



UMA REVISÃO DO PROBLEMA DE ROMBOIDADE NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE TARUGOS¹

Jorge Madias²

Resumo

Apesar de que a romboidade é um problema conhecido desde os primeiros tempos do lingotamento de tarugos e blocos, durante a última década na partida de diversas máquinas de concepção moderna esse defeito de forma tem ocorrido com frequência, exigindo trabalhos de melhora constante para poder minimizá-lo. Neste trabalho é revisada a literatura sobre a romboidade em tarugos e blocos. São discutidas as metodologias de avaliação do defeito e as conseqüências que ele traz na qualidade interna do tarugo e durante a laminação. Os mecanismos propostos para sua formação são revisados. São analisadas experiências industriais recentes.

Palavras-chave: Lingotamento contínuo; Tarugos; Qualidade; Romboidade; Molde.

A REVIEW OF THE RHOMBOIDITY PROBLEM IN THE CONTINUOUS CASTING OF BILLETS

Abstract

Despite rhomboidity is known from the first times of billet and bloom casting, during the last decade in the start-up of modern casters this shape defect has frequently occurred, calling for continuous improvement work to overcome it. In this paper, the literature on rhomboidity in billets and blooms is reviewed. Evaluation methods, as well as the consequences regarding billet/bloom quality and rolling operation are analyzed. The mechanism proposed for its formation is reviewed. Recent industrial experiences are discussed.

Key words: Continuous casting; Billet; Quality; Rhomboidity; Mold.

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

² Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Diretor da Metallon.



1 INTRODUÇÃO

Apesar de que a romboidade é um problema conhecido desde os primeiros tempos do lingotamento de tarugos e blocos, durante a última década na partida de diversas máquinas de concepção moderna esse defeito de forma tem ocorrido com frequência, exigindo o desenvolvimento de importantes trabalhos de melhora contínua para poder minimizar-lo.

Neste trabalho é revisada a literatura sobre a romboidade em tarugos e blocos. São discutidas as metodologias de avaliação do defeito, as conseqüências que ele traz na qualidade interna do tarugo e na laminação, as tendências na ocorrência do problema, os mecanismos postulados para sua formação e as soluções testadas por diversas usinas.

2 AVALIAÇÃO DA ROMBOIDADE

Uma primeira avaliação é a simples vista, por observação na câmara de refrigeração. O canto obtuso se observa mais frio e o canto agudo mais quente. Também a observação do corte com maçarico permite ter uma idéia.

Por exemplo, um trabalho classifica diferentes ocorrências de romboidade segundo o aspecto dos veios à saída do molde:⁽¹⁾

- romboidade em todos os veios, com partes escuras e outras parte brilhantes nas faces;
- romboidade em todos os veios, mas cor uniforme na saída do molde;
- forte romboidade em um ou dois veios, com orientação variável; e
- forte romboidade em um ou dois veios, com orientação fixa.

No leito de resfriamento às vezes tem-se observado “torção” do tarugo com romboidade, revelando mudanças no comportamento.⁽²⁾

A romboidade é determinada pela diferença entre as duas diagonais (d_1 e d_2), expressada em mm ou porcentagem:

$$\text{Romboidade (\%)} = ((d_2 - d_1)/((d_2 + d_1)/2)) \times 100$$

É medida diretamente sobre o tarugo mediante compasso e régua ou sobre os cortes transversais utilizados para controle da qualidade de forma e interna, mediante paquímetro.

A romboidade pode variar significativamente ao longo do tarugo.⁽²⁾ Por exemplo, na Figura 1 apresenta-se a variação da diferença entre diagonais em seis tarugos de 6 m de comprimento aço de 0,32% C com boro, e ao longo de um tarugo em particular.

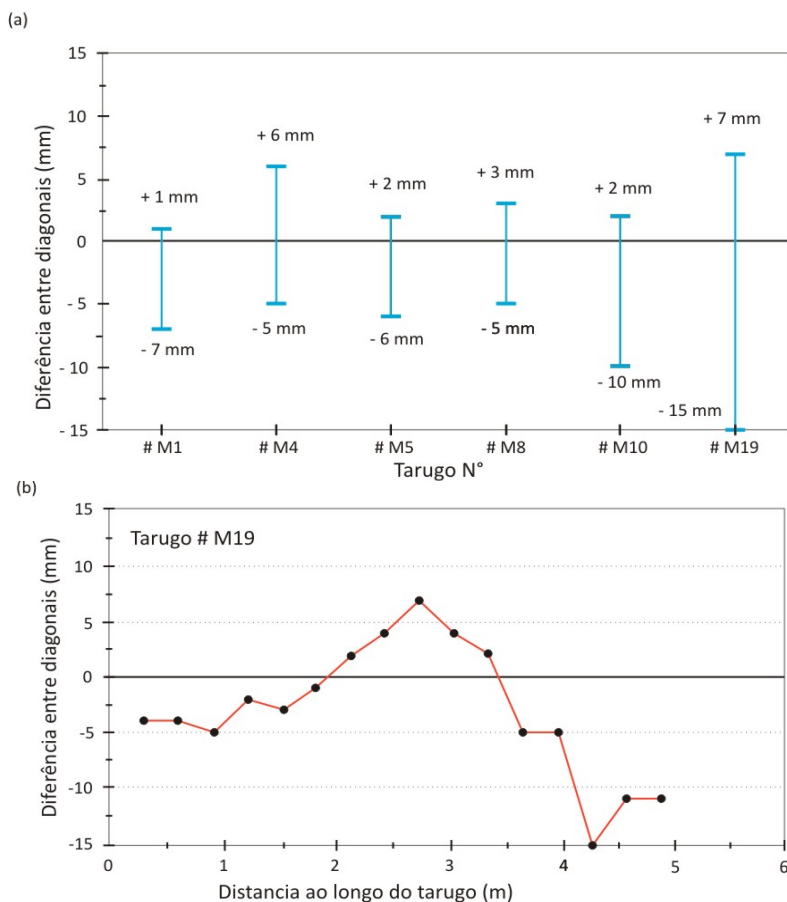


Figura 1. (a) Faixa de romboidade medida ao longo de seis tarugos de aço de 0,32% C, microligado com B e Ti; e (b) medição da romboidade ao longo de um dos tarugos.⁽²⁾

3 CONSEQUÊNCIAS NA QUALIDADE DO TARUGO E NA LAMINAÇÃO

A romboidade está usualmente acompanhada por trincas *off-corner* nos cantos com ângulo obtuso. Dependendo da magnitude da romboidade, as trincas *off-corner* podem continuar em forma diagonal, seguindo o caminho do encontro entre os grãos colunares que provem das duas faces ligadas ao canto obtuso. Isto sugere uma possível ligação entre os mecanismos de formação das trincas *off-corner* e da romboidade.⁽³⁾ Essas trincas podem propagar-se até o centro do tarugo, dando lugar a uma trinca diagonal completa, em alguns casos onde a romboidade é muito grande (Figura 2).



Figura 2. Diversos graus de romboidade, com diferentes graus de avanço das trincas pela diagonal que une os ângulos obtusos. Esquerda: tarugo de 120 mm x 120 mm com romboidade, mas sem trincas diagonais;⁽⁴⁾ centro: tarugo de 130 mm x 130 mm com trinca diagonal incompleta;⁽⁴⁾ direita: tarugo de 120 mm x 120 mm com trinca diagonal completa.⁽⁵⁾



Como acontece com outras trincas internas, existe a possibilidade de caldeamento durante a laminação, mas deve lembrar-se que nas trincas formadas a altas temperaturas existe um alto nível de segregação e usualmente estão parcial ou totalmente recheadas com sulfetos de manganês, ficando portanto um ponto fraco na estrutura.

Já no reaquecimento, a romboidade pode trazer dificuldades na movimentação dos tarugos, particularmente nos fornos empurradores. O conhecido gráfico das dificuldades de empurrar (Figura 3) se altera bastante e os tarugos saltam na entrada do forno, cuasando uma pilha o embolamento.

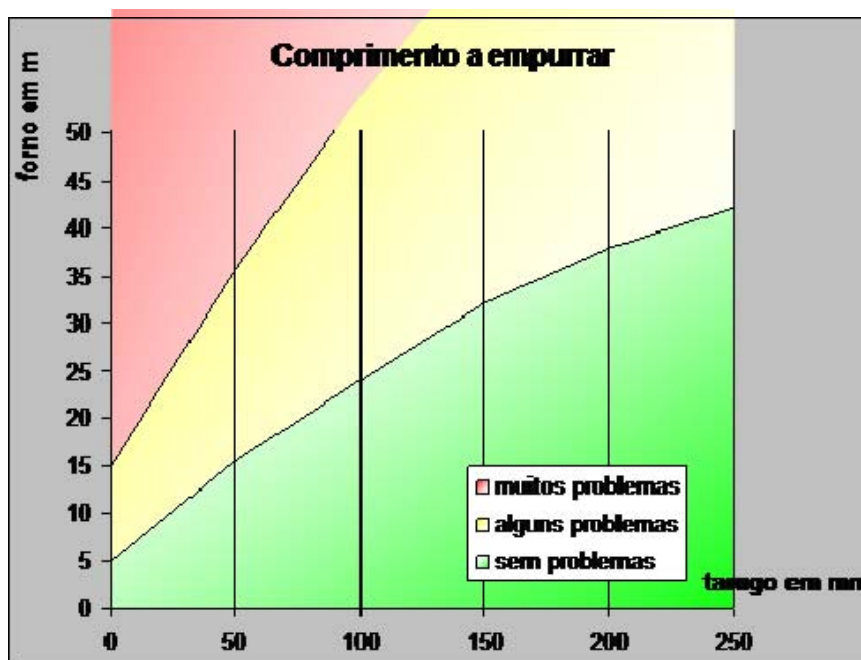


Figura 3. Dificuldades de empurrar em função da seção do tarugo e o comprimento de forno de reaquecimento.⁽⁶⁾

Durante a laminação pode ocorrer o fenômeno de torção do tarugo na primeira gaiola do desbaste. No caso da ArcelorMittal Piracicaba (tarugo de 120 mm x 120 mm) isto ocorria quando a diferença entre diagonais era maior que 9 mm.⁽⁵⁾ A torção causa deslocamento do tarugo no sentido axial, forçando uma das diagonais a penetrar na luz dos cilindros, formando um filete longitudinal ao longo do tarugo.

Nesta mesma usina, a passagem pela gaiola 2 até a gaiola 7, o defeito permanecia na barra laminada, e finalmente enroscava no *power slitter* gerando a sucata no laminador. Em alguns casos o defeito foi detectado na gaiola 1 e houve tempo de sucatar o tarugo na tesoura após a gaiola 7, antes que a barra provocasse danos maiores.

Também foi atribuída parte da formação de farpas e o arrebatamento de barras⁽⁵⁾/ abertura da barra durante o desbaste ("boca do jacaré")⁽⁷⁾ à romboidade.

A falta de esquadria é considerada severa se supera os 6 mm – 8 mm ou 4% - 5% quanto é expressa em porcentagem. No caso de máquinas novas, os fornecedores de equipamento garantem 1% ou 2% de romboidade, segundo os casos. Em um dos casos se estabeleceu índice de romboidade menor que 9 mm como padrão de utilização normal.⁽⁵⁾ A laminação de corridas com diferença entre diagonais entre 10 mm e 13 mm podia ser realizada com calibração especial para suportar tais valores.⁽⁵⁾



A calibração clássica tipo passe caixa-caixa vai exigir canais mais largos para acomodar o rombóide. No limite pode requerer cilindros lisos.⁽⁶⁾

4 INFLUÊNCIA DO TIPO DE AÇO

Um fato reconhecido é que os aços de médio teor de carbono são mais sensíveis ao defeito de romboidade que os de baixo ou alto carbono. A Figura 4 mostra dados da romboidade em três usinas diferentes.

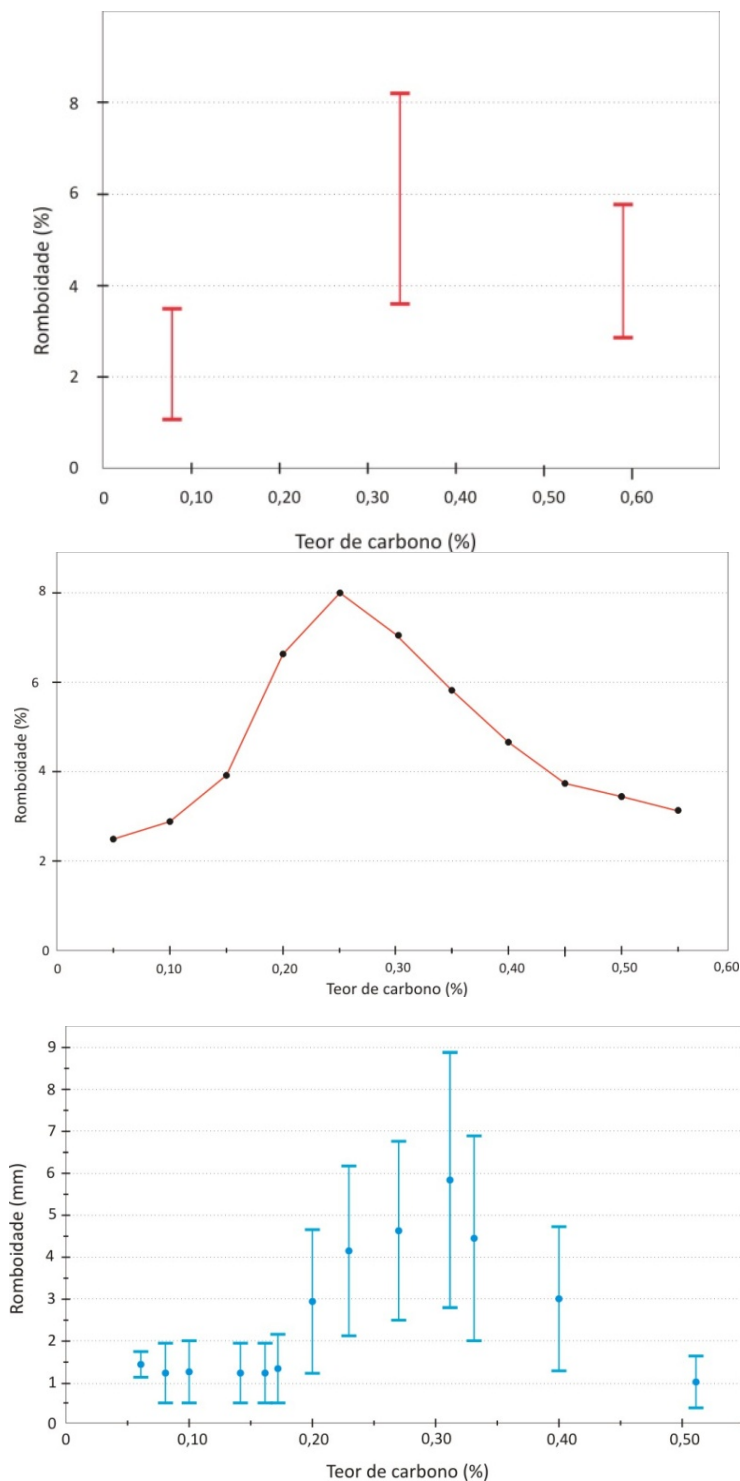


Figura 4. Influência do teor de carbono na romboidade, segundo dados de três usinas diferentes: (a) QIT-Fer & Titane;⁽⁸⁾ (b) DDS;⁽⁹⁾ e (c) Gerdau Açominas.⁽⁷⁾



Trata-se de aços com um caminho de solidificação particular, que começa com ferrita δ até chegar à temperatura peritética, onde a ferrita δ já solidificada, junto ao líquido em proporção peritética, transforma-se em austenita (Figura 5). O líquido remanescente vai solidificando gradualmente como austenita. Nestes aços, ao invés dos aços chamados “peritéticos” (carbono entre 0,10% e 0,18%), não coexistem a ferrita δ e a austenita abaixo da temperatura peritética, e fica ainda uma parte de líquido abaixo dessa temperatura. Passam só pela primeira etapa da reação peritética, mas sem passar pela segunda etapa, segundo a definição de Fredriksson.⁽¹⁰⁾

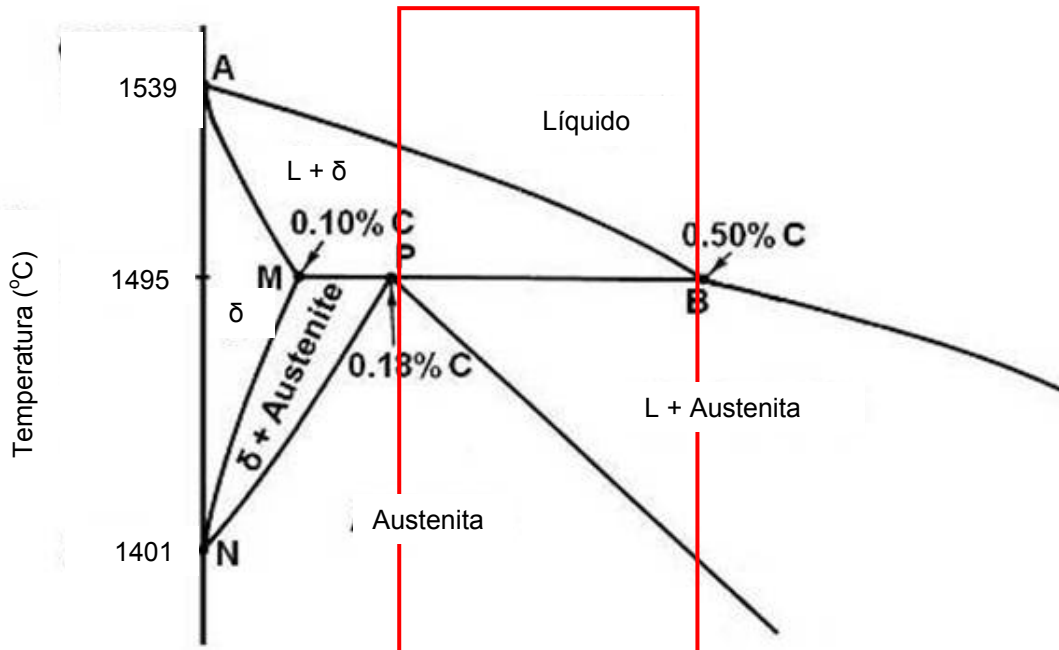


Figura 5. Parte superior esquerda do diagrama ferro carbono, destacando a região correspondente aos aços sensíveis à romboidade, no lingotamento contínuo de tarugos.

A tendência destes aços à romboidade tem sido atribuída a que, em comparação com os aços de menor teor de carbono, que apresentam rugosidade e baixa transferência de calor no molde, eles têm uma maior transferência de calor. Já com respeito aos aços de alto carbono, a faixa de solidificação é bem menor.⁽²⁾

Por exemplo, mediante modelamento matemático foi calculado que se a transferência de calor no molde decresce 25% numa dada posição e sobe 25% em outra, a diferença de espessura da pele 25 mm abaixo do menisco é de 1 mm para um aço de 0,32% C; 0,4 mm para um aço de 0,84% C e só 0,2 mm para um aço de 0,12% C.⁽²⁾ Então, o impacto do resfriamento não uniforme ao gerar uma casca não uniforme é o maior para o aço de médio carbono, para o qual a extração de calor no molde é razoável (4.500 kW/m²) e ao mesmo tempo a faixa de solidificação é estreita (50°C). Por outra parte, essa combinação não é similar para os aços de baixo carbono (baixa transferência de calor, 2.500 kW/m²) e os aços de alto carbono (faixa de solidificação ampla, 100°C).

Aços de alta liga também são suscetíveis à romboidade.⁽¹¹⁾



5 MECANISMO DE FORMAÇÃO

Um mecanismo proposto inicialmente para a geração da romboidade é a possibilidade de ter romboidade no molde, devido à distorção, na região logo abaixo do menisco, e que a romboidade fique amplificada no veio (Figura 6, à esquerda).⁽¹²⁾ Outro mecanismo proposto posteriormente pelos mesmos autores supõe a formação no molde de uma casca fraca em dois cantos opostos, e grossa nos outros dois cantos. A seção é levada a uma forma fora de esquadro pelo resfriamento secundário, devido a que a temperatura cai mais rápido onde a casca tem maior espessura (por maior condução do calor) e a contração não é uniforme, dando lugar ao ângulo agudo nos cantos frios e ao ângulo obtuso nos cantos quentes (Figura 6, à direita).⁽¹³⁾

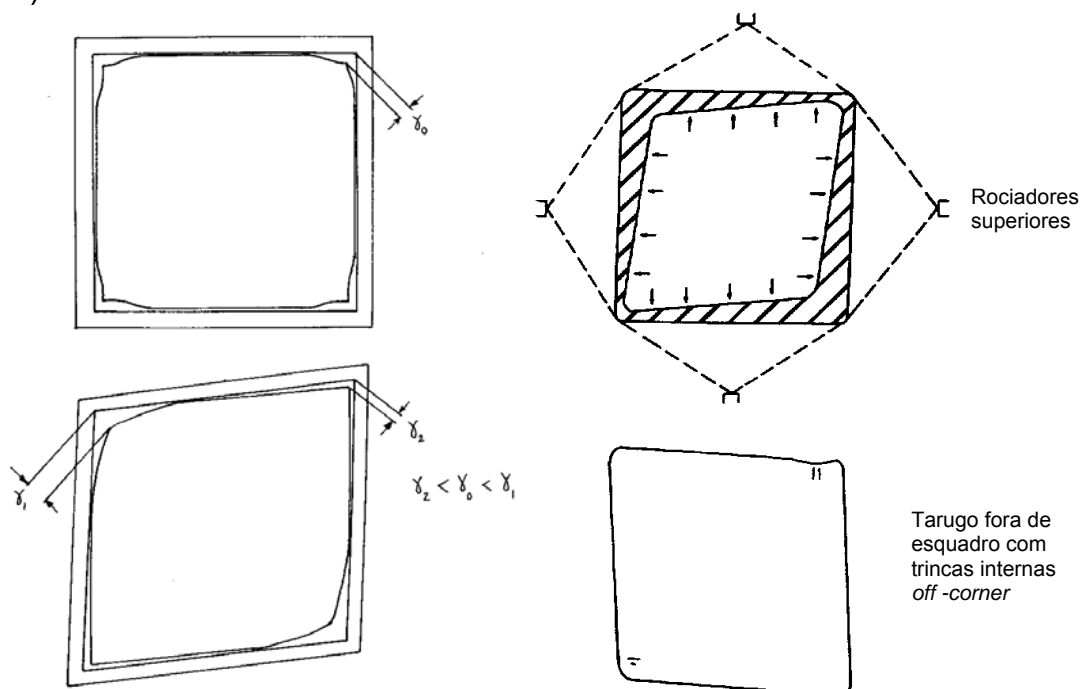


Figura 6. Mecanismos propostos para a geração da romboidade. Esquerda: acima: molde e veio normal; embaixo: molde com romboidade e romboidade aumentada no veio.⁽¹²⁾ Direita: tarugo quadrado, mas com casca de espessura variável, virando rombóide no resfriamento secundário.⁽¹³⁾

O mecanismo proposto inicialmente explica bem o fato conhecido da observação de cortes transversais macroatacados como os da Figura 2, de que o canto obtuso tem menor espessura de casca à saída do molde do que o canto agudo, por conta do maior espaço entre o molde e o veio, diminuindo assim a transferência de calor. Porém, seria difícil explicar uma romboidade grande, já que a distorção do molde está longe de ser tão importante.

Com respeito às causas para a solidificação não uniforme no molde tem-se proposto diversas razões. Nos primeiros trabalhos enfatiza-se nas marcas de oscilação, mais profundas nos cantos obtusos; a distorção do molde (por fervura intermitente da água, mal alinhamento entre o molde e a camisa d'água, formação de depósitos por baixa qualidade da água) e o resfriamento secundário.⁽³⁾

Posteriormente são levados em conta aspectos como as variações de nível de aço no molde, a resposta do óleo de lubrificação e sua influência sobre a transferência de calor.

Algumas das causas dificilmente ocorrem em máquinas modernas e bem mantidas. Outras são mais complexas de resolver e podem explicar que o problema de



romboidade seja ainda hoje muito comum na partida de máquinas novas de concepção atualizada, particularmente nos casos onde a produção de vergalhão é a dominante no mix de produtos.

A argumentação em relação à influência das variações de nível é a seguinte:⁽²⁾

O óleo muda de estado com a temperatura (líquido – fervura – vapor), e essa mudança traz uma grande variação na transferência máxima de calor. Por exemplo, a Figura 7 mostra os resultados industriais de transferência máxima de calor no molde versus a temperatura da face quente do molde, para os três estados do óleo.⁽²⁾

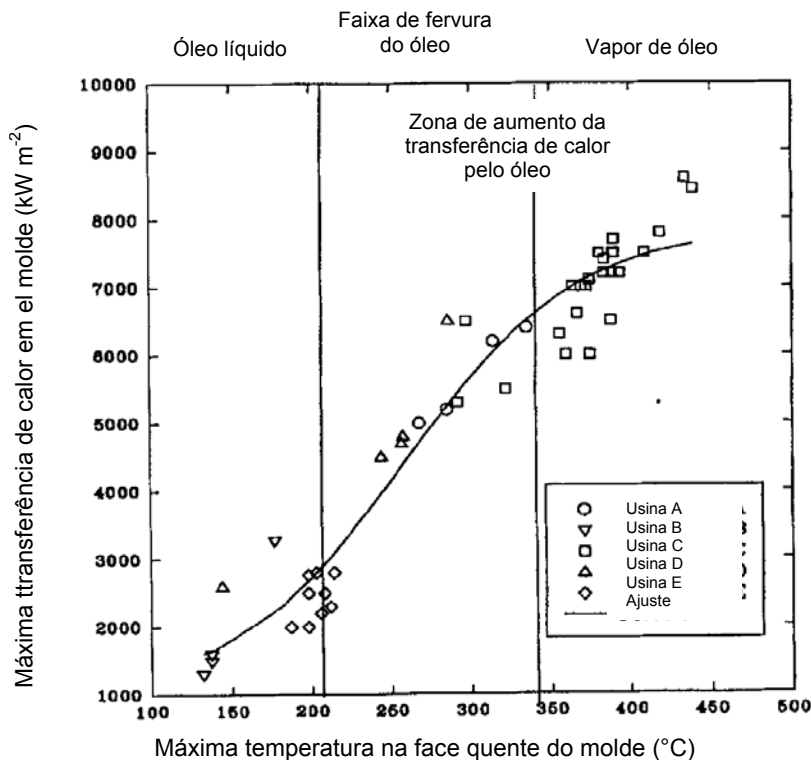


Figura 7. Máxima transferência de calor molde em função da máxima temperatura na face quente do molde, segundo medições em diferentes usinas.⁽²⁾

Se o molde estiver quente, a região perto do menisco estaria “seca”. Se o menisco sobe, a temperatura máxima do molde o acompanha, de uma região sem óleo a outra com óleo líquido. Quando isso acontece, o óleo vaporiza e a transferência de calor cresce 20%. Se pelo contrário, o menisco desce, a temperatura máxima do molde move para uma região com pouco óleo. Neste caso não vai ter lugar um aumento da transferência de calor (a menos que em partes localizadas o veio tenda a colar-se ao molde, devido ao atrito).

Em definitivo, quando o nível de metal sobe em uma parte e desce em outra, a variação de nível implicar uma diferença na espessura da casca entre ambas as regiões. Isso é ratificado pelo fato de que os tarugos com romboidade maior apresentaram grandes variações do nível de aço (Figura 8).

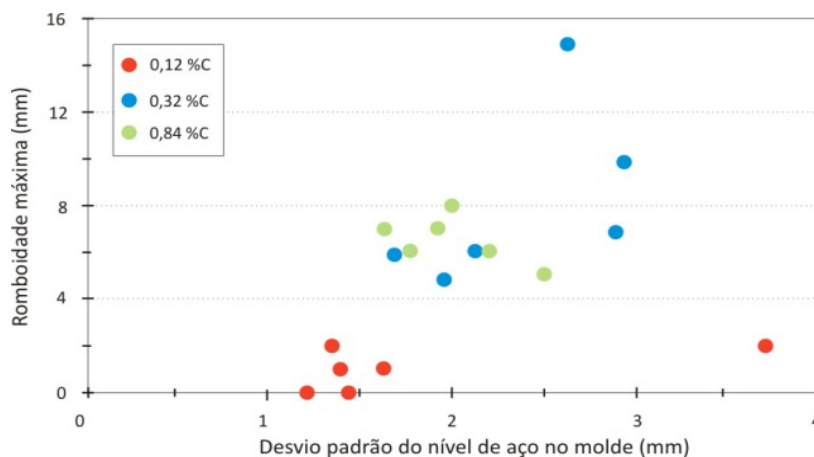


Figura 8. Efeito de variações do nível de aço no molde sobre a romboidade.⁽²⁾ Blocos de 208 mm x 208 mm.

Mais um argumento em favor da importância da transferência de calor e o controle do nível de molde é dado pelo fato de tarugos obtidos mediante lingotamento submerso e lubrificação com pó fluxante usualmente não apresentar uma romboidade significativa (comparação na Figura 9).⁽¹⁴⁾ Por exemplo, foi verificado em um estudo em particular, que a máxima transferência de calor ao nível do menisco foi de uns 2.500 kW m^{-2} , quase a metade da registrada com óleo como lubrificante.

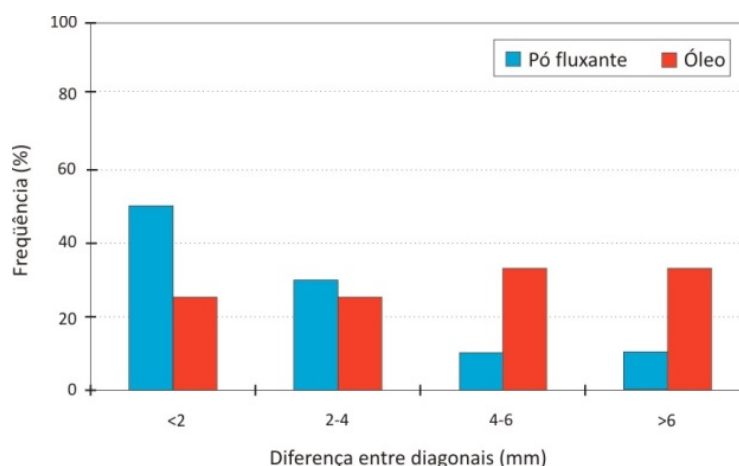


Figura 9. Ocorrência de tarugos com romboidade para lingotamento com jato aberto e lubrificação com óleo e lingotamento submerso e lubrificação com pó fluxante.⁽¹⁴⁾

De uma maneira geral, parece que ainda é necessário pesquisar mais para se ter uma maior clareza sobre o mecanismo que dá origem à romboidade e evitar que o problema aconteça ainda hoje em máquinas modernas e bem equipadas, bem mantidas e bem operadas.

6 EXPERIÊNCIAS INDUSTRIAIS

Na literatura dos anos 1980, a solução proposta nas plantas tem relação com a conicidade do molde (moldes paralelos ou com conicidade única ainda eram utilizados); o alinhamento entre o molde, a camisa de água e o portalingoteira; a velocidade e a pressão da água de resfriamento primário, mudanças no resfriamento secundário tendentes a concentrar o resfriamento na saída do molde etc.^(8-9,15,16) As



condições desse período eram de baixas velocidades de lingotamento, moldes curtos, conicidade única e pequena, velocidades de água baixas.

Hoje nas máquinas modernas os moldes são de um comprimento maior, a fervura da água no molde não é um problema, a centragem dos moldes é mais segura, mas o problema continua a ocorrer. Deve-se levar em conta que as velocidades de lingotamento atuais quase duplicam as velocidades típicas dos anos 1980, para a mesma seção, o que poderia ser uma das causas da persistência do problema.

Como mencionado na introdução, na última década tem-se apresentado muitos casos de romboidade na partida de máquinas de lingotamento contínuo de concepção moderna.

Por exemplo, a Gerdau Açominas partiu uma máquina de cinco veios em 1999. Em 2001 produzia um milhão de toneladas, 35% de aço de médio carbono. Perto de 20% do sucateamento de tarugos nesse ano foi por causa da romboidade.⁽⁷⁾ Um plano de melhora, que deu certo, teve um número de ações tão grande que é difícil deduzir quais foram os fatores de maior peso:⁽⁷⁾

- Reduzir 35% o teor de enxofre visado;
- cuidados com montagem das válvulas no distribuidor;
- superaquecimento no distribuidor entre 25°C e 30°C;
- limitar velocidade de lingotamento em 3,6 m/min máxima;
- iniciar campanha com molde novo, inspecionar o molde em 60 corridas, se em bom estado, continuar até 120 corridas; logo se em bom estado vai para o estoque para serem usados para outros tipos de aço;
- reduzir nível de aço no molde de 70% para 55%;
- todos os moldes com rolos de pé e duplo estágio em todos os veios, com folga negativa (1º rolo -0,1 mm; 2º rolo -0,2 mm);
- comissão interna para cuidar de alinhamento, obstrução dos bicos e substituição dos bicos no resfriamento secundário; e
- reduzir 10% a pressão da extratora.

Similar situação foi reportada na ArcelorMittal Monlevade. Ante um aumento de sucateamento de tarugos por romboidade em 1999, uma equipe de trabalho levou a cabo uma atividade para resolver o problema, encontrando que a romboidade ocorria em poucos veios, que reduzindo a velocidade de lingotamento normalmente conseguia-se uma melhoria nos resultados; que os casos mais graves ocorriam com moldes muito usados e que algumas ocorrências não podiam ser explicadas com base nesses parâmetros.⁽¹⁷⁾

Dentro das ações implantadas para reverter os elevados índices de sucateamento pode-se citar:⁽¹⁷⁾

- Solução de defeitos eletro-mecânicos existentes;
- alinhamento geral da máquina de lingotamento contínuo;
- revisão do sistema de resfriamento secundário;
- redução do superaquecimento do aço no distribuidor; e
- adequação e monitoramento das águas de resfriamento.

Posteriormente com a partida de um novo alto forno mudaram as condições ao aumentar a velocidade de lingotamento, diminuir a disponibilidade da máquina para manutenção, ter variações do sobreaquecimento, e ter os equipamentos com sobrecarga. Foram feitos experimentos para os aços de médio e alto teor de carbono, variando em forma simultânea o nível de aço no molde, a velocidade de lingotamento e a vida da lingoteira; a aplicação dos resultados foi bem sucedida.⁽¹⁷⁾



A ArcelorMittal Piracicaba teve uma importante ocorrência de romboidade na partida da máquina de lingotamento contínuo em 2001, chegando até um nível de 11% de corridas com romboidade sobre o total de corridas produzidas, no mês de dezembro.⁽⁵⁾ O plano de ação, baseado na metodologia das seis sigmas, teve um número importante de ações:

- Melhorar o alinhamento das camisas d'água;
- reduzir a campana dos moldes a um máximo de 670 horas;
- padronizar e aferir os medidores de pressão e vazão de água;
- posicionar os rolos de pé, de maneira a possibilitar a interferência sobre as faces do tarugo;
- reduzir a taxa de resfriamento de água primária; e
- estabelecer critérios para limpeza e troca de bicos de spray, troca e alinhamento de bananas e checagem do sistema após verificação do trabalho.

Um caso apresentado pela Villares Metals em 2005, trata do problema de romboidade (e trincas *off-corner*) no lingotamento de tarugos de aço válvula martensítico SAE HNV3 (C 0,45%, Si 3,15%, Cr 8,2%). Observou-se em cortes transversais macroatacados que a severidade das trincas off corner era maior à medida que a diferença das diagonais atingia valores próximos a 10 mm.⁽¹¹⁾ Por metalografia encontraram-se carbonetos de cromo, situação semelhante àquela encontrada na região dos defeitos em algumas válvulas.

As medidas tomadas foram as seguintes:

- Ajustes dos rolos de pé: alinhamento dos dois conjuntos de rolos; folga máxima de 0,25 mm (anteriormente 1 mm);
- resfriamento secundário: várias modificações para assegurar vazão uniforme de água;
- mesa de oscilação: nivelamento; e
- refrigeração do molde: modificação para aumentar a vazão em 150 l/min e atingir uma velocidade de passagem de água de cerca de 8 m/s; introdução de desmineralizador e medidores de vazão.

Recentemente, um estudo apresentado por uma usina chinesa, a Xianjiang Bayi Iron & Steel Corporation, apresentou como soluções ao problema de romboidade na máquina de lingotamento No. 2 da aciaria No. 1 um incremento do consumo específico de água no resfriamento secundário, de 1,73 l/kg a 1,83 l/kg e um encurtamento do tubo lateral do secundário de 172 mm para 127 mm.⁽¹⁸⁾

Em outros casos deste século, agir sobre só um fator tem dado resultados imediatos. Por exemplo, em uma usina sul-americana foi decisiva a utilização de folga negativa nos rolos de pé e em outra, o alinhamento da camisa de água com o molde.⁽¹⁹⁾

A impressão é que cada usina tem uma situação específica no que diz respeito a velocidade de lingotamento, *design* do molde, prática operacional, uso ou não de rolos de pé, configuração da primeira zona de resfriamento secundário, etc., e que nem sempre as soluções adotadas em uma usina podem dar resultados favoráveis em outras.

7 CONCLUSÕES

A romboidade é um problema antigo do lingotamento contínuo de tarugos, particularmente quando se utiliza óleo como lubrificante entre o veio e o molde. Porém continua-se informando ocorrências do defeito, mesmo em máquinas de



concepção moderna, em usinas conhecidas por ter boas práticas de operação e manutenção.

Originado no molde, provavelmente nos primeiros centímetros solidificados, e ligado com as características do aço e com a transferência de calor no molde, o problema tem sido atribuído geralmente a condições não uniformes do resfriamento primário.

As estratégias utilizadas para minimizar sua ocorrência variam de planta a planta e mesmo em diferentes situações operacionais de uma dada máquina.

Do ponto de vista de pesquisa, falta ainda uma explicação aprimorada dos mecanismos para sua formação, já que os propostos na literatura só explicam parcialmente a geração do problema.

Agradecimentos

Ao Dr. Carlos Alberto Pinheiro, SABIC, Al-Jubail, Arábia Saudita e ao Eng. Bruno Hoppe, AboutFurnaces, Porto Alegre, Brasil, pela revisão do trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 BRIMACOMBE, J.K.; SAMARASEKERA, I.V.. *Curso de Colada Contínua de Palanquillas, Tochos y Planchones*. San Nicolás, Argentina, Noviembre de 1999, G. 17
- 2 KUMAR, S.; SAMARASEKERA, I.V.; BRIMACOMBE, J.K.. *Mold thermal response and formation of defects in the continuous casting of steel billets, Part 2: Rhomboidity*. Iron & Steelmaker December 1998 pp. 51-66.
- 3 BOMMARAJU, R.; BRIMACOMBE, J.K.; SAMARASEKERA, I.V.. Mould behaviour and solidification in the continuous casting of steel billets. III. Structure, solidification bands, crack formation and off-squareness. ISS Transactions, Volume Five, 1984, pp. 95-105.
- 4 MADIAS, J.. *3º Curso Internacional de Lingotamento Contínuo de Tarugos e Blocos*. Buenos Aires, outubro 2011.
- 5 GARCIA DE CAMPOS, J.M.; BELLIGOLI, M.; RODRIGUES JÚNIOR, J.L.; BARROS RIBEIRO, D.; DÉLBOUX ROCHELLE, C.E.; DE OLIVEIRA AMARAL MELLO, L.G. *Redução da romboidade em tarugos de aços médio carbono destinados a laminação de barras*. XXXIV Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, maio 2003, Belo Horizonte, MG, p. 354-364.
- 6 HOPPE, B., AboutFurnaces, comunicação privada, dezembro 2012.
- 7 DE SOUZA MONTEIRO LISBOA, R.; ASSUNÇÃO, A.L.; DE CARVALHO GONÇALVES, M.A.; CAMPANHARO DOS SANTOS, V.; TACONI, L.L.. *Romboidade em tarugos de aços médio carbono de lingotamento contínuo*. XXXIII Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, maio 2002, Santos, SP., p. 49-57.
- 8 KRUELSKIS, V.; COOK, J.. *The influence of mould tube taper and distortion on cast billet quality*. 1988 Steelmaking Conference Proceedings pp. 349-352.
- 9 ZIB, H.P.; OVERGAARD, J.; BAARE, R.D.. *How the rhomboidity problem was solved at DDS*. Continuous Casting Conference 1985, The Institute of Metals, D3.1-D3.8.
- 10 DHINDAW, B.K.; ANTONSSON, T.; TINOCO, J.; FREDRIKSSON, H.. *Characterization of the peritectic reaction in medium alloy steel through microsegregation and heat-of-transformation studies*. Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 35A, September 2004, pp. 2069-2879.
- 11 MANFRIN, A.C.; LIMA LEMOS, A.; PESSOA RAMOS, B.; RAMALHO JUNIOR, J.; SILVA MARTINEZ, J.; DE OLIVEIRA, M.E.; FERREIRA DE ANDRADE, N.; CONSTANTINO, R.; VIEIRA DA SILVA, R., DOS SANTOS, Z.M.. *Minimização da romboidade dos billets de aços válvulas martensíticos e sua relação com parâmetros mecânicos operacionais da máquina de lingotamento contínuo*. XXXVI Seminario de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, Vitória, ES, maio 2005, p. 292-301.



- 12 SAMARASEKERA, I.V.; BRIMACOMBE, J.K.. *The influence of mold behavior on the production of continuously cast billets*. Metallurgical Transactions B, Volume 13B, March 1982, pp. 105-116.
- 13 BOMMARAJU, R., BRIMACOMBE, J.K., SAMARASEKERA, I.V. *Mould behaviour and solidification in the continuous casting of steel billets: III. Structure, solidification bands, crack formation and offsquareness*. Transactions of the Iron and Steel Society of AIME, 5, 1984, pp. 95-105.
- 14 PINHEIRO, C.A.M.; SAMARASEKERA, I.V.; BRIMACOMBE, J.K.; WALKER, B.N. *Mould heat transfer and continuously cast billet quality with mould flux lubrication Part 1 Mould heat transfer*. Ironmaking & Steelmaking, Volume 27, No. 1, February 2000, pp. 37-54.
- 15 KRUIJELSKIS, V.; COOK, J.. *Initial experience with a new billet/rounds caster – Factors influencing billet rhomboidity*. Proceedings International Conference on Continuous Casting, Brussels, Belgium, May 1988, pp. 447-454.
- 16 KNIGHTS, R.A.; HUMPHREYS, D.E.; PERKINS, A.. *Billet caster operation at BSC Scunthorpe*. Ironmaking and Steelmaking, Vol. 13, N° 1, 1986, pp. 32-39.
- 17 DE MACEDO BOSCO, M.A; RIBEIRO, W.J.; BORGES DE MOURA, R.; BORNACKI, A.A.; ALVES, J.E. *Análise e solução do problema de romboidade em tarugos através de fundamentos de seis sigmas*. 56º Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte, MG, julho 2001, 1228-1236.
- 18 CAO, ZH.-G.; WANG, J.-X.; XU, W.-Y.; LI, Y.; DU, ZH.-Z.,; WANG, CH.-B.. *Analysis and controlled rolling of rhomboidity of small HRB335 steel continuous casting billet*. Physics Examination and Testing, 2011, Vol. 29, issue 4, pp. 48-52.
- 19 Maurino, R.J.; comunicação privada, novembro 2011.