

AUMENTO DA PRODUTIVIDADE E MELHORIA DA QUALIDADE NA MÁQUINA DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DA BELGO MINEIRA JUIZ DE FORA⁽¹⁾

*Emanuel Villanova⁽²⁾
Tarcísio Bomtempo Martins⁽³⁾
André Martins de Araújo⁽⁴⁾
Thiago Luiz Coelho Furtado⁽⁵⁾
Pedro Luiz de Souza⁽⁶⁾
Robson Ferreira Maciel⁽⁷⁾*

Resumo

Em um processo contínuo que conta com a participação de vários equipamentos, o equipamento mais lento é que ditará a produtividade de todo o processo. O trabalho que se segue relata as mudanças realizadas na máquina de lingotamento contínuo (MLC) que retiraram seu título de “gargalo” de produção. As alterações envolveram toda MLC, desde a geometria do molde passando pelo sistema de lubrificação, refrigeração primária e secundária até alguns procedimentos operacionais. Os resultados obtidos foram: incremento de produtividade de aproximadamente 17 t/h (13%), redução de problemas de forma no tarugo e o perfeito sincronismo da MLC com o forno elétrico a arco (FEA), o que possibilitou aproveitar 100% da capacidade de toda a aciaria.

Palavras-chave: lingotamento contínuo; melhoria; produtividade; romboidade

⁽¹⁾ XXXVI Seminário Internacional de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais – 16 a 18 de maio 2005. Espírito Santo - Brasil

⁽²⁾ Graduado em Administração (FMG) – Técnico Metalurgista (CTU).

⁽³⁾ Graduado em Engenharia Metalúrgica (UFOP) – Pós-graduado em Gestão Estratégica da Produção Industrial (UFJF) – Mestre em Metalurgia (UFMG).

⁽⁴⁾ Graduado em Ciências Econômicas (IVJ) – Graduando em MBA Gestão Empresarial (FGV).

⁽⁵⁾ Graduado em Engenharia Metalúrgica (UFMG).

⁽⁶⁾ Graduado em Engenharia Civil (UFJF).

⁽⁷⁾ Graduado em Administração (FCCAMS) – Pós-graduado em Sistemas e Processos de Produção (UFRJ/SENAI).

OBJETIVO

O processo de fabricação de aço em uma aciaria é resultante do sincronismo de produção e produtividade de diversos equipamentos. O descompasso entre estes equipamentos leva a perdas de produção e ociosidade do equipamento mais produtivo. Buscar o ajuste deste sincronismo permitindo o máximo aproveitamento da capacidade instalada de cada equipamento é um desafio constante para os aciaristas. A importância em se obter o máximo das instalações vem da necessidade premente de conseguir-se retorno de investimento, maximizar lucros pela diluição de custos fixos e obter o maior faturamento possível. Ao mesmo tempo em que se busca alta produtividade, a qualidade tem participação decisiva no volume produzido, pois rejeitos e desvios são redutores destes. Algumas aciarias apresentam a máquina de lingotamento contínuo (MLC) como equipamento limitante da produção. Este trabalho discorre sobre um bem sucedido projeto de aumento de produtividade aliado a ganhos significativos de qualidade. O desafio de incrementar as velocidades de lingotamento contínuo torna-se mais complexo quando a preocupação passa pela qualidade do produto. Com uma visão mais holística da produção e enxergando o processo seguinte (laminação) como parte integrante de um só projeto nos propusemos que a consolidação de resultados deveria registrar ganhos em nosso cliente.

A Aciaria da Belgo Mineira Siderurgia iniciou suas operações em 27 março de 1984 produzindo tarugos via lingotamento contínuo, em uma máquina de fabricação *Concast* de 04 veios, com 6 metros de raio de curvatura e secção quadrada de 130mm. A capacidade nominal de produção da planta instalada era de 360.000 t por ano, produção esta superada em 1985 com 371.000 t produzidas.

No final do ano de 2000 a Aciaria passou por uma reforma quando foram instaladas queimadores de gás natural, sistema de vazamento excêntrico e aumentado o volume útil do FEA (*Paul Whurt*), nesta mesma data a MLC recebeu um novo veio, foram trocados os sistemas de monitoramento e instalado um controlador de processo do nível dois (*Danieli*). Até a implantação do 5º veio a MLC apresentava como melhor resultado anual uma produtividade de 101 t/h (produtividade sem paradas) o FEA superava então a MLC em 4t/h, deixando assim caracterizado a MLC como gargalo de produção. Após a reforma o quadro se manteve estável o FEA ainda superava a MLC em 4 t/h.

Neste trabalho será abordado o que foi feito para equalização deste quadro de desequilíbrio, os resultados obtidos com a implantação das modificações o efeito no volume de produção e rejeitos.

RESULTADOS ALCANÇADOS

Produtividade

Com o incremento do aporte de energia química no FEA houve um incremento da produtividade deste equipamento, no gráfico 1 observamos esta evolução. Surgindo então a necessidade de incrementar a produtividade da MLC, em níveis semelhantes aos obtidos no FEA. Todo esforço despendido nas alterações de configuração da MLC com objetivo de incrementar a velocidade de lingotamento e a produtividade surtiram efeitos que superaram as expectativas face ao *mix* de aço produzido e ao baixo valor investido. Evolução apresentada no Gráfico 2.

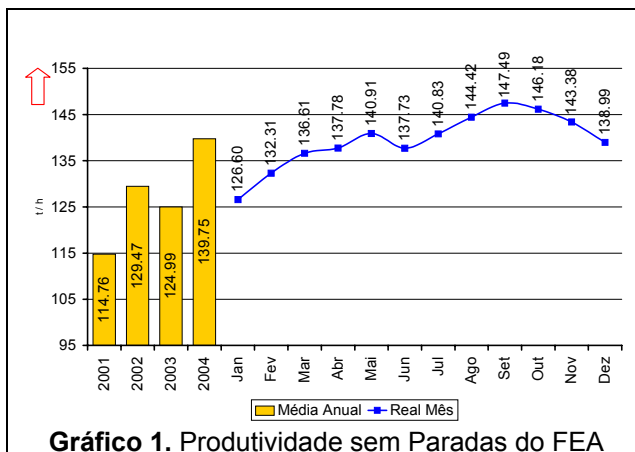


Gráfico 1. Produtividade sem Paradas do FEA

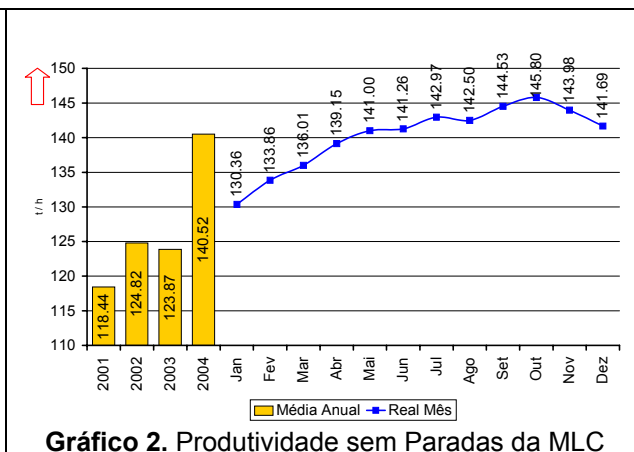


Gráfico 2. Produtividade sem Paradas da MLC

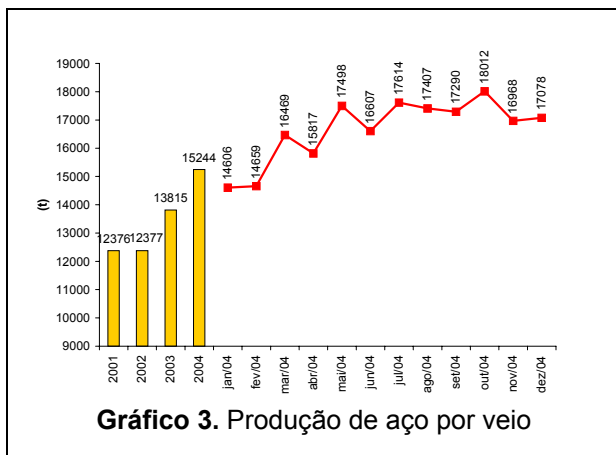


Gráfico 3. Produção de aço por veio

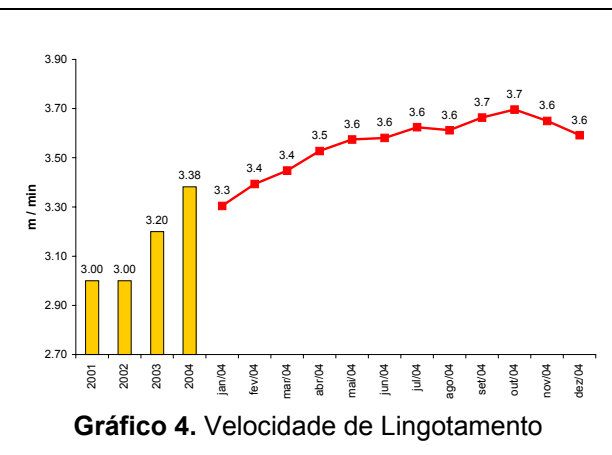


Gráfico 4. Velocidade de Lingotamento

Os Gráficos 5 e 6 apresentam o efeito das mudanças na disponibilidade do FEA com a redução de paradas do FEA pela MLC.

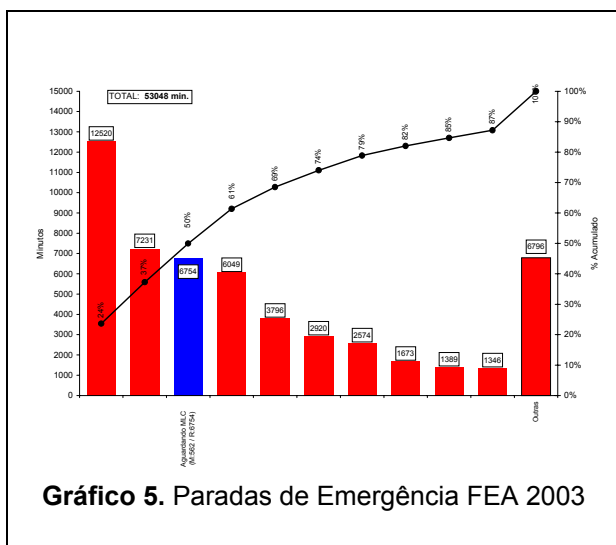


Gráfico 5. Paradas de Emergência FEA 2003

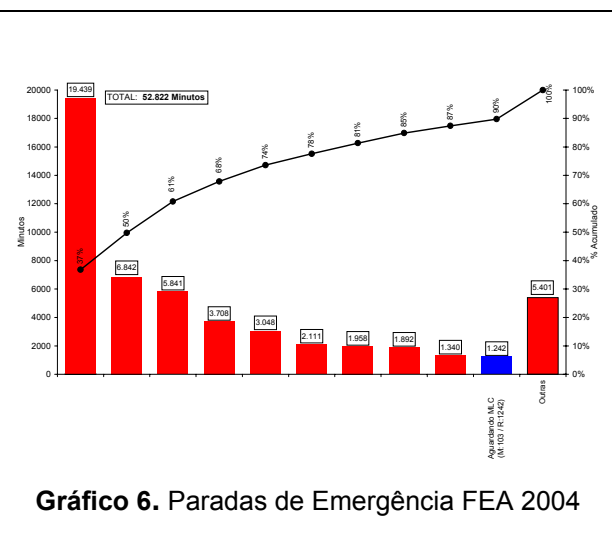


Gráfico 6. Paradas de Emergência FEA 2004

Qualidade

Um dos problemas que afetam às máquinas de lingotamento contínuo de forma geral é a ocorrência de romboidade. No caso da planta da Belgo Juiz de Fora, as

perdas atingiam valores de até 90 toneladas por mês com uma perda anual média de 516 toneladas. Além das perdas diretas de produção, variações de forma, quando não detectadas na Aciaria, causam defeitos e/ou sucateamentos dos produtos laminados. Desta forma o Índice de Qualidade do Produto Laminado (IQPL) é o reflexo no nosso cliente das nossas melhorias.

É fácil perceber a evolução no IQPL PA/ES que é um índice de responsabilidade direta da Aciaria, entre 2003 e 2004. A redução do rejeito por Palha/Escama, está relacionada com a estabilidade de forma do tarugo conseguida com este trabalho.

O aumento de 0,42% no IQPL evidenciado no gráfico VIII, representa 4.200 toneladas de ganho na produção, o que também é evidenciado no gráfico IX com o grupo MB, que são aços de maiores exigências no processo de Laminação e Trefilaria, apresentando aumento de 0,64 % no IQPL refletindo 889 toneladas de ganho na produção.

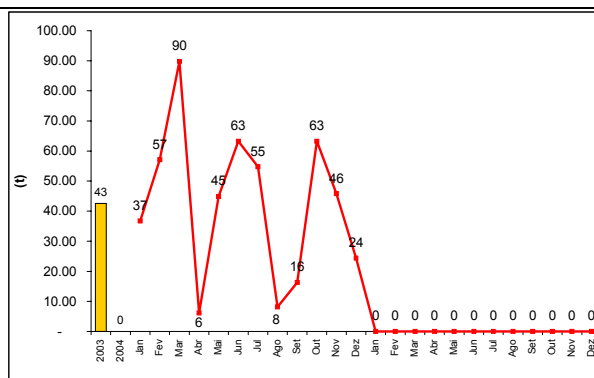


Gráfico 7. Perdas por Romboidade (t)

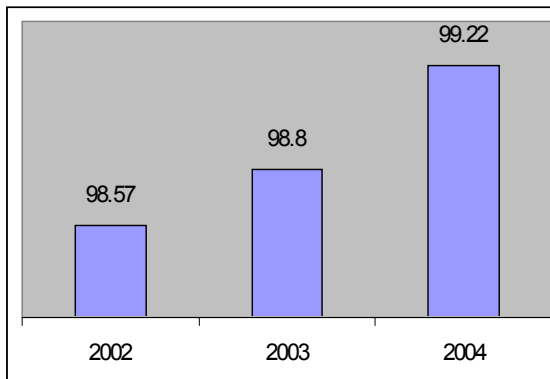


Gráfico 8. Índice de Qualidade do Produto Laminado Geral – IQPL

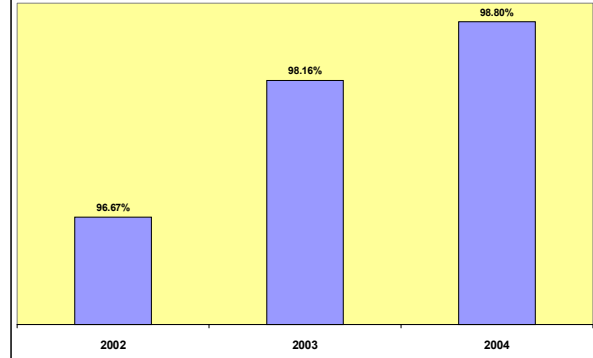


Gráfico 9. Índice de Qualidade do Produto Laminado MB – IQPL PA/ES

METODOLOGIA

A obtenção de velocidades elevadas em um lingotamento contínuo passa por diversas dificuldades que são abordadas por *Wolf e Rischka* com sugestões para obter-se o produto adequado conforme observado na Tabela 1.

Tabela 1. Requisitos para Lingotamento a altas velocidades

Estágio do processo	Propósito
Tratamento do aço	
Forno panela	Controle de temperatura
Medida de atividade de oxigênio	Controle de desoxidação
Panela	
Cobertura	Controle da temperatura do aço
Molde	
Partida automática e controle de nível	Segurança operacional e qualidade superficial
Conicidade parabólica e material de alta resistência	Melhorias no crescimento da pele solidificada com o mínimo de abaulamento e romboidade
Agitador eletromagnético	Crescimento uniforme da pele solidificada, prevenção de arraste de escória sub-superficial.
Monitoramento de fricção	Otimização da lubrificação
Guia do veio	
Concepção do secundário,	Solidificação uniforme
Endireitamento contínuo com alívio da pressão nos rolos	Prevenção de trincas internas
Sistema rígido de barra falsa	Tempo pequeno de retorno

Controle de Temperatura

O *superheat* do aço é função direta da velocidade de lingotamento a ser adotada, já que o tempo de permanência do aço na panela e no DI são fatores de forte influência na determinação de temperatura de ajuste no Forno Panela. Baseado em dados empíricos observados em 2750 corridas adotamos como perda de temperatura 0,7°C/ min de residência de aço na panela. A medida em que se projetam reduções no *Tap to Tap* de lingotamento aplica-se proporcionalmente este efeito no tempo de residência do aço na panela permitindo um ajuste mais fino nas temperaturas objetivadas de lingotamento.

Do comportamento do aço no distribuidor observa-se que a redução de 20% do *Tap to Tap* permite uma queda de 5 a 10°C no delta T (diferença entre a temperatura liquidus e a objetivada para lingotamento), desprezar esta variável leva a um efeito contrário. O excesso de *superheat* prejudica a espessura da pele solidificada logo abaixo do molde podendo levar a *break out* (perfurações) com características de trincas longitudinais próximas à aresta.

Os estudos destes parâmetros nos permitiram adotar valores de delta T que variam entre 15°C e 30°C. Outra prática adotada foi à redução da tolerância da faixa de temperatura de lingotamento com o objetivo descentrado e tendendo a temperatura mínima. Como efeito benéfico observamos uma redução significativa no consumo de

energia e eletrodos no Forno Panela, embora este não tenha sido o objetivo principal do trabalho.

Controle de desoxidação

Com a utilização de Alumínio e CaSi, adotou-se um controle rígido do oxigênio dissolvido no banho metálico em aços com teor de carbono baixo. O nível de oxidação permitido varia entre 5 e 40 PPM dependendo do grau do aço e da composição química do mesmo, levando em conta a possibilidade de ocorrências de *clogging* por baixa atividade do oxigênio ou pela formação de Al_2O_3 que tem elevado ponto de fusão (2050°C), já que a Máquina de Lingotamento Contínuo em questão opera 100% do tempo com jato aberto. Em alguns momentos observa-se não a obstrução total do canal de passagem das válvulas, mas uma queda significativa da velocidade de lingotamento e a formação de respingos em torno do canal da válvula, este é um fator a ser controlado para quem objetiva aumento de produtividade na MLC. Os resultados ao se adotar tais controles apontaram para uma melhoria significativa na qualidade superficial dos tarugos com redução de *pin-holes* e conseqüente redução dos rejeitos no fio máquina por palha oriunda de poros, bem como uma estabilidade maior nas velocidades de lingotamento.

Controle da Temperatura do Aço na Panela.

Na maioria das Usinas adotam-se pós-isotérmicos ou palha de arroz na cobertura do aço líquido na panela. Porém estes materiais acabam por adicionar ao processo quilos de sílica indesejáveis, embora alguns isolantes existentes tenham forte participação de MgO e CaO, sabemos que a escória é um isolante térmico de alta eficiência. Com base neste referencial adotamos a prática de utilizar a escória como isolante térmico, após o tratamento químico no FP adicionam-se formadores de escória em quantidades suficientes para que ocorra o isolamento térmico necessário.

Controle do nível no molde e partida automática.

Em nossa usina a utilização de controle automático de nível eletromagnético (CAN) tornou-se inviável por utilizarmos agitador eletromagnético no molde - MEMS. Ocorre que a operação conjunta dos dois sistemas causa perturbação no campo magnético do CAN tornando-o extremamente instável e causando variações no nível que prejudicavam a tentativa de lingotar em altas velocidades. Adotamos, então, a utilização de fonte radioativa de baixa emissividade (Co60). Esta modificação nos permitiu trabalhar com variações de mais ou menos 5% no nível do molde quando anteriormente estas variações atingiam até 40%.

Destacamos também a importância do deslocamento do nível do menisco de 170 para 100mm, isto por que visualizamos a necessidade de um melhor aproveitamento do comprimento total do molde e um melhor aproveitamento do primeiro *taper* das lingoteiras.

As diferenças são muito significativas quando observamos a relatividade das mesmas com o comprimento do molde e o comprimento do primeiro *taper*. Isto significa dizer que houve um aumento de 10% no comprimento de contato do tarugo com o molde ao crescermos 70mm no nível do menisco, já que utilizamos lingoteiras

de 800mm e temos um descolamento nos últimos 100mm. O aproveitamento do 1º *taper* passou de 6 para 40%.

Modificação do molde

Entre todos os diferentes elementos no aço, o carbono é aquele que mais influencia o fluxo do calor. Observando-se a transferência de calor e crescimento da casca em tarugos que contém quantidades variadas de carbono, pode-se dizer que: com configurações semelhantes fixas de moldes, a transferência de calor e o crescimento da casca são mínimos com aproximadamente 0,12% de carbono e máximas com aproximadamente 0,40% de carbono.

Ou seja, a diferença de perfis de contração faz a composição química do aço um dos aspectos chave na determinação tanto das dimensões de saída do molde (para acomodar a contração) assim como do grau de conicidade do mesmo.

O ideal é que pudéssemos trabalhar com moldes de geometria diferentes para cada grau de aço, porém esta prática inviabilizaria o lingotamento de nossa usina devido à gama de aços nela produzidos. A linha adotada para selecionar o molde mais adequado passou pela avaliação do pareto do *mix* de produção e do pareto dos resultados de qualidade. Esta análise apontou como prioridade aços que são classificados como peritéticos. Dessa forma, estes aços foram determinantes na geometria do molde. Na configuração geométrica do molde levamos em conta a necessidade de crescimento da região de *taper* mais elevado, localizada na parte superior da lingoteira, adotamos um crescimento desta região em torno de 17% em relação ao valor inicial em contra partida adotamos um *taper* mais suave na saída do molde correspondendo a uma redução 43% em relação ao valor de *taper* que utilizávamos.

Agitação Eletromagnética

Este equipamento já existia, porém tem sua parcela de contribuição no incremento de velocidade pela melhoria da estrutura de solidificação interna do tarugo pela eliminação de mini lingotes, gerando uma estrutura equiaxial. Além das melhorias superficiais e subsuperficiais, a espessura da pele solidificada ficam mais uniforme permitindo ganho significativo na velocidade de lingotamento e segurança contra *break-outs*.

Otimização da Lubrificação

Com base nos estudos desenvolvidos por Brimacombe,⁽²⁾ adotamos as características físico-químicas sugeridas, para o nosso óleo de lubrificação. Ainda dentro da abordagem de Brimacombe grande importância é dada a distribuição do óleo lubrificante nas faces do molde de maneira mais homogênea possível, evitando concentrações em pontos o que é comum no sistema de lubrificação tradicional. Foi necessário modificar todo o nosso sistema de lubrificação, desde o tipo de óleo, o sistema de alimentação e os flanges de distribuição.

A importância de trabalharmos este parâmetro está na necessidade de aumentar a eficiência da transferência de calor. Um determinado fabricante de molde, em seus estudos, atribui ao óleo e ao *Gap* de ar formado durante a utilização do mesmo a

responsabilidade de 58% de todo isolamento térmico no conjunto do molde, a saber: molde, pele solidifica, água, óleo, *gap* de ar e metal fundido.

Os resultados foram bastante satisfatórios permitindo uma homogeneidade da pele solidificada em torno de todo o molde, com isto houve um ganho na segurança para prática de velocidades elevadas.

Concepção do resfriamento secundário

O projeto do sistema de resfriamento secundário é determinado em função de parâmetros operacionais preestabelecidos via condições térmicas mais adequadas ao processo de solidificação. O desenvolvimento de um resfriamento uniforme e coerente com a temperatura da superfície do tarugo tem como objetivo manter a velocidade de solidificação relativamente elevada, uma vez que o maior objetivo é fechar o poço líquido no menor tempo e de forma mais eficiente possível.

O reaquecimento pode ocorrer quando há uma redução na taxa de retirada de calor entre o molde e o resfriamento secundário, entre os bicos do resfriamento secundário ou entre os diversos setores do resfriamento secundário.

No nosso caso, particularmente, temos confirmação empírica da forte influência do setor secundário na definição da forma do tarugo. Conseguimos diferenciar as origens dos problemas de romboidade advindos do molde e do setor secundário.

A romboidade oriunda do molde mostra-se mais instável não tendo uma tendência muita bem definida ao longo do lingotamento, ou seja, a deformação hora se dá em um sentido hora ocorre em outro sentido, bem como se observa a intermitência da ocorrência na extensão total do tarugo. Este fato pode ser explicado pelo comportamento mais instável do aço no molde bem como da água do resfriamento do molde, pois o molde esta em constante deformação durante o lingotamento criando com isto variações de *gap* e conseqüentemente de troca de calor no seu interior. Porém tendem a generalizar-se por todos os veios desde que o molde adotado seja igual em todos os veios, além disto observa-se que quando o problema é originado no molde a maior tendência para determinados graus de aço que provavelmente tem o comportamento de solidificação menos contemplado pela geometria do molde adotado.

Observamos que quando o problema inicia-se no setor secundário de resfriamento, ao contrário de quando a origem do problema é no molde, as ocorrências de romboidade tendem a concentrar-se em determinados veios, com posição bem definida e generalizam-se por um maior número de graus de aço. A explicação encontrada para este comportamento é de que os veios podem sofrer desalinhamentos de forma diferentes entre si o que levaria a concentração de ocorrências em determinados veios, pois neste momento algumas faces do tarugo poderiam estar recebendo maior volume de água que as demais, ou ainda o jato de água poderia estar atingindo de forma desuniforme determinada região do tarugo, favorecendo o reaquecimento do tarugo neste ponto permitindo com isto que haja deformações no mesmo. Neste momento a posição da romboidade é bem definida uma vez que este problema é mecânico e muito constante não sofrendo variações durante o processo como todo aço lingotado sofre exatamente o mesmo malefício o efeito se propaga para um maior número de grau de aço, sendo afetados os mais sensíveis.

Para comprovação destas conclusões interrompemos o lingotamento, de determinado veio que apresentava romboidade, e interrompemos o sistema de

resfriamento imediatamente sem, no entanto extrair o tarugo. Observamos que até determinado ponto do resfriamento secundário não existia romboidade, que aparecia posteriormente, comprovando que romboidade com as características apresentadas eram oriundas do resfriamento secundário. Repetimos o experimento para romboidades com características diferentes quando se determinou a origem molde. Para solucionar o problema modificações foram feitas na geometria do molde, como já comentado, e adotamos modificações radicais no sistema de resfriamento secundário adotando projeto de alta robustez com distribuição que contempla possíveis falhas mecânicas e entupimentos de bicos na região logo abaixo do molde. Os volumes de água foram ajustados de 1,5l/kg para valores que variam entre 1,9 e 2,1 l/kg, dependendo do grau de aço a ser lingotado, as distribuições contemplam de 60 a 70% do volume total de água nos primeiros 2,5 metros abaixo do molde e o restante até o sistema de endireitamento, ângulos e posicionamento de tubos de alimentação também foram alterados. Outro parâmetro importante e que passamos a monitorar continuamente foi a pressão de água nos diversos setores de resfriamento que deve ser mantida acima de 4 bar, isto garante que a cortina de vapor formada durante o resfriamento será quebrada não permitindo grandes prejuízos na troca de calor por isolamento térmico. Os tubos de distribuição de água foram alterados de forma que os bicos não sofrem mais deformação por esforço físico evitando com isto desalinhamentos no sistema de resfriamento. Como consequência a velocidade de lingotamento pôde ser alterada ganhando um incremento de 27% em média.

Endireitamento com baixas pressões

Para o endireitamento do tarugo adotamos os valores mínimos permissíveis pelo nosso equipamento procedendo à extração à 8 bar (projeto inicial 17bar), com isto houve um alívio das tensões superficiais do tarugo minimizando em muito o aparecimento de trincas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 WOLF, M. Can mininmills cope with high speed casting? **Steel Times Internacional**, p 16-19, março de 1989.
- 2 BRIMACOMBE, J.K.; BAAKSHI, I.A.; WALKER, N.; CHANDRA, S.; SAMARASEKARA, I.V. Mould-strand interaction in continous casting of stell billets Part 1 Industrial trial. p 112-117, abril 1992.

BIBLIOGRAFIA

- 1 BRIMACOMBE, J.K.; SMARASEKARA, I.V.; LAIT, J.E. **Continuous casting: heat flow, solidification and crack formation**. Chelsea, MI: Iron Steel Society of AIME, 1984.
- 2 BRIMACOMBE, J.K.; BAPTISTA, L. A. Spray cooling in the continuous casting of steel. **Steel Proceedings**, v.63, p.235-252, 1980.
- 3 MAHAPATRA, R.B.; BRIMACOMBE, J.K.; SAMARASEKERA, I.V.; WALKER, N.; PATERSON, E.A.; YOUNG, J.D. Mold behavior and its inflence on quality in the

continuous casting of steel slabs. Part I. Industrial trials, mold temperature measurements, and mathematical modeling. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 22B, p. 861-874, Dec. 1991.

- 4 THOMAS, B.G.; BRIMACOMBRE, J.K.; SAMARASEKERA, I.V. The formation of panel cracks in steel ingots: a state-of-the-art review. **Transactions of the Iron and Steel Society**, v. 6, p. 7-18, 1986.
- 5 YORK, R.; SPITZER, K.H. Heat transfer in the secondary cooling region on continuous casting machines. In: DECENNIAL INTERNATIONAL CONFERENCE IN SOLIDIFICATION PROCESSING, 4., 1997. **Proceedings...**

INCREASE OF PRODUCTIVITY AND IMPROVEMENT OF THE QUALITY IN THE CONTINUOUS CASTING MACHINE OF BELGO MINEIRA JUIZ DE FORA

Emanuel Villanova⁽²⁾
Tarcísio Bomtempo Martins⁽³⁾
André Martins de Araújo⁽⁴⁾
Thiago Luiz Coelho Furtado⁽⁵⁾
Pedro Luiz de Souza⁽⁶⁾
Robson Ferreira Maciel⁽⁷⁾

Abstract

In a continuous process that it counts with the participation of several equipments, the slowest equipment is that it will dictate the productivity of whole the process. The paper tells the changes made in the continuous casting machine (CCM) that removed its title of "bottleneck" of production. The alterations involved every CCM, from the geometry of the mold going by the lubrication system, primary and secondary cooling until some operational procedures. The obtained results were: productivity increment of approximately 17 t/h (13%), reduction of format problems in the billet, and the perfect synchronism of CCM with the electric arc furnace (FEA), the one that made possible take advantage 100% of the capacity of the whole meltshop.

Key-words: continuous casting; improvement; productivity; rhomboidity.