugo passa pelas três grandes regiões de resfriamento, tais como o molde, os *sprays* d'água e a região de resfriamento por radiação. Dessa forma, é evidente que podem surgir, durante o processo de solidificação, gradientes de temperaturas que geram tensões térmicas, à medida que a casca sólida se expande e contrai durante o resfriamento.

Adicionalmente, como toda a massa metálica move-se na máquina, a casca sólida também está sujeita a uma variedade ainda maior de tensões induzidas por esforços mecânicos causados por diversos fatores como: atrito no molde, pressões e desalinhamento de rolos, pressão metalostática, bem como as operações de curvamento e endireitamento na máquina. Dependendo da magnitude de cada um desses componentes citados, os níveis de tensão e deformação podem promover a formação de trincas internas ou superficiais.

A natureza das tensões e deformações já foi amplamente discutida na literatura [1], sendo um dos aspectos mais relevantes no estudo dos mecanismos de ocorrência de defeitos nos materiais lingotados continuamente. Essas tensões são de natureza cíclica, sendo geradas principalmente pelo atrito do movimento de oscilação do molde. As tensões de tração são induzidas no metal, quando o molde está se movendo para baixo em relação à casca sólida, enquanto que, quando o movimento relativo do molde é para cima, tensões compressivas aparecem na casca sólida.

2.1. Propriedades Mecânicas a Altas Temperaturas

No estudo do aparecimento de trincas em materiais lingotados continuamente, não só os aspectos relacionados ao perfil de tensão-deformação presentes são

importantes, mas também, as propriedades mecânicas dos materiais a altas temperaturas.

Nas temperaturas logo abaixo da temperatura solidus, a deformação para fratura dos aços é menor que 1% (valor da redução de área no ensaio de tração) e essas regiões são denominadas zonas de temperatura de resistência zero (ZST). A ductilidade é baixa pela microsegregação de elementos nos interstícios das dendritas como S, P, Cu, Sn, Sb, Zn, formando um superesfriamento constitucional.

A ductilidade permanece efetivamente zero até que o líquido interdendrítico se solidifique completamente. Uma severa fragilidade é observada para todas as temperaturas acima da temperatura de ductilidade zero (ZDT), como mostrado na Figura 1. Qualquer tensão aplicada ao aço nessa região de temperatura propagará trincas na frente de solidificação entre as dendritas. A observação desse tipo de trinca em um microscópio eletrônico de varredura revela que a superfície da fratura é lisa com aparência arredondada, sem sinais de fratura dando a indicação que havia filmes líquidos no momento de ocorrência das trincas.

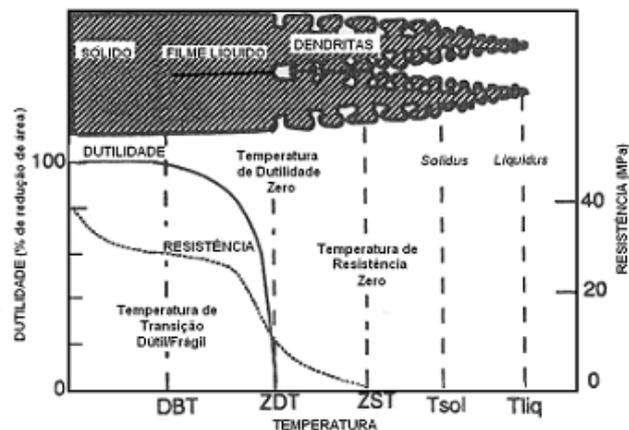


Figura 1. Região de fragilidade a quente próximo à temperatura *solidus* [2].

2.2. Trincas Próximas ao Canto (Trincas Off-corner)

É relatado na literatura o caso de trincas em tarugos, cuja observação na seção transversal mostra a sua presença a cerca de 15 mm de um dado canto do tarugo a uma profundidade de 4 a 10 mm da superfície. Essas trincas são denominadas trincas *off-corner*. Brimacombe et al.[4] mostraram que, assim como outras trincas internas, essas rupturas ocorrem a altas temperaturas, iniciando na região próxima a frente de solidificação devido a sua maior fragilidade.

Desse modo, a profundidade das trincas reflete diretamente a espessura da casca sólida no momento em que a trinca é formada. Baseado nessas observações, Brimacombe et al.[4] postularam que as trincas *off-corner* são geradas pelo abaulamento (expansão) de uma face do tarugo contra a parede do molde, conforme mostrado esquematicamente na Figura 3.

Considera-se que a expansão da face aconteça na parte inferior do molde sendo intensificada por fatores como falta de contração do tarugo, aparecimento de um excessivo *gap* entre o molde/tarugo, ou ainda, a atuação da pressão metalostática. Desse modo, devido à relativa baixa temperatura e resistência do canto do tarugo, a expansão da casca não se estende até o canto, promovendo o seu dobramento na região (região *off-corner*), que é mais quente e freqüentemente mais fina que o meio da face. O efeito do dobramento gera tensões de tração na frente de solidificação que conseqüentemente podem gerar trincas internas.

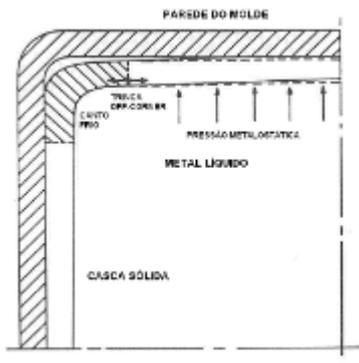


Figura 3. Mecanismo de dobramento da casca sólida na região *off-corner* [3].



Figura 4. Mecanismo de rotação do canto devido à expansão da face do tarugo [3].

Vale ressaltar, se o reaquecimento da superfície do tarugo na parte inferior do molde acontecer em níveis significativos, pode também gerar tensões de tração na frente de solidificação e trincas na região *off-corner*. O reaquecimento promove a expansão de uma das faces de tal modo que, um ou ambos os cantos adjacentes, que estão mais frios comparados à região central, podem sofrer um movimento de rotação, como mostrado na Figura 4, gerando tensões de tração na frente de solidificação.

Com base nos mecanismos citados, conclui-se que qualquer variável que influencie, tanto na forma do molde no menisco como nas características da oscilação, podem afetar a formação das trincas *off-corner*, e em outras palavras, um fator primordial para a minimização desses defeitos é a uniformidade do crescimento da casca sólida dentro do molde.

2.3. Contramedida para Trincas *Off-corner*

Baseado nos mecanismos propostos, que tanto a natureza das marcas de oscilação, quanto à uniformidade da casca sólida têm um papel importante na ocorrência desses defeitos. Muitas variáveis podem ser listadas, dentre as quais se destacam:

- Oscilação do molde. A diminuição do tempo de estripagem negativa, objetivando uma menor profundidade de marca de oscilação, é um fator relevante na minimização dos defeitos. Nesse mesmo contexto, é fundamental que o sistema de oscilação produza movimentos estáveis e consistentes com o perfil da máquina, evitando assim, variações na marca de oscilação;
- Perfil do molde. As distorções da forma do molde afetam significativamente os defeitos, desse modo, as variáveis como velocidade de água, espessura de molde, uniformidade do escoamento da água na periferia do molde e conicidade devem ser levadas em conta e serem mantidas nos níveis recomendáveis;
- Condições da região abaixo do molde. É fundamental, para se evitar o aparecimento de tensões adicionais ao sistema, que haja um correto alinhamento do molde com o sistema de rolos de apoio e suporte presentes no veio. Adicionalmente, o sistema de resfriamento por *sprays* deve produzir condições uniformes de extração de calor, visto que, mesmo que o molde apresente condições mínimas de não-uniformidade de resfriamento, os bicos tortos e ou entupidos também podem causar o aparecimento de defeitos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para um maior entendimento da qualidade subsuperficial dos tarugos do aço SAE HNV3, cuja composição é mostrada na Tabela 1, estabeleceu-se uma sistemática de inspeção por amostragem por equipamento de ultrassom portátil para fazer uma varredura nas regiões próximas aos cantos dos tarugos (regiões *off-corner*).

Tabela 1. Composição Química Típica - % peso – SAE HNV3.

C	Si	Mn	P	S	Cr
0,45	3,30	0,40	0,030	0,0010	8,50

A amostragem estabelecida foi de 6 ou 7 tarugos por corrida, representando uma amostra de cerca de 10% da corrida inteira retiradas em intervalos regulares abrangendo toda a corrida. A identificação das amostras foi realizada sequencialmente de forma a permitir a rastreabilidade dos parâmetros de processo do tarugo durante a sua produção.

Após a realização do ensaio, estabeleceu-se uma variável resposta denominada índice de trincas que é composto pelo somatório de todos os comprimentos das indicações de defeito dividido pelo comprimento total inspecionado.

Após a detecção dos defeitos subsuperficiais nos tarugos, utilizando-se do ultrassom, as amostras foram preparadas para macrografia com ataque de ácido HNO₃ e HCL na proporção de 1:1 a uma temperatura de 60 °C. Posteriormente a análise macrográfica, conduziu-se para uma análise micrográfica em um microscópio ótico para identificar e caracterizar a microestrutura presente na região da trinca. As amostras para micrografia foram atacadas com reagente Vilela.

Na investigação da situação das condições de oscilação da máquina de lingotamento contínuo, utilizou-se o sistema de monitoração de oscilação do molde com uso de acelerômetros posicionados sobre os quatro cantos do molde. Com a aquisição dos dados em função do tempo, o sistema fornece o perfil de variação de velocidade e deslocamento do molde. As investigações com o sistema de oscilação incluíram estudos do comportamento da magnitude da frequência de oscilação, tipo de aço e tipo de molde. Na frequência de oscilação, foram utilizados 3 níveis de operação para análise de sua influência em relação aos demais parâmetros, um nível considerado baixo, um nível moderado e, por último, uma frequência considerada excessiva. As investigações, quanto ao tipo de molde, foram conduzidas através de análise comparativa entre o molde padrão (curvo - taper simples) e um molde para testes (curvo – taper parabólico). Já com relação ao tipo de aço, comparou-se o comportamento da oscilação do aço SAE HNV3, que é o principal foco do estudo, com a do aço inoxidável AISI304L, cuja composição é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2. Composição Química Típica - % peso – AISI 304L

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Al
0,025	0,40	1,85	0,035	0,027	18,20	8,39	0,40	0,090	<0,010

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Resultados do Ultrassom

A investigação da qualidade subsuperficial dos tarugos do aço HNV3 foi quantificada de forma amostral através do ensaio de ultrassom. Foram avaliadas 57 corridas e se correlacionou o índice de trincas com a temperatura média do distribuidor, conforme mostrado na Figura 4.

O comportamento observado concorda bem ao descrito na literatura [1,2] onde, as temperaturas maiores de lingotamento podem gerar maiores tensões térmicas na casca em solidificação e, conseqüentemente, possibilitam uma maior probabilidade de ocorrência de trincamento.

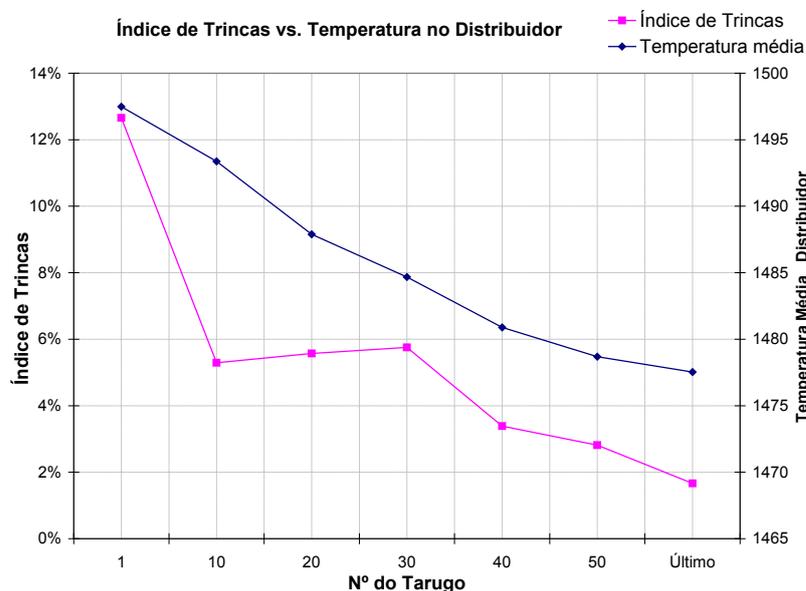


Figura 4. Relação entre o índice de trincas, temperatura no distribuidor e posição do tarugo.

4.2. Análise Metalográfica

Através de análises por ultrassom na região do abaulamento, detectam-se aleatoriamente, trincas longitudinais internas que chegam a 9 mm da superfície (trincas subsuperficiais). A Figura 5 mostra em destaque a região com a formação da trinca. Estudos realizados na trinca subsuperficial mostraram formação de segregados de carbonetos interdendríticos, sendo apontados como uma das prováveis causas da formação da trinca, conforme mostrado na Figura 6.

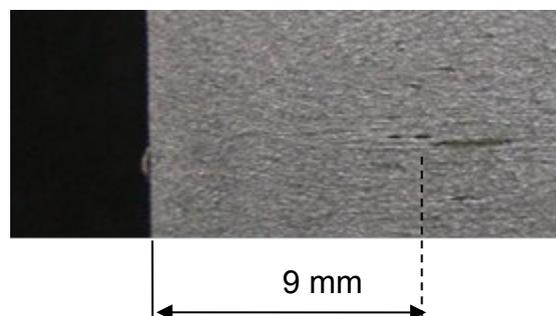


Figura 5. Macrografia evidenciando a seção transversal de uma trinca longitudinal.

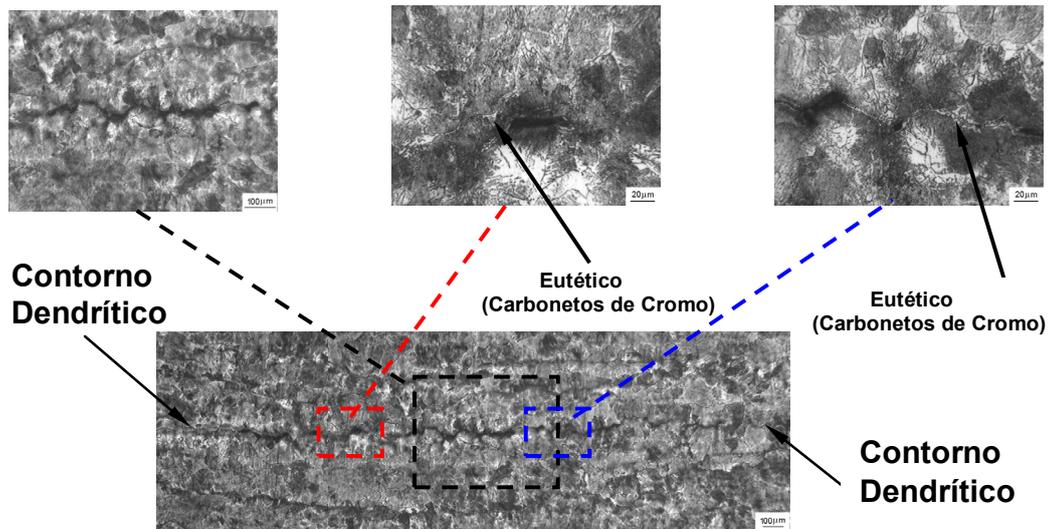


Figura 6. Micrografias evidenciando a formação de segregação dos carbonetos em linha. Ataque Vilela.

Na Figura 7 é apresentada uma simulação termodinâmica com Thermo-Calc [5], de acordo com o modelo de Scheil [6] com a composição química conforme Tabela 1 (HNV3), onde mostra a formação de eutético com carboneto de cromo e sulfeto manganês no final da fração sólida.

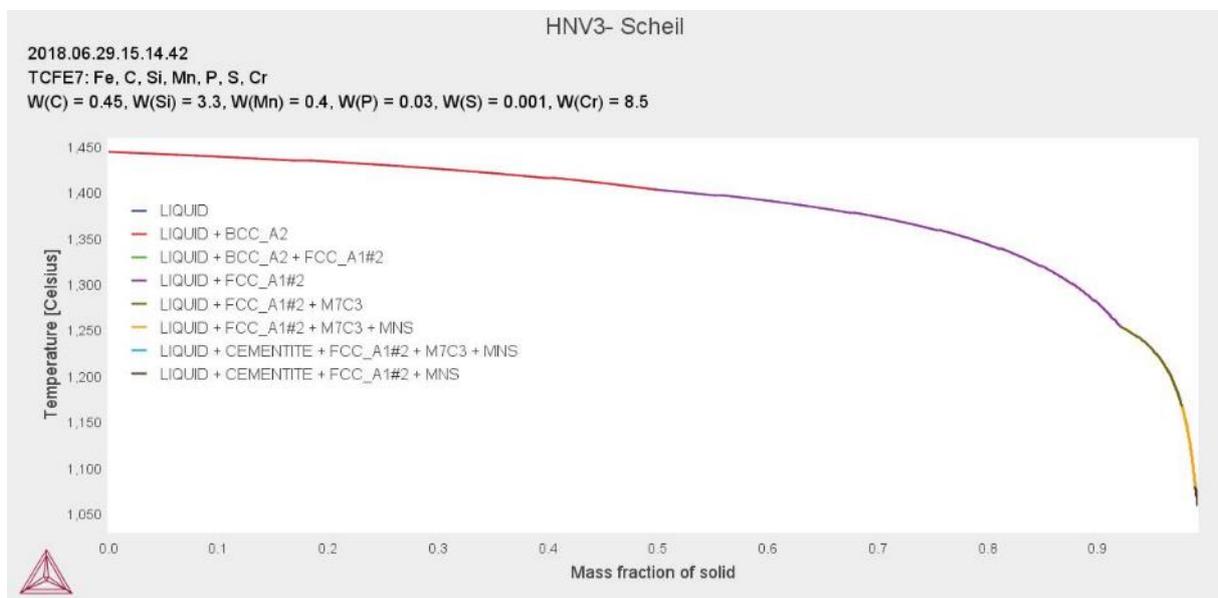


Figura 7. Simulação termodinâmica fora do equilíbrio termodinâmico (Scheil) do aço válvula martensítico HNV3.

A Figura 8 mostra o mecanismo de formação de segregação durante a solidificação. A formação dos carbonetos em linha começa a ocorrer durante o processo de solidificação na região pastosa. O líquido interdendrítico, rico em soluto, é rejeitado e preenche os contornos de grão que foram previamente tensionados termo-mecanicamente. Para que isto aconteça, é necessário encontrar determinadas condições propícias que ocorram simultaneamente, como um estado de tensão e deformação e uma estrutura de solidificação suscetível. Com o entendimento de como se forma a segregação dos carbonetos em linha, as contramedidas podem ser tomadas para a sua prevenção.

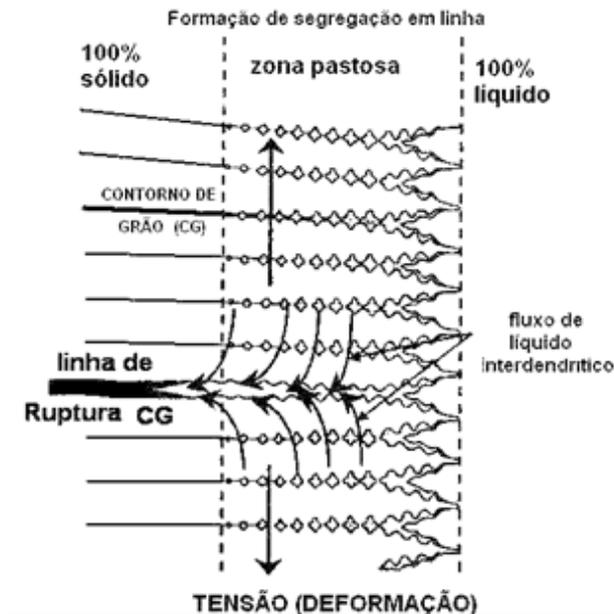


Figura 8. Mecanismo de formação de segregação interdendrítica [4].

4.3. Análise do Sistema de Oscilação.

Após a análise das trincas descritas anteriormente, verificou-se que elas apareciam entre 9 e 15 mm a partir da superfície do tarugo, fato esse que, comparado com a espessura do aço na saída do molde, obtidas pela avaliação de um breakout, evidenciam que o mecanismo de trinca envolve a casca formada no interior do molde.

Dessa maneira, uma investigação dos fenômenos físico-metalúrgicos do sistema de oscilação foi conduzida, de tal forma a avaliar a possibilidade de existências de sollicitações no interior do molde de modo a interferir no mecanismo de solidificação.

4.3.1. Avaliação da Frequência de Oscilação

Avaliaram-se três níveis de frequência de oscilação do molde com uma mesma velocidade de lingotamento para o aço SAE HNV3 e, observou-se que, à medida que se aumenta o nível de frequência de oscilação, também se aumenta o nível de atrito percebido pelo sistema, conforme mostrado na Figura 9.

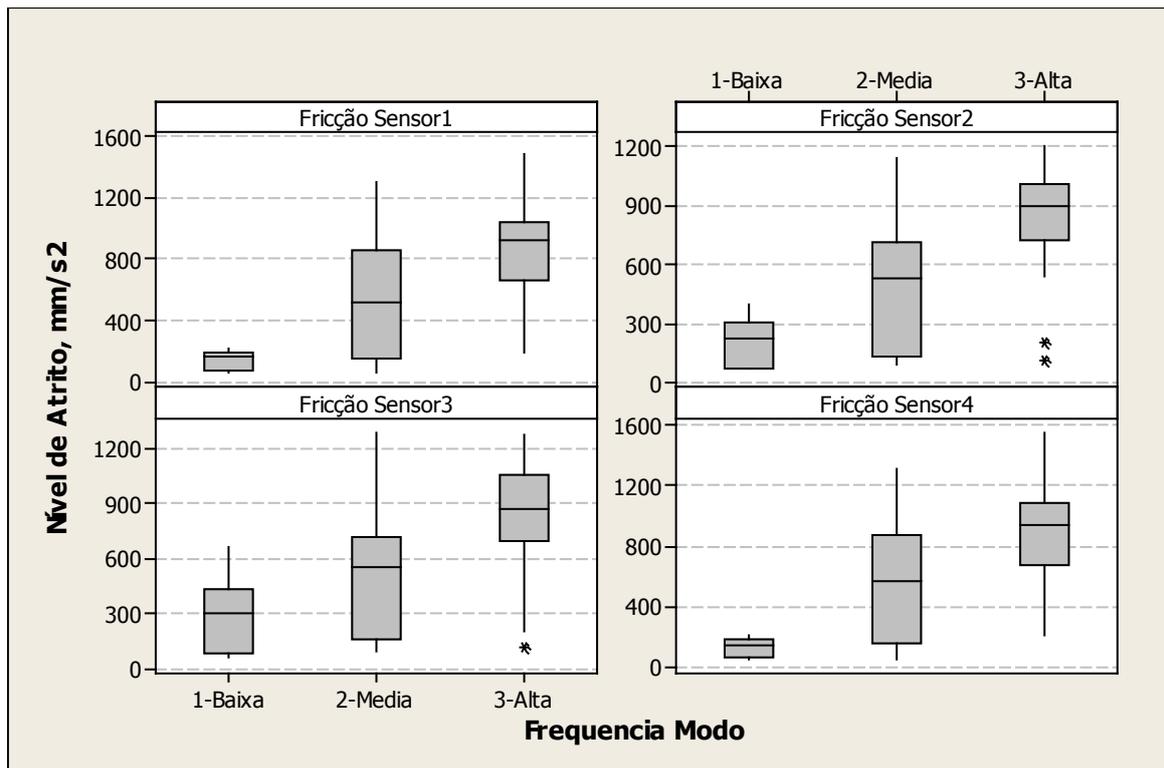


Figura 9. Nível de fricção em função do nível de frequência de oscilação.

Esse resultado mostra que é bastante importante uma análise detalhada de todos os parâmetros envolvidos no processo. O aumento da frequência de oscilação, em termos teóricos, leva a uma diminuição do *NST* (tempo de estripagem negativa) fato que, na literatura [1], é descrito como uma das ações para se minimizar a ocorrência de trincas em produtos lingotados continuamente. Observou-se, claramente, que o atrito é um importante parâmetro que também deve ser levado em conta nessa análise.

4.3.2. Avaliação da Influência do Tipo de Aço

O movimento de oscilação do molde foi comparado em duas situações, variando-se o tipo de aço lingotado. Comparou-se a oscilação do aço SAE HNV3 com o aço AISI 304L e observou-se que o parâmetro, denominado assimetria da oscilação, mostrava variações significativas para o caso do lingotamento do aço válvula, conforme Figura 10. A simetria de oscilação tem como condição objetivada valores ao redor de 100% e, condições inferiores evidenciam que existe um descompasso entre o tempo de subida e descida do molde. Na Figura 10, percebe-se que existem distúrbios no perfil da velocidade do molde durante a sua descida.

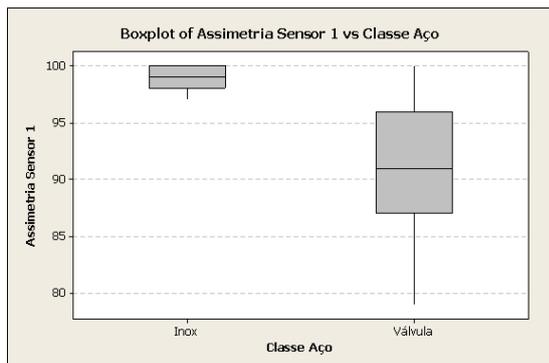


Figura 10. Variação do parâmetro assimetria medido no sensor 1 em função do tipo de aço.

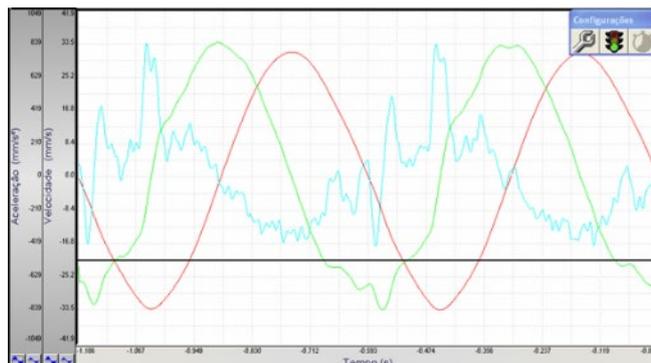


Figura 11. Perfis experimentais de aceleração (perfil azul), velocidade (perfil vermelho) e deslocamento do molde (perfil verde) no vértice 1 no plano vertical.

Na Figura 11, apresenta os perfis experimentais do movimento do molde durante o lingotamento do aço Válvula Martensítico. A curva com maior ruído, em azul, corresponde à aceleração (mm/s²), em verde, velocidade (mm/s) e em vermelho, deslocamento (mm). Já em preto, tem-se a velocidade do lingotamento contínuo. Nota-se que a velocidade do deslocamento do molde na vertical apresenta um perfil senoidal com interferências (sinais expúrios). Uma análise detalhada do sistema dinâmico de oscilações mostrou que esses sinais são decorrentes das frequências de ressonância natural advindas da estrutura da máquina de lingotamento contínuo, que se situam em torno das frequências de 12 a 20 Hz.

4.3.3. Avaliação do Tipo de Molde.

O movimento de oscilação do molde para o aço SAE HNV3 foi comparado entre dois tipos de molde, um com *taper* simples e outro de *taper* parabólico. Observou-se que a variação do nível de atrito para o molde parabólico é menor comparado àquela obtida pelo molde reto, conforme mostra a Figura 12. A diminuição no nível de atrito reflete na diminuição das tensões de tração na casca formada.

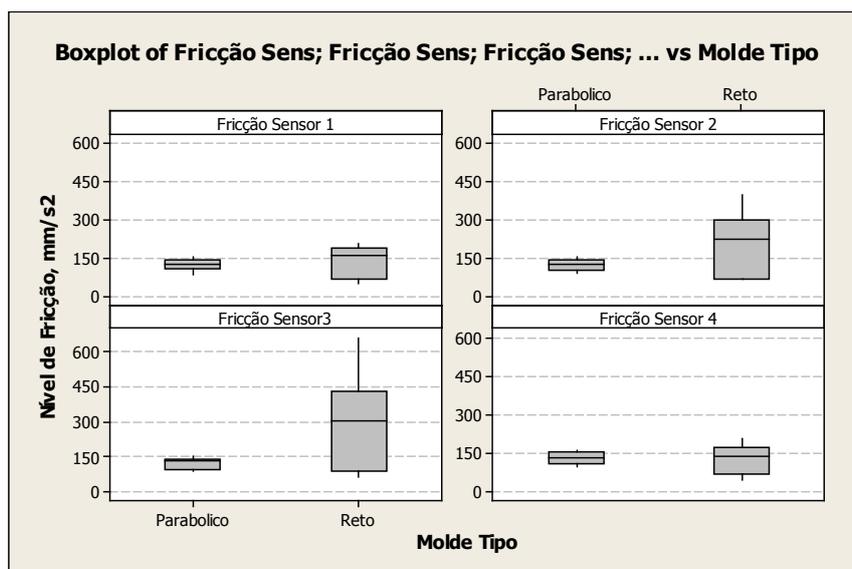


Figura 12. Nível de fricção em função do tipo de molde.

5. CONCLUSÕES

Após uma intensiva análise dos fenômenos físico-metalúrgicos envolvidos durante o processo de lingotamento contínuo, verificou-se que a formação das trincas está relacionada com a interação entre as tensões/deformações a altas temperaturas e o processo de solidificação no interior do molde.

Dessa forma, não somente as condições operacionais relacionadas com a temperatura de vazamento têm relevância na qualidade subsuperficial do tarugo, como também as condições de oscilação do molde. Além das variáveis tradicionalmente conhecidas que envolvem a parametrização da oscilação (amplitude, frequência e velocidade de lingotamento), outras variáveis de oscilação são importantes para esta avaliação, tais como, a assimetria do movimento do molde e a estimativa do nível de fricção.

Com base no que foi discutido, fatores preponderantes que afetam a qualidade do tarugo bruto de fusão foram analisados, de forma que medidas foram propostas para modificar as condições operacionais relacionadas à melhoria de transferência de calor na região primária e secundária, na interação físico-química do metal/molde, incluindo um novo sistema de oscilação com versatilidade na aplicação de novos parâmetros e, por fim, propostas de num novo *taper*, de modo que o conjunto de modificações visem a melhorar o rendimento com a diminuição das trincas off-corner e, conseqüentemente, as análises dos tarugos por ultrassom.

Diante destas propostas de melhorias, trabalhos futuros serão realizados para mostrar a influência dos parâmetros de processos na qualidade subsuperficial dos tarugos produzidos via lingotamento contínuo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRIMACOMBE JK, SORIMACHI K. Crack formation in the continuous casting of steel, Metallurgical Transactions B, 1977, 8B, 489-505.
2. THOMAS BC, BRIMACOMBE JK, SAMARASEKERA IV. The formation of panel cracks in steel ingots: A state-of-the-art review, Continuous Casting, ISS-AIME, 7, 1986, 7-20.
3. BOMMARAJU R, BRIMACOMBE JK, SAMARASEKERA IV. Mould behaviour and solidification in the continuous casting of steel billets, Continuous Casting, ISS-AIME, 5, 1984, 95-105.
4. SZEKERES ES., Strand solidification: part III – segregation streaks, Brimacombe Continuous Casting Course, Volume 2.,
5. THERMO-CALC SOFTWARE. Thermodynamic software - Thermo-Calc. Disponível em: <<http://www.thermocalc.com/products-services/software/thermo-calc/>>.
6. Garcia A. Solidificação - Fundamentos e Aplicações. Campinas, Editora da Unicamp; 2001.