

ESTUDO DE EXTENSÃO DE CAMPANHA DO LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE DA ARCELORMITTAL TUBARÃO¹

*Gilson Teixeira Cornelio*²

*Bruno Bastos Silva Murad*³

*Claudia Regina Serantoni*⁴

*Mario Cesar Tavares*⁵

*Antonio Agostinho dos Santos Guarda*⁶

Resumo

Foi realizado projeto de extensão das campanhas dos cilindros de encosto da ArcelorMittal Tubarão, que permitiu obter ganhos provenientes do aumento da disponibilidade do laminador e da redução de custo de manutenção dos cilindros. Essas campanhas estão limitadas por fenômenos de fadiga de contato, que são intensificadas por fenômenos de desgaste, tanto nos cilindros de encosto como nos de trabalho. Sob o ponto de vista operacional da laminação na ArcelorMittal Tubarão, a fadiga de contato também sofre influencia do movimento axial dos cilindros na atuação do CVC[®], sendo observada concentração da pressão em regiões bem delimitadas no contato entre os cilindros de encosto e de trabalho. Esse estudo iniciou-se com a verificação das práticas operacionais na oficina de cilindros e no laminador. Em seguida, foram utilizadas ferramentas de modelagem computacional por elementos finitos e simulação de deflexão, para avaliar a distribuição de tensões no contato. A partir desses dados, associados ao conhecimento prévio da aplicação e das propriedades dos cilindros de encosto, foram sugeridas ações de equalização do programa de laminação, assim como a adequação de sua extensão relacionada aos programas e oportunidades de manutenção e parada do laminador. Também foram sugeridas modificações da geometria da mesa, com foco no caimento da borda da mesa do cilindro de encosto, sendo possível eliminar condições inadequadas de contato, observadas nas simulações computacionais.

Palavras-chave: Produtividade; Cilindros de encosto; Laminação.

HSM CAMPAIGN INCREASING AT ARCELORMITTAL TUBARÃO

Abstract

A project about back-up roll campaign extension was developed at ArcelorMittal Tubarão, which would lead to gains from increasing the availability of the rolling mill and reduction of maintenance cost of the BuRs. These campaigns are limited by contact fatigue phenomena, which are intensified by wear. From the operational view about ArcelorMittal HSM, the contact fatigue also receives an influence of CVC[®] shifting movement, being observed a stresses concentration in defined positions. This study began with the verification of operational practices in the Roll shop. Then, computer modeling tools for simulation and finite element analysis was performed to evaluate the stresses distribution in the contact. From these data and previous knowledge about the application and BuR properties, some equalization actions were suggested about the rolling schedule, optimizing roll chances to the opportunities related to the mill maintenance. Were also suggested modifications of the geometry of the BuR barrel, focusing on the edge taper, what an inadequate contact, previously observed in computer simulations, was eliminated.

Keywords: Productivity, Back-up rolls; Rolling mill.

¹ *Contribuição técnica ao 49º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 22 a 25 de outubro de 2012, Vila Velha, ES, Brasil*

² *Engº Químico, mestre em engenharia mecânica, assessor técnico de aplicação de cilindros – Gerdau Special Brazil*

³ *Engº Metalurgista, mestre em engenharia mecânica, engenheiro de laminação – ArcelorMittal Tubarão*

⁴ *Engº Metalurgista, doutor em engenharia metalúrgica, gerente de tecnologia de cilindros – Gerdau Special Brazil*

⁵ *Engº. Mecânico, gerente de oficina de cilindros – ArcelorMittal Tubarão.*

⁶ *Tecnólogo em mecânica, pós-graduado em administração, gestor de contas de cilindros – Gerdau Special Brazil.*

1 INTRODUÇÃO

Várias tecnologias foram desenvolvidas na laminação de tiras e placas, para garantir a crescente demanda por qualidade da forma da tira, principalmente planicidade. Essas tecnologias incluem o posicionamento e controle do contato entre cilindros de trabalho e apoio, bem como entre cilindro de trabalho e tira,^(1,2) entretanto, essas tecnologias não minimizaram as condições de dano superficial dos cilindros de apoio, os quais merecem especial atenção, principalmente quando há intenção de aumentar o volume de produção e/ou produzir um novo tipo de produto.

A permanência dos cilindros de encosto está intimamente ligada à sua manutenção, como estudado intensamente até o momento.⁽³⁻⁶⁾ O principal mecanismo de dano é a fadiga de contato. A fadiga de contato decorre do carregamento cíclico em contatos não-conformes, que diferente da fadiga clássica, possui a máxima tensão cisalhante abaixo da superfície,⁽⁷⁾ resultando num acúmulo de dano (discordâncias) que, após um número finito de ciclos, acarretará na nucleação de uma trinca nessa região.

Em uma cadeira 4Hi, para laminação de tiras, ocorre um contato não-conforme entre os cilindros de encosto e de trabalho, cujos campos de tensões nesse contato podem ser intensificados, em condições normais, pelos fatores: perfil de calibração, desgaste dos cilindros laminadores, deslocamento axial e o próprio carregamento na cadeira de laminação. Um exemplo da intensificação desses campos de tensões pode ser observado na Figura 1.

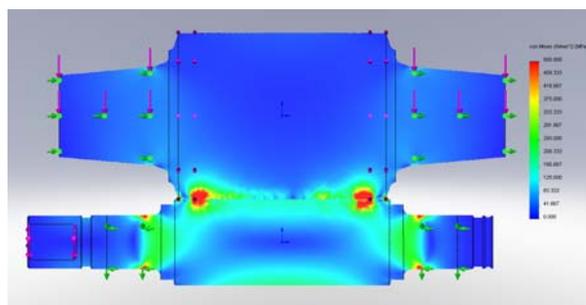


Figura 1: Intensificação das tensões no contato entre os cilindros de trabalho e de encosto, por ação da deflexão dos cilindros em serviço.⁽⁸⁾

Todas essas variáveis afetam a vida do cilindro de apoio no que diz respeito à ocorrência de lascamentos – *spalling*, que possuem duas causas baseadas em condições operacionais, a saber:

- excesso de fadiga de contato, ocasionada por manutenção falha do cilindro de apoio, o que promove acúmulo de dano e nucleação de trincas subsuperficiais; e
- propagação de trincas nucleadas na superfície, devido ao carregamento excessivo durante a laminação, ou de trincas remanescentes do processo de retificação.

Com o objetivo de aumentar a produtividade do laminador de tiras a quente da ArcelorMittal Tubarão, iniciou-se um trabalho de extensão de campanha dos cilindros de encosto, objetivando-se um aumento de cerca de 36%.

Foram realizados acompanhamentos das condições operacionais, tanto do laminador como da oficina de cilindros, avaliando os potenciais de otimização de uso dos cilindros de encosto. Também foram avaliadas condições críticas de desgaste e movimento axial (*shifting*) dos cilindros de trabalho em relação ao eixo do laminador.

Partindo dessas premissas, foram realizadas simulações computacionais e acompanhamento do uso dos cilindros, associando-se uma otimização da manutenção de cilindros de encosto às propriedades dos cilindros Villares Rolls.

Esse trabalho tem como objetivo mostrar os potenciais de ganho com o estudo final da avaliação das pressões de contato. Algumas recomendações foram observadas no início do projeto, sendo que há possibilidades de atendimento da meta inicialmente proposta de extensão.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram assumidos dados históricos a partir dos registros de produção entre 2009 e 2011, referentes ao laminador de tiras a quente e seus cilindros, os quais foram tratados estatisticamente com o aplicativo Minitab® v.16. Com isso, foram realizados modelamentos computacionais por método dos elementos finitos, cujos processamentos foram desenvolvidos utilizando o *software* Solidworks Simulation Professional 2011®. Para a geração da malha, foram considerados elementos tetraédricos, com refinamento nas áreas de contato (BuR/WR e WR/strip) e regiões com possíveis concentrações de tensões.

Para todas as simulações foram assumidas as seguintes premissas para o modelamento computacional: i/ Os cilindros de trabalho foram modelados como bimetálicos, com diferentes materiais, conforme a cadeira de laminação; ii/ Os cilindros apresentam propriedades elásticas isotrópicas; iii/ A cadeira de laminação foi considerada como um corpo rígido e iv/ as propriedades mecânicas, incluindo vida em fadiga, referem-se aos cilindros *Villares Rolls*.

O modelamento computacional foi construído com as dimensões reais dos cilindros, removendo-se detalhes construtivos que não exerceriam influência no estudo realizado. Foram incluídos os dados de i/ força de laminação; ii/ dimensões da tira por cadeira; iii/ perfis de desgaste dos cilindros por cadeira, iv/ aplicação de *bending* e v/ atuação do deslocamento axial dos cilindros de trabalho (*shifting*).

Quanto às fixações, os movimentos dos pescoços dos cilindros de encosto foram restringidos na direção dos eixos X, Y e Z, permitindo apenas sua rotação em relação ao eixo longitudinal, enquanto que para o cilindro de trabalho foi permitida sua rotação e movimentação na direção do eixo Y. Quanto aos esforços, as forças de *bending* foram aplicadas nos pescoços dos cilindros de trabalho, na modalidade *crown-in*, enquanto que a força de laminação foi aplicada na região de contato entre o cilindro de encosto e tira.

Para complementar essa análise, uma segunda ferramenta foi utilizada: Rollflex®, desenvolvida pelo ITA *Technology and Software*, situado na República Tcheca. Trata-se de um aplicativo comercial com respostas imediatas, sendo possível simular condições de laminação de forma isolada ou agrupadas. Entretanto, realiza uma simplificação geométrica generalista, não sendo possível modelar perfeitamente a geometria do caimento (nos cilindros de encosto) e detalhes da concordância mesa-pescoço.

Todo esse processo de simulação computacional visou determinar a máxima pressão de contato entre os cilindros de encosto e de trabalho. Conhecendo-se a curva de Wöhler (S x N) para os materiais de cilindros de encosto utilizados, pode-se prever a vida em fadiga, e, com correlações entre ciclos e dimensões dos materiais laminados, a máxima tonelagem por campanha.

Do ponto de vista operacional, a extensão das campanhas dos cilindros de encosto foi dividida em 4 etapas, conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1: Planejamento inicial das etapas de extensão das campanhas dos cilindros de encosto

Etapa	Cadeira	Campanha	
		Referência	Meta
1	Trem Acabador (Apenas F6)	175.000	200.000
2	Trem Acabador (Apenas F6)	200.000	250.000
3	Trem Acabador (F1 a F6)	250.000	340.000
4	Laminador de Desbaste	250.000	340.000

Visando evitar instabilidade durante os testes com extensão de campanhas, evitou-se a programação de materiais críticos (finos microligados, finos largos, microligados largos e etc) nos períodos em que as campanhas dos cilindros corresponderem a valores superiores ao estabelecido no padrão.

O aumento das campanhas de cilindros envolve uma maior ciclagem e, conseqüentemente, maiores riscos à propagação de trincas em caso de sucatas, estiramentos ou repuxados onde haja colamento de material e marcas em baixo relevo. Desta forma, em caso de anomalias operacionais, optou-se a troca dos cilindros de encosto assim que possível.

Após a troca dos cilindros, estão sendo avaliados os seguintes itens para validação do aumento das campanhas, conforme Tabela 2.

Tabela 2: Itens avaliados para validação do aumento das campanhas

Parâmetro	Itens a verificar
Qualidade do produto final	Resultados de perfil, planicidade e espessura durante a campanha dos cilindros.
Estabilidade operacional	Ocorrência de sucatas, estiramentos ou repuxados
Aspecto visual	Caimento após a troca (garantir que não haja contato entre as bordas dos cilindros de encosto e de trabalho). Referência: visar pelo menos 40% do raio menor (5.000 mm x 50 mm)
Desgaste dos cilindros	Desvio em relação ao perfil estabelecido em padrão
Encruamento	Aumento de dureza em relação à liberação anterior e ao valor estabelecido no certificado. Referência: aumento de dureza máximo = 3 HSc
Trincas e Mudanças de Estrutura	Variação dos resultados de trincas e mudanças de estrutura dos ensaios por correntes parasitas ("eddy current") antes e após a laminação.

3 RESULTADOS

Inicialmente foi realizada uma amostragem da ciclagem dos cilindros de encosto e uma verificação das condições de contato/superfície da mesa após uso. Com uma simples medição de dureza na mesa, objetivando traçar o perfil de encruamento, constatou-se um comportamento caracterizado pelo endurecimento concentrado em faixas preferenciais de contato. A Figura 2 mostra esse comportamento observado, bem como o aspecto dessa zona concentrada de

contato. Esse comportamento é motivado pelo próprio perfil CVC[®] dos cilindros de encosto e de trabalho, associado à movimentação axial entre eles. Evidenciando a importância do estudo da influência desse tipo de contato na pressão de contato, para a determinação da vida em fadiga.

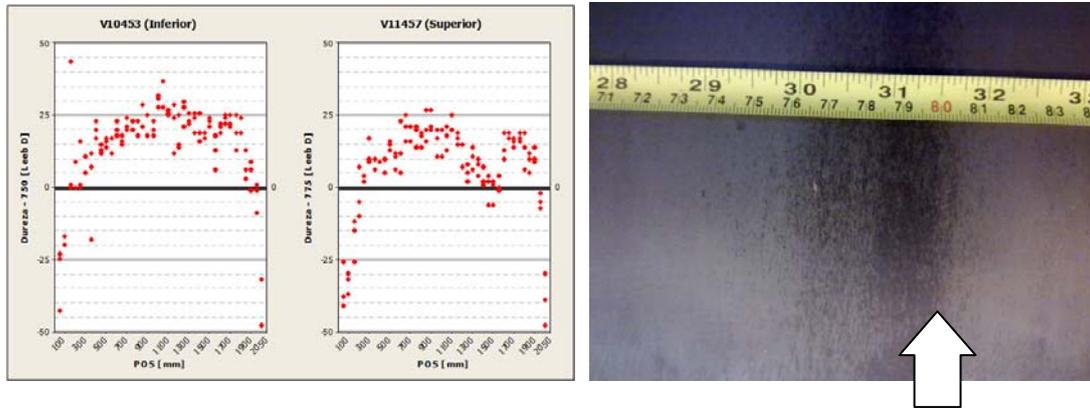


Figura 2: Exemplo de perfil de endurecimento encontrado em dois cilindros de encosto e o aspecto de concentração de contato em um deles (seta).

Também foram avaliados os ciclos reais históricos desde 2009, cujo comparativo com a amostragem pode ser observada na Tabela 3. Sob uma ótica mais conservadora, para efeito dos estudos desse trabalho, foram considerados os valores amostrais. Para todas as simulações foram utilizadas as condições mais conservadoras quanto aos dados de entrada e condições de controle.

Tabela 3: Comparativo de número de ciclos amostral e histórico

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Amostra	300.000	500.000	750.000	1.000.000	1.300.000	1.100.000
Histórico	263.140	431.464	668.638	932.102	1.151.784	1.001.884

Durante o processo de simulação com distintos deslocamentos axiais, foi identificada uma condição de interferência de contato na borda dos cilindros, comumente chamada de *roll kissing*. Contudo, com a realização de uma otimização do caimento da mesa do cilindro de trabalho, foi possível eliminar tal condição, reduzindo-se as pressões de contato naquela região. Com essa nova condição geométrica, foram realizados os estudos em cada cadeira.

A Figura 3 mostra um exemplo da representação gráfica de resposta da pressão de contato utilizado nesse projeto. Como mostra esse exemplo e sumarizado na Figura 4, verificou-se a variação da pressão de contato em função do posicionamento axial dos cilindros (*shifting*) para todas as cadeiras desse laminador.

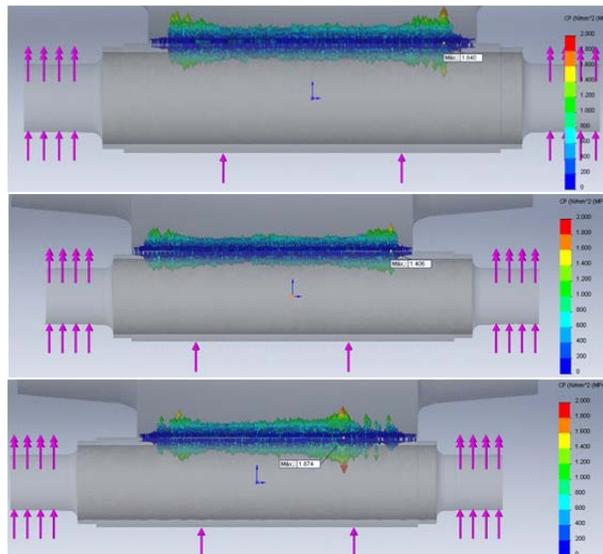


Figura 3: Exemplo de representação gráfica de resposta, para pressão de contato, considerando uma cadeira e três diferentes deslocamentos axiais.

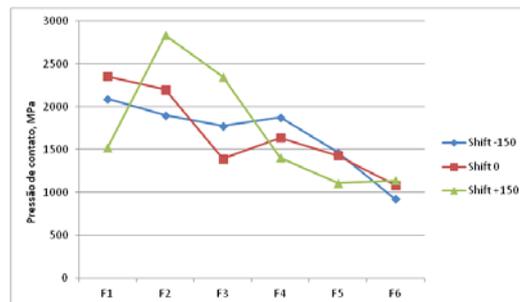


Figura 4: Distribuição das pressões de contato por cadeira e *shifting*.

A partir dos valores de pressões obtidos das simulações e o nível de ciclagem dos cilindros de encosto no início desse projeto, foi possível construir os diagramas de Wöhler (S-N) para cada cadeira, como mostrado na Figura 5. Nesses diagramas foram incluídos os campos de variação das pressões de contato, conforme influência da posição de *shifting*.

Havia uma parametrização de processo que definia a troca dos cilindros de encosto na cadeira F6 com um volume de produção inferior às demais cadeiras. Isso provocava uma parada intermediária do laminador. Com os estudos iniciais foi identificada a possibilidade da equalização da campanha dos cilindros de encosto, eliminando-se essa troca intermediária.

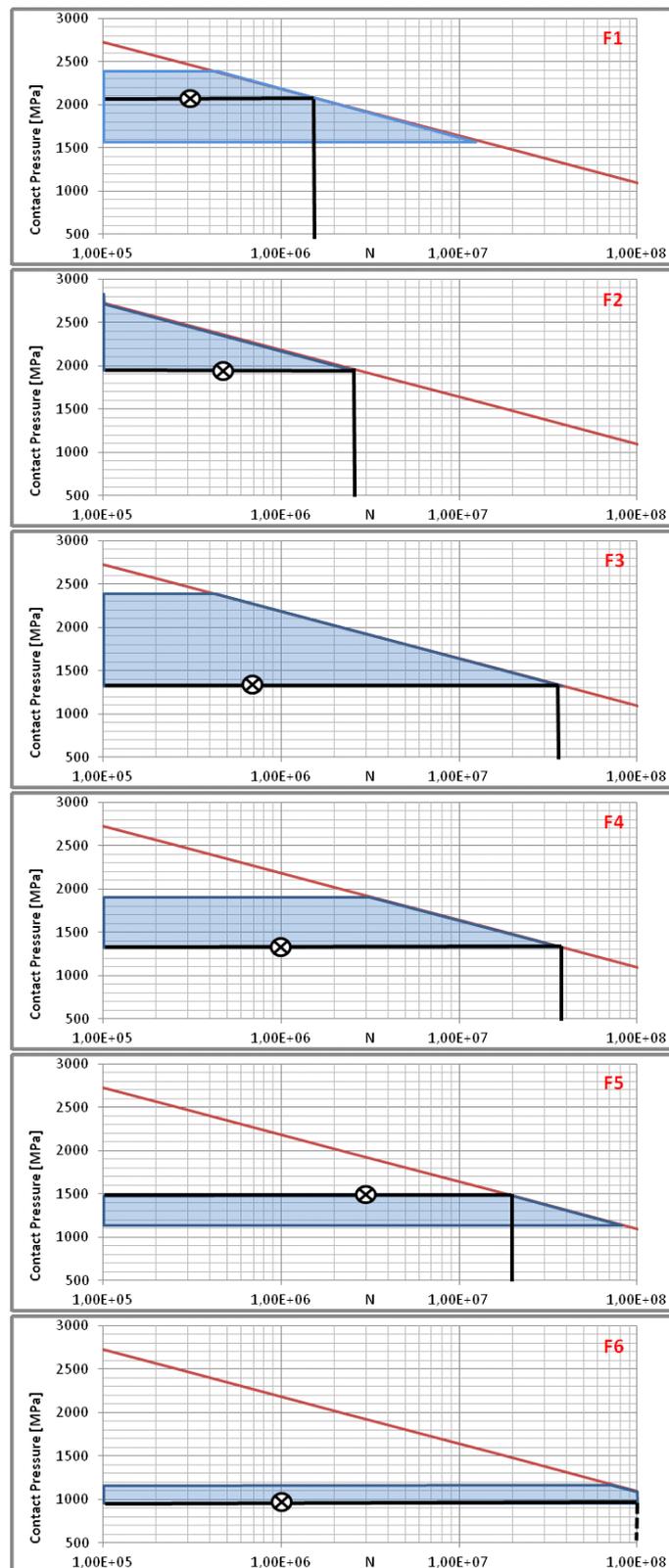


Figura 5: Diagrama de Wöhler para cada cadeia, com os campos de variação de pressão de contato, nível de pressão mais representativo (linha horizontal mais espessa) e o número de ciclos no início do projeto.

Também foi realizado um estudo estatístico sobre a frequência do posicionamento do *shifting*, sendo identificados os posicionamentos mais relevantes

e críticos em relação às pressões de contato obtidas. Foi construída uma tabela de relevância, mostrado na Tabela 4, que aplicada aos valores de pressões de contato, foi possível identificar as extensões potenciais por cadeira.

Tabela 4: Relevância dos posicionamentos axiais (*shifting*) nas cadeiras

Shift	Primeiras cadeiras			Cadeiras acabadoras		
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
-150	★★★	★★★	★	★★	★★★	★★★
0	-	★	★★★	★★	★★	★★
+150	-	★	-	★★★	★★	★

★Baixa frequência / ★★Média frequência / ★★★Alta frequência / - Sem frequência

Realizando um ajuste linear entre quilometragem e volume de produção (ton) por cadeira, foi possível prever o atendimento da meta previamente estabelecida pela ArcelorMittal Tubarão. A Tabela 5 mostra o resultado dessa verificação, identificando a cadeira F1 como a mais crítica. Embora aparentemente a cadeira F2 possua um campo de pressões de contato que remeta menor limite do número de ciclos, suas condições mais críticas retratam uma frequência pouco significativa. Para algumas cadeiras foram observados valores de atendimento da meta muito superiores. Esses valores servem apenas de referência, visto que há uma modificação do regime de desgaste, que também promoverá uma intensificação das pressões de contato.

Tabela 5: Volume de produção crítico por cadeira, considerando as simulações de pressões de contato e valores de *shifting* utilizados

Cadeira	Ciclagem crítica	BUR.D (Q1-Q3)	KM crítica	META
F1	1500k	1.460	6.880	(410%)
		1.360	5.811	(345%)
	400k	1.460	1.835	104%
		1.360	1.709	96%
F2	2400k	1.500	11.310	(404%)
		1.360	10.254	(366%)
	800k	1.500	3.770	130%
		1.360	3.418	118%
F3	7000k	1.480	(32.547)	(760%)
		1.385	(30.458)	(711%)
F4	3000k	1.495	14.090	222%
		1.455	13.713	216%
F5	20M	1.495	(93.934)	(1.162%)
		1.465	(92.049)	(1.139%)
F6	100M	1.475	(463.385)	(4.378%)
		1.425	(447.676)	(4.229%)

Os valores entre parênteses são apenas para referência, pois com a mudança do regime de desgaste também haverá uma mudança da distribuição das pressões de contato, e, conseqüentemente, o valor da ciclagem crítica.

Para complementar essas análises, foi realizada a validação por uma segunda ferramenta de simulação. Para esse estudo foi realizada a determinação da pressão linear máxima (P/L máx) nos cilindros de encosto, decorrente da força de laminação e perfis dos cilindros em cada cadeira. Algumas telas desse simulador estão mostradas na Figura 6.



Figura 6: Hardcopies de algumas telas do simulador Rollflex®.

Os resultados dessa simulação podem ser observados na tabela 6. Laminadores com maiores campanhas apresentam pressões de contato linear máximos de 17kN/mm. O LTQ da AMT apresentou valores inferiores e em condições menos severas de ciclagem, quando comparados a esses laminadores de referência. Dessa forma, é possível observar oportunidades de melhoria nas cadeiras acabadoras do LTQ da ArcelorMittal Tubarão.

Tabela 6: Pressões de contato linear máximas, obtidas utilizando Rollflex®

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
P/L max	16,24	15,49	14,32	13,26	11,68	11,12

Considerando as premissas estabelecidas para um volume de produção de 4,0 Mt/ano de BQs, estima-se um aumento na disponibilidade anual do LTQ de 34 horas, equivalentes a 0,39% do tempo calendário e a aproximadamente 16.700 t de BQs, conforme a Tabela 7.

Tabela 7: Estimativa inicial dos ganhos relacionados ao projeto de extensão das campanhas dos cilindros de encosto

Etapa	Ganho potencial (h)	Ganho potencial (t)	Situação atual
Etapa 1: Apenas F6(175 kt → 200 kt)	4,3	2105	Concluída
Etapa 2: Apenas F6(200 kt → 250 kt) Equalização das cadeiras	13,5	6630	Em fase final de validação
Etapa 3 e 4 : RM F1-F6(250 kt → 340 kt)	16,2	7945	A ser iniciada
Total	34	16679	-

4 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS ADICIONAIS

O método e as ferramentas utilizadas mostraram-se eficientes para auxiliar na avaliação da utilização dos cilindros de encosto, de modo a permitir o estudo da vida em fadiga de contato e possibilitar a extensão de campanhas de laminação.

A possibilidade de se atender o objetivo da ArcelorMittal Tubarão quanto ao aumento da campanha dos cilindros de encosto é plausível, sendo o ganho estimado de 34h de disponibilidade anual do LTQ ou 16.700 t de BQs. Até o momento foi realizada a equalização do laminador, removendo-se a parada intermediária da cadeira F6, enquanto que o processo de extensão está a 25% da meta final.

Para continuidade desse trabalho, sugere-se o acompanhamento dos perfis de desgaste, que poderão sofrer influência da permanência estendida do contato entre os cilindros de encosto e de trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 CORNELIO, Gilson T. **Caracterização de materiais utilizados na fabricação de cilindros de laminação submetidos ao desgaste abrasivo**. Guaratinguetá, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, UNESP. 120p.
- 2 BERGER, S. & HOEN, K. Latest developments in CVC plus® technology. In: The Iron & Steel Technology Conference and Exposition, 2008, Pittsburgh. **AISTech 2008 proceedings**. Pittsburgh: AIST, 2008.
- 3 OHKOMORI, Y.; KITAGAWA, I.; SHINOZUKA, K.; MIYAMOTO, R.; YASAKI, S.; INOUE, M. Cause and prevention of spalling of backup rolls for hot strip mill. In: **Transactions ISIJ**. Vol.28, 1998. p.68-74.
- 4 MURAKAMI, Y.; SAKAE, C.; HAMADA, S. Application of fracture mechanics to tribology problem. In: **Japan Society of mechanical engineering**. Vol. A58, No.556, 1992.
- 5 LIDDLE, Andrew J.; SHINOZUKA, Keigo; NAGAMATSU, Takafumi. Back-up Roll Maintenance for preventing spalling accidents. In: **SE AISI Quaterly**. January 1998, p. 48-64.
- 6 HAJDUK, D.; SIMECEK, P.; REBELLATO, M. A., CORNELIO, G. T. Fatigue of back-up rolls, length of campaign and dressing amount. In: **Southern African Roll Users Conference, 2011, Gauteng. SARUC 2011 proceedings**. Gauteng, South Africa: SARCO, 2011.p. 84-86.
- 7 ASM, **ASM Handbook Volume 19: Fatigue and fracture**, ASM International,1996. p. 825.
- 8 ESTEBÁN, A.; MARTÍNEZ, W.; CORNELIO, G.T.; ANTONIO, S.R. Otimização do caimento em cilindro de encosto da Ternium Siderar San Nicolás para prevenção de lascamento de bordas. In: **18º Conferencia de Laminação, 2010, Gauteng. IAS 2010**. Rosario, Argentina: Instituto Argentino de Siderurgia, 2010. 9p.