

MELHORIA DO PERFIL DA TIRA LAMINADA A QUENTE PELA OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DOS CILINDROS DE TRABALHO¹

Arísio de Abreu Barbosa²
Geraldo Magela de Faria³
Alexandre Henrique Farah Dias⁴
Gláucio Barros Barcelos⁵
Rodrigo Cabral Bumagny⁶

Resumo

Desenvolveu-se um trabalho para melhorar o sistema de refrigeração dos cilindros de trabalho o qual contou com etapas, tais como: estudo do fenômeno de expansão térmica dos cilindros, projeto de novos distribuidores, desenvolvimento de estratégia de refrigeração em função da largura da tira, dentre outras. Após implantação desse projeto, obtiveram-se resultados positivos com relação ao perfil transversal da tira e também ganhos significativos de produtividade nos materiais de espessuras finas.

Palavras-chave: Cilindros de trabalho; Laminador Steckel; *Build up*; Coroamento.

HOT STRIP PROFILE IMPROVEMENT BY WORK ROLL COOLING SYSTEM OPTIMIZATION

Abstract

An improvement on work roll cooling system was implemented and some steps were followed such as: .study of work roll thermal growth, new headers design, develop of new roll cooling strategy as function of strip width, among others. After the startup of this project, positive results have been achieved regarding the transversal strip profile and also considerable gain in terms of productivity for thin gauges products.

Key words: Work roll; Steckel mill; Build up; High spot; Strip crown.

¹ Contribuição técnica ao 46º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 27 a 30 de outubro de 2009, Santos, SP.

² Engenheiro Mecânico, M.Sc., Gerência da Laminação a Quente da ArcelorMittal Inox Brasil; Timóteo - MG.

³ Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Gerência de Metalurgia da ArcelorMittal Inox Brasil; Timóteo - MG.

⁴ Engenheiro Eletricista, M.Sc., Gerência de Automação da Laminação a Quente da ArcelorMittal Inox Brasil; Timóteo - MG.

⁵ Engenheiro Eletricista, Gerência de Automação da Laminação a Quente da ArcelorMittal Inox Brasil; Timóteo - MG.

⁶ Engenheiro Mecânico, Gerência de Metalurgia da Laminação a Quente da ArcelorMittal Inox Brasil; Timóteo - MG.

1 INTRODUÇÃO

A Arcelormittal Inox Brasil - AMIB, ao realizar o aumento do peso das placas – em média de 13 t para 23 t – deparou-se com problemas no perfil das tiras laminadas a quente, principalmente nas espessuras mais finas, abaixo de 3,7 mm. Antes da implantação do projeto, já tinha sido previsto um aumento na vazão de água do sistema de refrigeração do laminador Steckel. Isso se deu ao fato da nova condição expor os cilindros, um tempo maior em contato com a tira e também um menor tempo de refrigeração entre uma tira e outra. Mesmo com o aumento da vazão de água do sistema e a substituição dos distribuidores originais por distribuidores com maior número de bicos, não foi suficiente para se obter um bom perfil da bobina laminada a quente. Os principais problemas detectados foram: baixo coroamento, *edger build up* levando a uma substituição prematura dos cilindros de trabalho. Este procedimento, além de aumentar o consumo de cilindros acarretava perda de produtividade.

Diante deste problema, a ArcelorMittal Inox Brasil – AMIB, desenvolveu um trabalho para melhorar o sistema de refrigeração dos cilindros de trabalho em parceria com a ArcelorMittal Méditerranée – AMM - França e o Centro de Pesquisa em Metalurgia - CRM – Bélgica. Foram realizadas as seguintes etapas: estudo do fenômeno de expansão térmica dos cilindros através de modelamento matemático, desenvolvido nos laboratórios do CRM; validação do modelo matemático pelos dados reais levantados na planta da AMIB; projeto de novos distribuidores segmentados, pela equipe de engenharia e operação da AMM e AMIB; implantação do novo sistema de refrigeração e, finalmente, desenvolvimento de uma estratégia de utilização dos distribuidores segmentados em função da largura do material a ser laminado, com base nas simulações feitas pelo CRM.

Este trabalho relata os aspectos principais de cada uma das etapas acima, bem como os resultados obtidos com a implantação do projeto final, tais como: eliminação do defeito *edger build up*, menor variação do coroamento ao longo das campanhas de cilindros, aumento das campanhas de cilindros e redução do intervalo entre tiras, proporcionando ganhos significativos de produtividade nos materiais de espessuras finas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização do Defeito *Build Up*

O defeito *build-up* consiste em um aumento brusco da espessura, no sentido transversal da tira, geralmente próximo às bordas, conforme mostrado na Figura 1. Esta região, quando laminada a frio, se transforma em ondulação localizada. Associado à ocorrência eventual de cunha, gera instabilidade no processo de laminação, podendo levar até à ruptura da tira nos laminadores a frio. Esse fenômeno ocorre geralmente quando se lamina uma grande quantidade de tiras de mesma largura e espessuras abaixo de 3,7 mm, em uma mesma campanha de cilindro de trabalho.

A Figura 1 refere-se ao perfil transversal da tira medida pelo perfilômetro localizado logo após o laminador acabador. A sobre espessura nas bordas da tira, evidenciada pelos quatro últimos scans, provoca ondulações nesta mesma região da bobina, durante a laminação a frio (Figura 2).

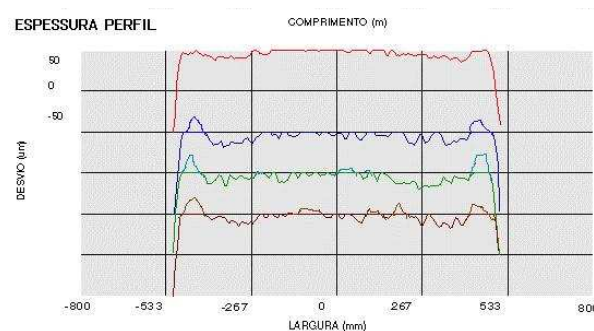


Figura 1 – Gráfico de perfil transversal da tira (4 últimos scans), com ocorrência de *Build Up* nas duas bordas.

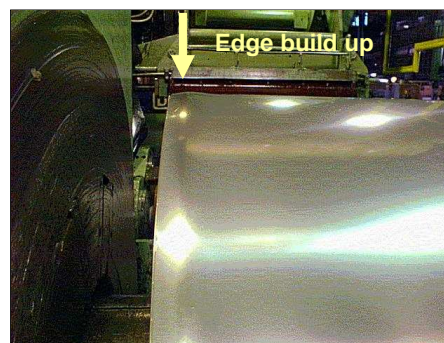


Figura 2 - Bobina laminada a frio com o defeito *edge build up*.

2.2 Evolução do Coroamento da Tira ao Longo de uma Campanha de Cilindro

Devido à dilatação térmica dos cilindros de trabalho, o perfil transversal da tira tende a variar de um coroamento inicial positivo para um coroamento baixo, próximo de zero, e muitas vezes, até negativo, à medida que os cilindros são usados numa mesma campanha (Figura 3).

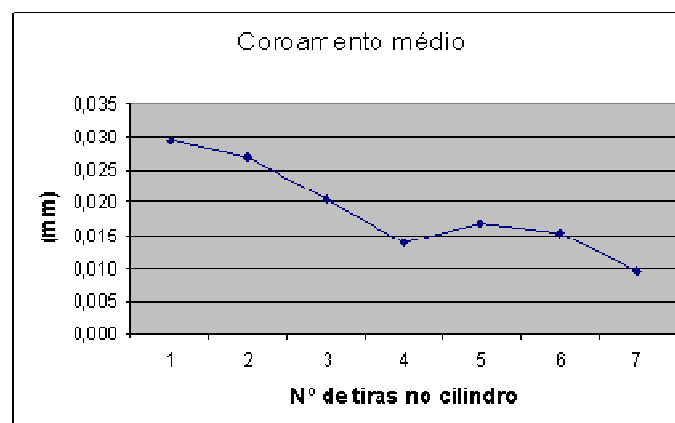


Figura 3 – Evolução do coroamento médio da tira em função do número de tiras laminadas em uma mesma campanha de cilindros de trabalho. Ref. Aço inoxidável 304.

Normalmente, é desejável que a tira laminada a quente tenha um coroamento positivo, em torno de 1% a 1,5% da sua espessura, para que se tenha um bom desempenho durante o processo de laminação a frio.⁽¹⁾ Desta forma, foi imperativo adotar, de imediato, algumas contramedidas no processo, para evitar tiras com baixo coroamento e/ou com o defeito *build up*.

As contramedidas adotadas foram:

- diminuição da coroa mecânica do cilindro de trabalho de -0,08 para -0,12 mm;
- aumento do intervalo entre tiras para 210 s;
- limitação do número máximo de tiras laminadas por campanha de cilindro; e
- programação em seqüência tipo caixão.

Todas as medidas adotadas acima foram necessárias para contornar o problema, até que a solução definitiva fosse implantada. Entretanto, apesar de eficazes, elas apresentavam conseqüências negativas, tais como: aumento da concentração de tensão nas extremidades das mesas dos cilindros na região de contato com os cilindros de encosto, perda de produtividade, troca prematura dos cilindros de trabalho e aumento da complexidade durante a programação, respectivamente.

As ações acima eram paliativas, já que necessitaria um tempo longo para se trabalhar na causa fundamental que era a forma com que os cilindros de trabalho estavam se expandindo termicamente, durante o processo de laminação.

2.3 Estudo do Fenômeno de Expansão Térmica dos Cilindros

O estudo da expansão térmica dos cilindros de trabalho do Steckel foi realizado pelo Centro de Pesquisa em Metalurgia – CRM, na Bélgica e teve como objetivo primordial a caracterização do sistema de refrigeração do laminador Steckel. Nesta etapa, levou-se em consideração a configuração do sistema de refrigeração bem

Este estudo tinha como objetivo principal prever, de forma qualitativa, o comportamento dos cilindros de trabalho com os distribuidores originais, e, em seguida, quando fossem submetidos a diferentes estratégias de refrigeração. Esta preocupação se deu devido a bem sucedida experiência já vivida pela AMM em parceria com o CRM no passado e, adicionalmente, pelo alto custo do investimento e complexidade de sua implantação.

Primeiramente foram informados todos os parâmetros necessários para alimentar o modelo matemático do CRM, tais como: dimensões dos cilindros, vazão, pressão e temperatura da água do sistema de refrigeração, tempo de contato entre a tira e os cilindros, tempo de reversão entre passes, tempo de espera entre tiras, temperatura da tira em cada passe de laminação, dimensões da tira, perfil de temperatura da superfície dos cilindros imediatamente depois de sair do laminador etc.

Em seguida, comparando-se as temperaturas medidas e calculadas na superfície do cilindro, para diferentes campanhas, deduziu-se a eficiência da refrigeração (coeficiente de transferência de calor) do sistema antes da modificação.

Como resultado deste estudo, foram gerados os perfis térmicos dos cilindros de trabalho e os campos de temperatura em seu interior ao longo do período de laminação, como pode ser visto nas Figuras 4 e 5, respectivamente.⁽²⁾ Desta forma o modelo foi ajustado para as condições da época a fim de predizer, com relativa segurança, o efeito das modificações que se pretendia fazer.

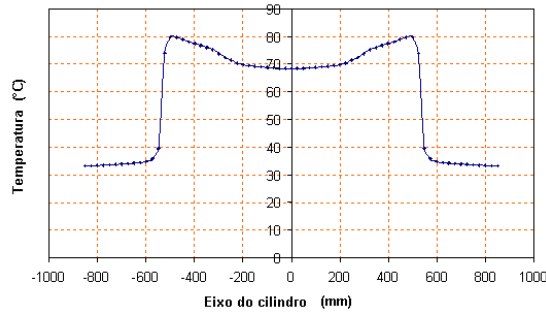


Figura 4 – Perfil térmico na superfície do cilindro de trabalho calculado ao final da laminação.

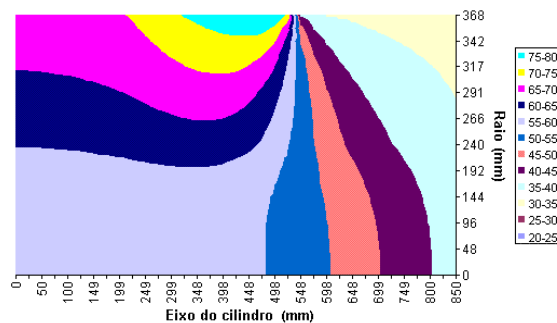


Figura 5 – Campo de temperatura no interior do cilindro ao final da laminação.

2.4 Validação do Modelo Matemático

A validação do modelo começou pela definição da eficiência da refrigeração ao longo do comprimento dos cilindros. Foi assumido que o coeficiente de transferência de calor era inversamente proporcional a densidade de bicos pulverizadores.

Outro fator importante considerado foi a espessura da carepa do material em contato com o cilindro, pois é grande sua influência no coeficiente de transferência de calor. O valor da espessura média da carepa utilizada foi de 0,03 mm.

Além dos dados relacionados com a operação, foi necessário saber os seguintes dados:

- o momento em que a água de refrigeração foi cortada após a laminação da última tira; e
- o momento em que foi realizada a medição do perfil de temperatura dos cilindros, logo após sua remoção do laminador.

A Figura 6 mostra um dos resultados comparativos entre os valores medidos e calculados para os cilindros nas seguintes condições: 8,5 minutos e 17,5 minutos após o término de uma campanha.

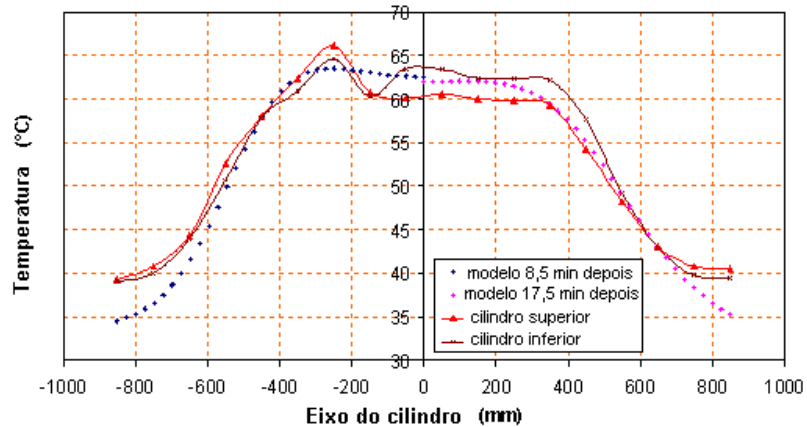


Figura 6. – Comparação entre as temperaturas medidas e calculadas na superfície dos cilindros de trabalho superior e inferior.

Apesar das simplificações assumidas, a validação do modelo para simulação da evolução térmica dos cilindros de trabalho, durante e depois da laminação, foi considerada satisfatória. Os valores medidos e calculados ficaram bem próximos para os quatro programas de laminação estudados. O modelo foi considerado validado e apto para ser utilizado com o objetivo de verificar os efeitos das modificações nos distribuidores no perfil transversal da tira, antes de partir para a implantação da solução definitiva.

2.5 Projeto dos Novos Distribuidores Segmentados

Segundo experiência vivida na planta da ArcelorMittal Mediterranée - AMM, antes dos ajustes no projeto dos distribuidores segmentados, havia a ocorrência de coroamento negativo e *build up*, principalmente em tiras estreitas nas quais os atuadores de contraflexão “bending” não eram capazes de corrigir estes defeitos. A origem destes defeitos estava nas primeiras quatro cadeiras, onde o arco de contato e a transferência de calor da tira para os cilindros de trabalho são altos.⁽³⁾

Depois de vários testes, os técnicos da AMM chegaram a conclusão que, se o fluxo de água nas extremidades da mesa dos cilindros fosse restringido os cilindros de trabalho apresentariam uma coroa térmica favorável para reduzir o defeito *build up*. Assim, adotou-se a estratégia de refrigeração segmentada, a qual permitia ajustar a distribuição da água ao longo da mesa dos cilindros em função da largura da tira que estava sendo laminada.

Foi com base nessa experiência, que os distribuidores da AMIB foram projetados. Entretanto, adaptações foram realizadas, tendo em vista as diferentes características entre os dois tipos de laminadores, Trem Contínuo e Laminador Steckel.

A definição da segmentação dos distribuidores partiu do projeto original o qual possuía apenas duas zonas (primária e secundária), conforme mostrado na Figura 7.

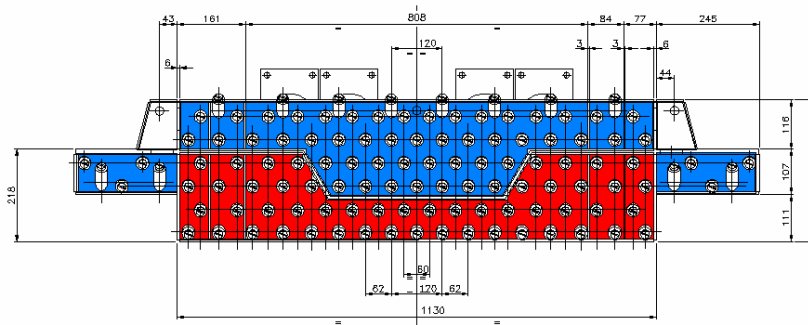


Figura 7 – Desenho esquemático do distribuidor original com duas zonas.

Estudos feitos pelo CRM, comprovaram que o projeto acima estava bem dimensionado para o controle de temperatura do cilindro de trabalho e também para o controle do perfil dos produtos largos, acima de 1300 mm. Entretanto, para as larguras menores, a evolução da coroa térmica ao longo da campanha do cilindro não estava adequada, similar a situação vivida pela AMM no passado. Daí surgiu a idéia se dividir verticalmente as zonas primária e secundária, para possibilitar o ajuste da distribuição da água na mesa dos cilindros, atendendo assim os materiais mais estreitos.

Assim, as zonas primária e secundária foram divididas internamente, através de separados verticais, passando de duas zonas para seis zonas (Figura 8).

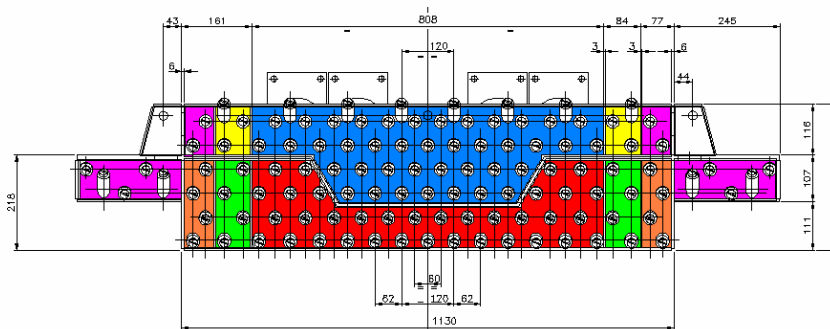


Figura 8 – Desenho esquemático do novo distribuidor segmentado (6 zonas).

A solução proposta acima foi projetada para se ter uma boa repartição vertical levando-se em consideração: as faixas de larguras do mix de produtos da AMIB, os resultados das simulações feitas pelo CRM e a experiência (*know how*) da AMM.

A Figura 9 mostra algumas vistas do distribuidor segmentado com seus bicos pulverizadores e tubos alimentadores.



Figura 9 – Vistas do distribuidor segmentado pronto para montagem.

Esta solução se apresentou bastante robusta pelos seguintes motivos:

- a segmentação horizontal dos distribuidores do projeto original seria mantida;
- permitiria ajustes para três faixas de largura;
- a forma de refrigeração no lado de entrada, seria mantida, pois não apresentava problemas;
- a configuração padrão poderia ser restabelecida a qualquer momento, sem perda de tempo, em caso de algum resultado indesejável; e
- utilizaria a mesma tecnologia atual, a qual já era conhecida e confiável (válvulas, distribuidores e sistema de controle).

A única dificuldade apresentada seria o grande número de tubos e válvulas necessários para alimentar e controlar os distribuidores (6 zonas por distribuidor contra 2 zonas por distribuidor no projeto original), o qual demandaria um projeto detalhado bem preciso e um longo tempo de parada do laminador, estimado em 4 a 5 dias.

2.6 Implantação do Novo Sistema de Refrigeração

Uma vez definido o projeto do novo distribuidor, partiu-se para a sua implantação seguindo as fases clássicas de engenharia: engenharia básica, engenharia de detalhamento, fabricação, instalação/montagem, start-up e comissionamento. Todo serviço de engenharia básica e de detalhamento, foi realizado internamente pela AMIB, bem como as interfaces dos sistemas de N1 e N2. O desenvolvimento do software para set-up via PLC e os serviços de fabricação e montagem no campo, foram realizados por firmas contratadas.

O projeto detalhado do novo sistema de refrigeração, como um todo, foi exaustivamente discutido entre as equipes de engenharia da AMIB e AMM. Fizeram parte deste escopo, a avaliação do sistema de bombeamento de água, dimensionamento e encaminhamento das tubulações, velocidades por trecho, perda de carga etc.

Foi desenvolvido internamente pela equipe de automação da AMIB, um sistema de controle de abertura e fechamento das válvulas, totalmente automático. Este sistema foi concebido como parte integrante das tarefas de nível dois (N2), já

existentes. Através de uma interface gráfica, é possível monitorar o funcionamento do sistema, através de animações e informações de parâmetros do sistema, tipo: vazão, pressão, temperatura e alarmes de falhas. O sistema conta também com o recurso de set-up da estratégia de refrigeração em modo manual, ou automático com definição prévia em função das características do produto laminado, por exemplo: tipo de aço, largura, espessura etc.

2.7 Desenvolvimento da Estratégia de Utilização dos Distribuidores Segmentados

A definição da estratégia de utilização dos distribuidores foi estabelecida em função das considerações e resultados obtidos pelas simulações do modelo do CRM, que estão resumidos abaixo. Sendo que, os resultados das simulações foram somente para o perfil térmico do cilindro e não para o perfil da tira, pois para tanto, teria que ser considerados vários outros fenômenos do tipo: desgaste, flexão e achatamento dos cilindros.

Além disto, os seguintes pontos deveriam ser observados:

- o efeito térmico na degradação do cilindro;
- o efeito no perfil final da tira devido ao efeito cumulativo de cada passe; E
- os defeitos de planicidade entre passes.

As simulações mostraram que:

- a utilização dos distribuidores segmentados tem um efeito favorável a não ocorrência do *build up* e ajuda a manter o coroamento da tira, mesmo para as últimas tiras da campanha do cilindro. Este efeito se torna mais pronunciado a medida que se reduz o tempo entre tiras;
- o uso dos distribuidores segmentados poderia aumentar o número de tiras, numa mesma campanha de cilindro, em comparação com os distribuidores convencionais;
- as zonas dos distribuidores foram dimensionadas para ter a possibilidade de eliminar o *build up*; a dificuldade era encontrar uma estratégia ótima para atingir diferentes objetivos em termos de forma da tira, estabilidade de laminação, desgaste de cilindro e defeitos superficiais;
- as simulações forneceram informações qualitativas e parâmetros de estudos. Os resultados teriam que ser confirmados através de experiências e medições dos perfis das tiras para ajustes na estratégia por consequência; E
- a estratégia proposta inicialmente deveria ser intermediária de modo a facilitar a detecção dos efeitos e impedir a ocorrência de problemas. Deveria ser também simples para ser entendida e fácil de ser analisada.⁽⁴⁾

A Figura 10 mostra, de forma esquemática, as repartições das zonas do distribuidor segmentado e a quantidade de bicos pulverizadores por zona.

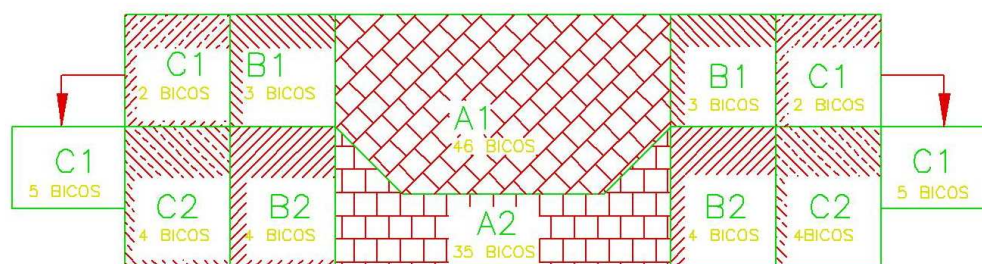


Figura 10 – repartições das zonas e a quantidade de bicos pulverizadores por zona.

A estratégia proposta para iniciar os testes com a nova configuração da refrigeração (distribuidores segmentados) foi realizada e comprovada a sua eficácia, tanto para se evitar o defeito *build up* quanto para reduzir a queda brusca do coroamento da tira ao longo da campanha dos cilindros de trabalho. Entretanto, foi necessário alguns ajustes em relação a proposta inicial, tendo em vista a ocorrência de trincas térmicas circunferenciais nos cilindros. Estes ajustes buscaram manter a mesma filosofia, porém com a utilização de mais bicos pulverizadores nas regiões por onde passam as extremidades das tiras nos cilindros. Esta estratégia, mostrada na Tabela 1, foi a que apresentou melhor resultado em termos de perfil da tira e refrigeração dos cilindros. Em outras palavras, coroamento positivo, sem *build up* e menor ocorrência de trincas térmicas nos cilindros. Hoje, a refrigeração segmentada está sendo aplicada em todos os grupos de aços, proporcionando um melhor perfil das BQ's de uma forma geral.

Tabela 1 – Estratégia atual para a refrigeração dos cilindros de trabalho do Steckel

Largura da tira (mm)	Utilização das zonas	
	lado entrada da tira	lado de saída da tira
$L < 1100$	A1+ B1 + C1	A1 + A2 + B2
$1100 \leq L < 1280$	A1+ B1 + C1	A1 + A2 + B1 + B2 + C2
$L \geq 1280$	A1+ B1 + C1	A1 + A2 + B1 + B2 + C1 + C2

3 RESULTADOS

No ano de 2006 ainda não tinha sido instalado o novo sistema de refrigeração, entretanto as medidas paliativas adotadas, até então, permitiram o aumento da produtividade dos aços 3XX fino com alguma ocorrência do defeito *build up* e também coroamento negativo. A partir de janeiro de 2007 o ganho de produtividade se deu basicamente pela utilização do novo sistema implantado que permitiu reduzir, de forma progressiva, o intervalo médio entre tiras de 210 s para 150s sem o defeito *build up* (Figura 11) e uma redução significativa na ocorrência de tiras com coroamento negativo refletida no coroamento médio anual (Figura 12).

Produtividade 3XX fino na LTQ

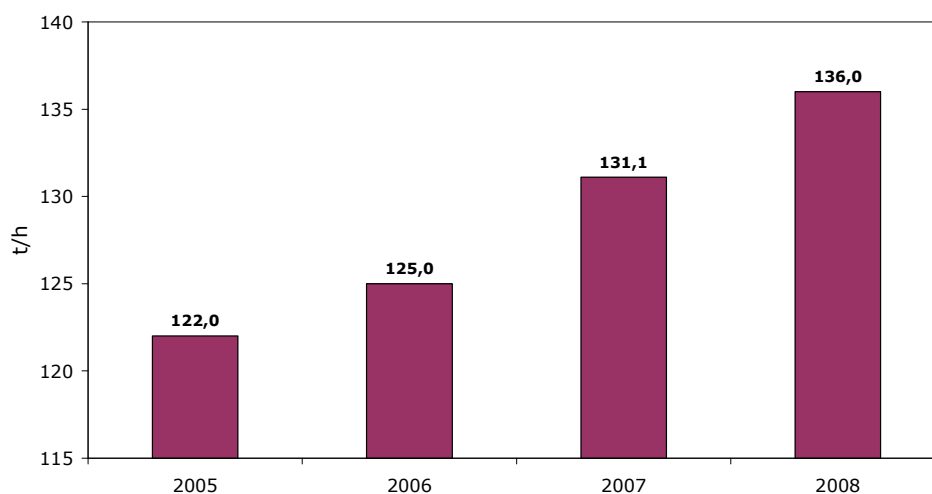


Figura 11 – Evolução da produtividade dos aços 3XX fino na LTQ.

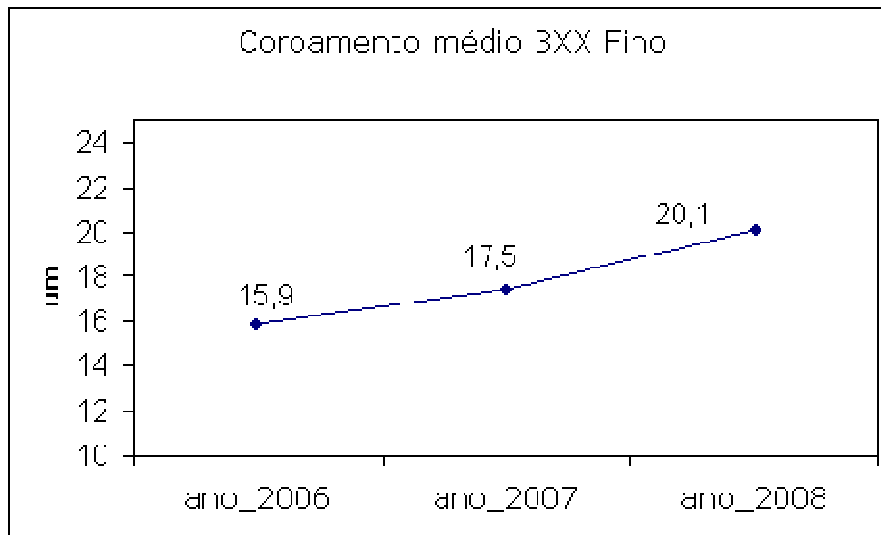


Figura 12 – Evolução do coroamento médio dos aços 3XX fino, espessura < 3,7mm.

Outro resultado também bastante importante foi a redução expressiva dos desvios de BF por *build up*, nas linhas de recozimento final RB1 e RB4 (Figura 13).

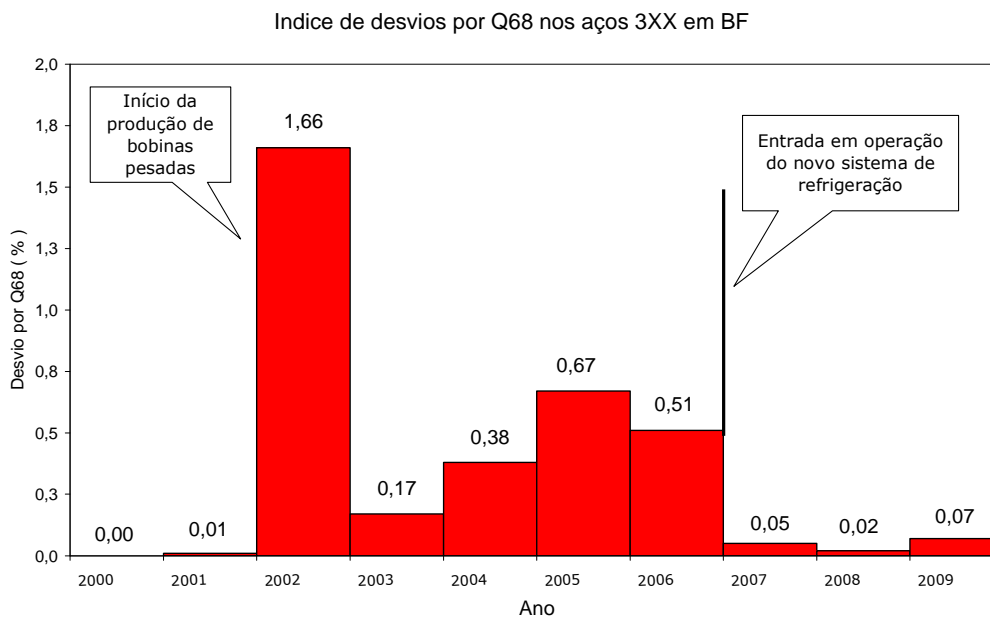


Figura 13 – Evolução do desvio de BF por *build up* (Q68), nas RB's finais.

3.1 Benefícios Apurados com a Implantação do Projeto

O maior ganho com a implantação do projeto foi o aumento da produtividade do 3XX fino, principal item avaliado para a aprovação do investimento orçado em R\$ 700.000,00. O retorno do investimento foi calculado pelo número de horas disponibilizadas para a produção de baixo carbono, produto de menor margem de contribuição. O total de horas disponibilizadas no biênio 2007-2008 foi de 96 horas.

3.2 Outros Benefícios Não Quantificados

- Aumento de produtividade nos laminadores a frio devido à melhoria no perfil da BQ;
- Redução dos desvios por *build up* (custo da não qualidade);
- Não utilização de papel separador na BF de inox, devido a não ocorrência de *build up*;
- Redução de rupturas nos laminadores a frio.

4 CONCLUSÕES

A otimização do sistema de refrigeração do Steckel foi fundamental para a melhoria do perfil das bobinas laminadas a quente, nos seguintes aspectos:

- permitiu reduzir o intervalo entre tiras, consequentemente aumentando a produtividade dos materiais finos sem a ocorrência do defeito *build up*; e
- aumentou o coroamento médio das tiras com tendência a coroamento negativo, impactando positivamente a qualidade da BQ.

Adicionalmente contribuiu fortemente para aumentar as campanhas dos cilindros de trabalho que eram limitadas pelo resultado ruim do perfil da tira (coroamento baixo ou negativo). Ampliando assim os ganhos com a utilização de cilindros de alto desempenho (aço rápido), juntamente com a aplicação de óleo de laminação.

REFERÊNCIAS

- 1 FARIA, G. M. de. Análise de perfil e forma de tiras laminadas a quente. Belo Horizonte, 2001. 119 p. Dissertação (Mestrado em Metalurgia de Conformação) Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2001.
- 2 MINGNON, J. Thermal roll camber simulation for the Steckel Mill of Acesita. Liège: Centre for Research in Metallurgy, 2005.
- 3 USSART, G.; LYVINEC, J.; TISSOT, F. Edge build up project Acesita Steckel Mill Arcelor Fos recommendations. Fos Sur Mer: ArcelorMittal Méditerranée, 2006.
- 4 DUSSART, G. Edge build up project Acesita Steckel Mill phase 2. Fos Sur Mer: ArcelorMittal Méditerranée, 2006.