

# ESTUDO DE EXTENSÃO DE CAMPANHA DO LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE DA ARCELORMITTAL TUBARÃO<sup>1</sup>

*Gilson Teixeira Cornelio*<sup>2</sup>

*Bruno Bastos Silva Murad*<sup>3</sup>

*Rômulo Martin Lang*<sup>4</sup>

*Marcos Machado Matsumoto*<sup>5</sup>

*Mario Cesar Tavares*<sup>6</sup>

*Antonio Agostinho dos Santos Guarda*<sup>7</sup>

*Marcelo Arantes Rebellato*<sup>8</sup>

## Resumo

Com o plano de aumento da produção de bobinas laminadas a quente em aproximadamente 40% na ArcelorMittal Tubarão. A extensão das campanhas constitui uma das ações que permitiria aumentar a disponibilidade do laminador, estando limitada por fenômenos de fadiga de contato nos cilindros de encosto e de desgaste nos cilindros de trabalho nas cadeiras F6 e F5, respectivamente. Sob o ponto de vista operacional, a fadiga de contato nos cilindros de encosto é fortemente influenciada pela manutenção do cilindro e pelo perfil de contato com os cilindros de trabalho. O desgaste dos cilindros de trabalho influencia a extensão da campanha devido à condição superficial da tira laminada, além de exercer um papel de intensificador de tensões na subsuperfície do cilindro de encosto, o que acelera o processo de fadiga de contato. Esse estudo inicia-se com a verificação das práticas operacionais na oficina de cilindros e no laminador. Em seguida, são utilizadas ferramentas de modelagem computacional por elementos finitos para avaliar a distribuição de tensões no contato entre os cilindros e qual a influência do perfil CVC® e do desgaste nessa distribuição de tensões. A partir desses dados e de conhecimento prévio da aplicação, serão realizadas alterações da geometria da mesa, bem como ações de acompanhamento operacional e adequação de especificações de cilindros, de modo a estender a campanha do laminador.

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

## HSM CAMPAIGN INCREASING AT ARCELORMITTAL TUBARÃO

### Abstract

Aiming to increase the hot rolled coil production in approximately 40% at ArcelorMittal Tubarão, the extension of the BU rolls campaigns, which may increase the mill availability, is limited by contact fatigue phenomena in the back-up rolls and wear in the work rolls on stands F6 and F5, respectively. The contact fatigue in back-up rolls is strongly influenced by the maintenance and contact profile with work roll. The work rolls wear affect the campaign extent due to the condition of the rolled strip surface; besides that, work rolls wear can cause subsurface stress concentration in the back-up roll, which speeds up the process of contact fatigue. This study starts with the verification of operational practices in the roll shop. Some tools as finite element computer modeling were used to evaluate stress distribution at the contact between rolls and the influence of CVC® profile and wear. From these data and prior knowledge, geometric changes of barrel will be recommended, as well as follow-up actions and adequacy of operating specifications for rolls in order to extend roll schedule.

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

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 48º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 24 a 27 de outubro de 2011, Santos, SP*

<sup>2</sup> *Engº Químico, mestre em engenharia mecânica, doutorando em engenharia mecânica, assessor técnico de aplicação de cilindros – Gerdau Special Brazil*

<sup>3</sup> *Engº Metalurgista, mestre em engenharia mecânica, eng. laminação – ArcelorMittal Tubarão*

<sup>4</sup> *Engº. Produção, especialista de processo de oficina de cilindros – ArcelorMittal Tubarão*

<sup>5</sup> *Engº de materiais, mestrando em engenharia metalúrgica, assessor técnico de inovação de cilindros – Gerdau Special Brazil*

<sup>6</sup> *Engº. Mecânico, gerente de oficina de cilindros – ArcelorMittal Tubarão.*

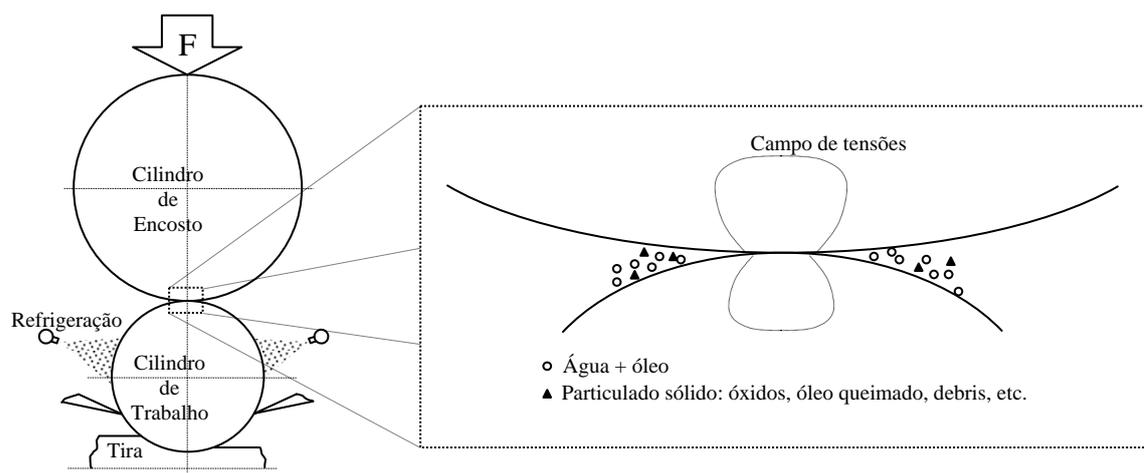
<sup>7</sup> *Tecnólogo em mecânica, gestor de contas de cilindros – Gerdau Special Brazil.*

<sup>8</sup> *Engº Metalurgista, gerente comercial de cilindros – Gerdau Special Brazil*

## 1 INTRODUÇÃO

Para a laminação de tiras e placas são normalmente utilizadas configurações de cadeiras do tipo quádruo, na qual são utilizados dois cilindros de encosto suportando as deflexões dos cilindros de trabalho. Com a demanda crescente por qualidade de forma da tira, principalmente planicidade, foram desenvolvidas tecnologias de posicionamento e controle do contato entre cilindros de trabalho e apoio, bem como entre cilindro de trabalho e tira.<sup>(1,2)</sup> 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. Nesse caso, o tribossistema precisa ser interpretado e suas condições de contorno, mensuradas.

Isolando-se o tribossistema no contato entre os cilindros de apoio e de trabalho, como mostrado na Figura 1, e a partir de caracterizações de superfícies após uso,<sup>(3)</sup> são prioritariamente observados nos cilindros de encosto os mecanismos de desgaste por abrasão, oxidação e fadiga de contato em rolamento. Porém, em todos os casos, a condição de operação e o histórico de uso do cilindro são fatores determinantes na intensificação de cada um deles.



**Figura 1:** Tribossistema no contato entre cilindros de trabalho e de encosto.

A fadiga de contato decorre do carregamento cíclico sobre contatos não-conformes, do qual resulta um acúmulo de dano (discordâncias) que, após um número finito de ciclos, poderá acarretar na nucleação de uma trinca.

A vida em fadiga de contato sofre influência de diversos fatores,<sup>(4)</sup> os quais são responsáveis por intensificar o nível de tensões no contato, tais como a presença de debris, particulados, contatos disformes, etc. ou origem interna, incluindo imperfeições microestruturais, inclusões, rugosidade, entre outros. Enfim, o tribossistema irá definir a condição e a intensificação do nível de tensões.

Além dos fatores que intensificam as tensões locais, há ainda o próprio carregamento e sua distribuição, inerente ao perfil do cilindro de apoio, à forma de contato com o cilindro de trabalho e às dimensões da tira laminada.

Todas essas variáveis afetam<sup>(5)</sup> 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 o volume de produção do laminador de tiras a quente da ArcelorMittal Tubarão em aproximadamente 40%, iniciou-se um trabalho de extensão de campanha dos cilindros de encosto, para aumento da disponibilidade do laminador. 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 quanto à sua vida em fadiga, com foco em contato a rolamento.

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 o início das atividades de extensão de campanha naquele laminador, incluindo ganhos imediatos com o prolongamento das campanhas dos cilindros de encosto para as cadeiras F1, F2, F3 e F6, reduzindo-se o número de paradas, com subsequente aumento da disponibilidade do laminador.

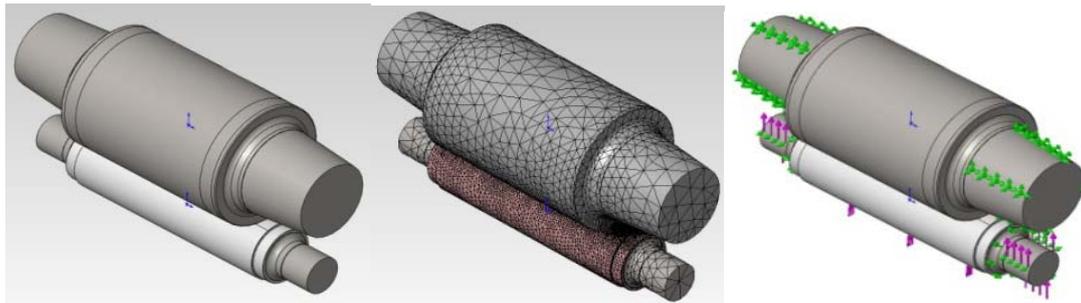
## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram tomados dados históricos a partir dos registros de produção entre 2009 e 2011, referentes ao laminador de tiras a quente e seus cilindros. Esses dados foram tratados estatisticamente utilizando aplicativo Minitab® v.16, com os quais 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:

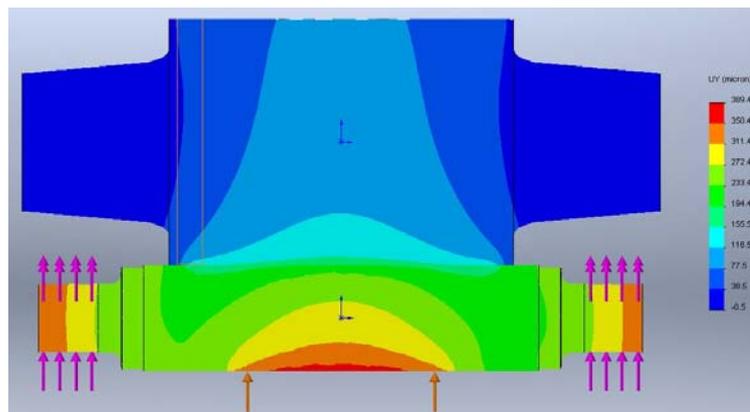
- os cilindros de trabalho foram modelados como bimetálicos, com diferentes materiais, conforme a cadeira de laminação;
- os cilindros apresentam propriedades elásticas isotrópicas;
- a cadeira de laminação foi considerada como um corpo rígido; e
- as propriedades mecânicas, incluindo vida em fadiga, referem-se aos cilindros *Villares Rolls*.

A Figura 2 mostra o modelamento computacional utilizado, para o qual, a partir de dados históricos de produção, foi considerado um estudo estatístico da força de laminação; dimensões da tira por cadeira; perfis de desgaste dos cilindros por cadeira e aplicação de *bending*.



**Figura 2:** Modelamento computacional para realização de estudo por FEM.

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 *crow-in*, enquanto a força de laminação foi aplicada na região de contato entre o cilindro de encosto e tira. Um exemplo de diagrama de deslocamentos resultantes na direção Y pode ser observado na Figura 3, conforme essas relações de fixação e esforços. Com isso, se valida o modelo quanto aos deslocamentos.



**Figura 3:** Diagrama de deslocamentos na direção Y de uma das cadeiras modeladas, para verificação do modelo utilizado.

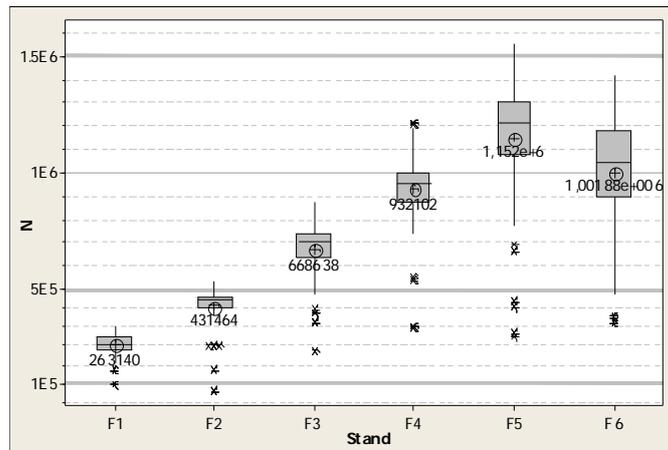
Todas as simulações foram realizadas levando-se em conta duas condições de superfície dos cilindros: i/ cilindros novos, sem qualquer desgaste, perfil ideal de retificação e ii/ perfil estatístico de desgaste e coroamento térmico, incluído no modelo sólido, tanto do cilindro de trabalho como do cilindro de encosto.

Adicionalmente foram realizados acompanhamentos do processo de manutenção dos cilindros quanto às inspeções e retificação, antes e após o processo de extensão de campanhas. Com essa prática deseja-se verificar a ocorrência de modificações do comportamento dos cilindros, de forma a garantir condições de segurança nesse processo.

### 3 RESULTADOS

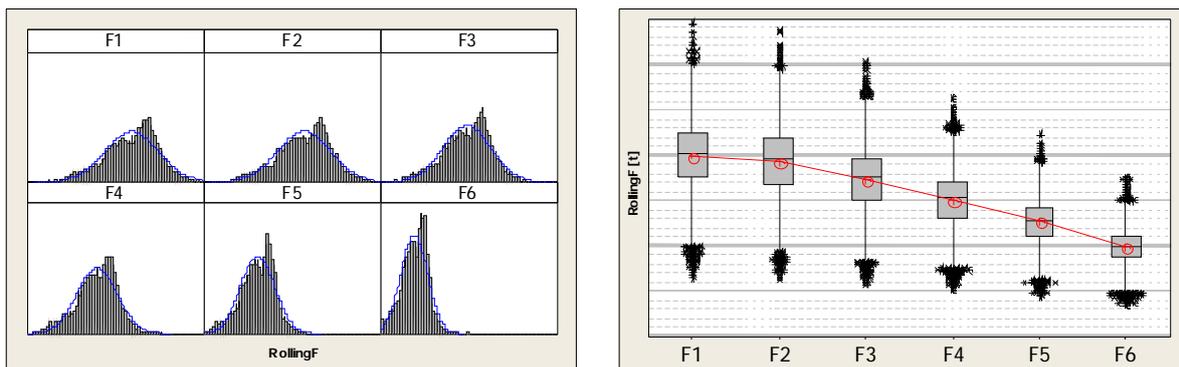
Inicialmente foram verificados os ciclos reais históricos desde 2009. Pode-se observar o número de ciclos por cadeira na Figura 4. Observa-se que há um crescimento do número de ciclos com o avanço nas cadeiras, exceto na última

cadeira, a qual apresentava uma troca antecipada por acreditar-se que havia uma elevada ciclagem mecânica.



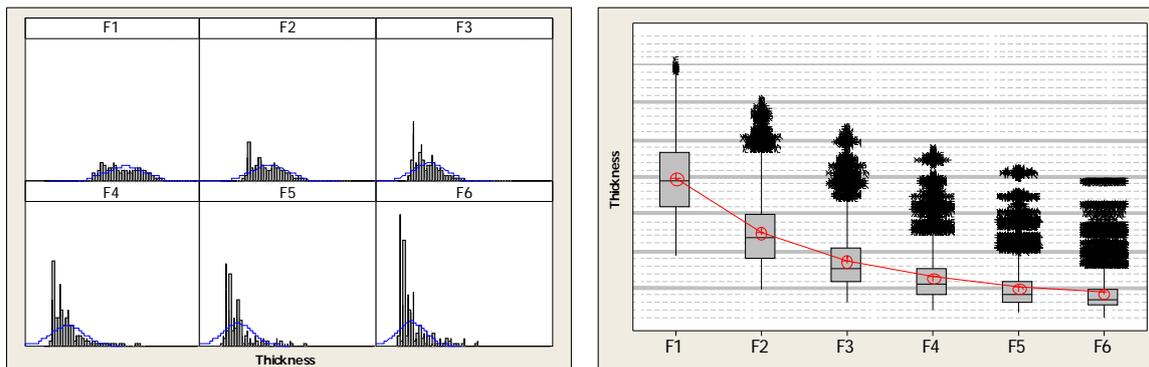
**Figura 4:** Levantamento histórico de ciclagem de cilindros de encosto por cadeira.

A distribuição de forças de laminação ao longo das cadeiras pode ser observada na Figura 5. Pode-se verificar que há uma tendência de redução das forças de laminação da cadeira F1 para a F6.

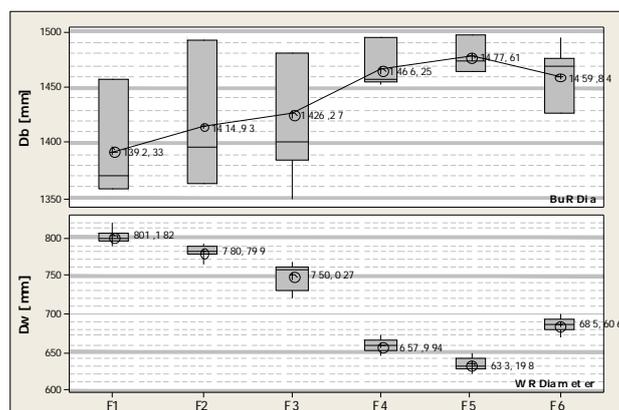


**Figura 5:** Histograma (esquerda) e boxplot (direita) da distribuição das forças de laminação por cada cadeira.

A Figura 6 mostra a distribuição das espessuras de laminação. Pode-se observar a tendência de maior frequência de laminação de menores espessuras. Para os estudos por FEM, foram tomados os valores modais dessas variáveis em cada cadeira. Quanto às combinações de diâmetros, foram avaliados os agrupamentos de diâmetros dos cilindros de trabalho e de encosto, como mostrado na Figura 7, sendo levados em conta os valores médios.

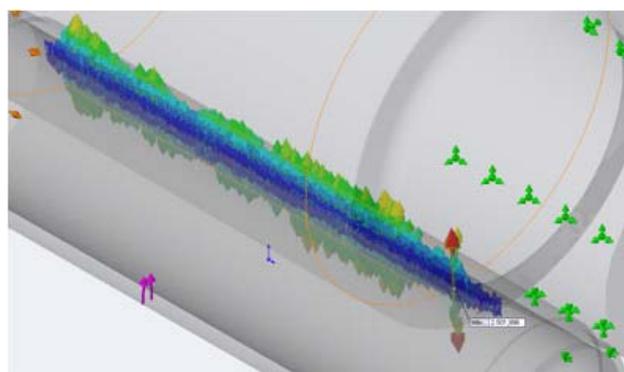


**Figura 6:** Histograma (esquerda) e boxplot (direita) da distribuição das espessuras laminadas por cada cadeia.



**Figura 7:** Boxplot da distribuição dos diâmetros dos cilindros de encosto (Db - acima) e de trabalho (Dw - abaixo).

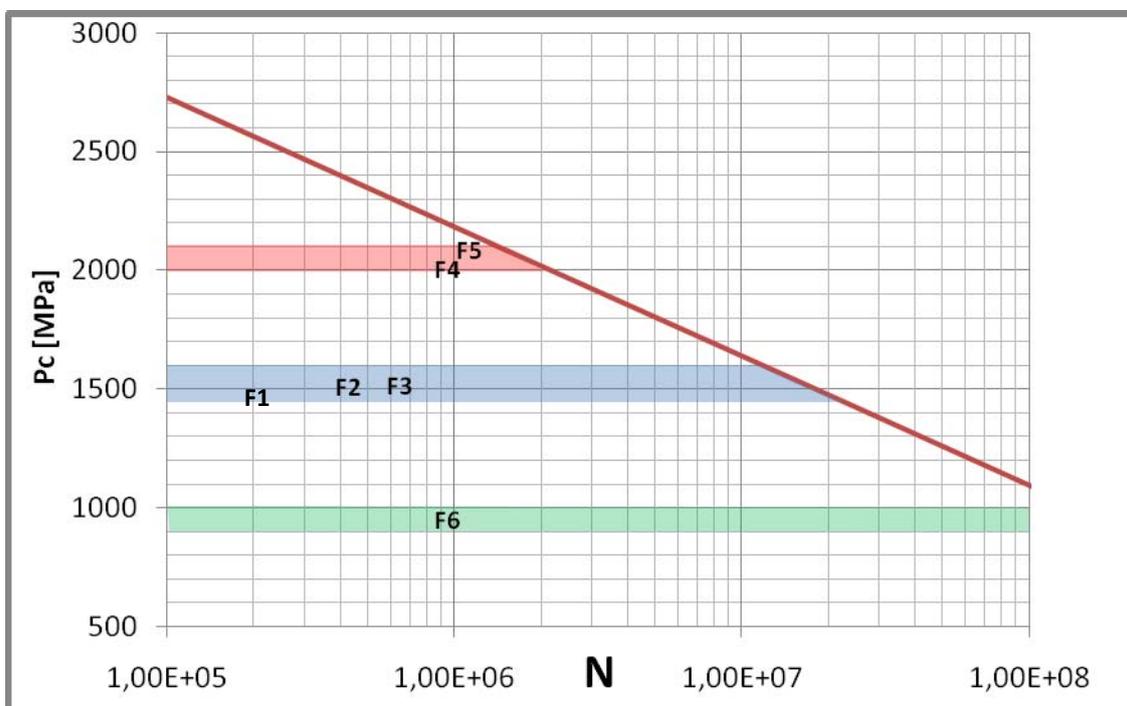
Para a avaliação da vida em fadiga, os estudos por FEM buscaram determinar os valores de pressão de contato entre os cilindros de trabalho e de encosto, como exemplificado na Figura 8. Visto que os perfis de ambos os cilindros promovem um contato não-conforme, a distribuição dessa pressão de contato também se mostra heterogênea. Devido à pressão heterogênea, tomou-se o valor máximo para verificação no diagrama de Wöhler específico do material utilizado para os cilindros de encosto dessa aplicação.



**Figura 8:** Exemplo de plotagem de pressão de contato para estudo por FEM.

A Figura 9 mostra o diagrama de Wöhler do material de cilindro de encosto utilizado, com os respectivos campos de pressão de contato para cada cadeia, cujos valores médios de ciclagem também estão mostrados. Verificando-se o limite da vida em fadiga conforme as pressões de contato obtidas, como mostrado na

Figura 9, é possível observar que as cadeiras críticas são a F4 e a F5. As cadeiras F1, F2, F3 e F6 apresentam possibilidade de extensão imediata. Com isso, foram realizadas extensões de campanhas intermediárias para essas cadeiras, com devido acompanhamento das variações de dureza durante o processo de retificação.



**Figura 9:** Diagrama de Wöhler do material de cilindro utilizado na ArcelorMittal Tubarão, com os campos de pressão de contato e atuais níveis valores. Exemplo de plotagem de pressão de contato para estudo por FEM.

Foram inicialmente estendidas as campanhas da cadeira F6, por apresentar o menor nível de pressão de contato e maior potencial de extensão. Após serviço foram realizadas medições de dureza ao longo da mesa, a cada passe de retífica. Não houve registro de alteração do nível de dureza em relação às condições anteriores de trabalho. O nível de encruamento da superfície do cilindro de encosto é usado como avaliador de seu processo de manutenção, pois possui relação direta com o estado de acúmulo de danos em fadiga.<sup>(3,5)</sup>

O mesmo procedimento foi adotado para as cadeiras F1, F2 e F3, tendo o mesmo comportamento. Até o momento foi possível incrementar o volume de produção em 11% nas primeiras cadeiras, enquanto que na cadeira F6 verificou-se um incremento de 18%. Quanto às cadeiras F4 e F5, ainda terão que ser tomadas algumas ações, entre algumas possibilidades estão: distribuição de reduções dessas cadeiras para as demais; avaliação da possibilidade de uso de maior concentração na emulsão lubrificante; otimização tribológica dos cilindros; otimização do perfil do cilindro (curva CVC®) e definição de janelas de processo para utilização/agrupamento dos diâmetros dos cilindros.

#### 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. Até o

momento foi possível incrementar o volume de produção em 11% nas primeiras cadeiras e em 18% na cadeira F6.

A possibilidade de se atender o objetivo da ArcelorMittal Tubarão quanto ao aumento do volume de produção é plausível. Entretanto, foram verificadas limitações de extensão de campanha nas cadeiras F4 e F5, sendo necessário o desenvolvimento de alguns trabalhos no sentido de se reduzir a pressão de contato entre os cilindros de encosto e de trabalho.

Para continuidade desse trabalho, sugere-se o modelamento matemático da fadiga de contato em laminação, de modo a simular e propor extensões otimizadas de campanha, inclusive por material laminado e posição de cadeira no laminador.

## 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 KAPADIA, B. M. & MARSDEN, K. W. **Spalling behavior of back-up roll materials**. In: Proceeding conference on 39<sup>th</sup> Mechanical Working and Steel Processing. 1998, p.49-386.
- 4 ASM, **ASM Handbook Volume 19: Fatigue and fracture**, ASM International, 1996. 1057p. *apud* NEVES, J.C.K. **Desenvolvimento de um equipamento para ensaio de fadiga de contato esfera sobre plano e sua aplicação na caracterização de ferros fundidos com matrizes de elevada dureza**. 2006. 133f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.
- 5 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.