

ESTUDOS PRÁTICOS DE OTIMIZAÇÃO DA APLICAÇÃO DE CILINDROS DE ENCOSTO¹

Gilson Teixeira Cornélio²
Cláudio Eduardo Rocha dos Santos³
Marcelo Arantes Rebellato⁴
Anderson Gonçalves de Lima⁵
Andrés Esteban⁶

Resumo

Um dos mecanismos de dano mais relevantes nos cilindros de encosto é a fadiga de contato, a qual é fortemente influenciada pelas condições operacionais de manutenção do cilindro, bem como pela própria natureza de seu material. Este trabalho concentra-se em mostrar casos de sucesso na otimização de desempenho em fadiga, atuando na melhoria de práticas operacionais de oficina de cilindros, associada à adequação da qualidade do cilindro ao laminador. Esse processo inicia-se com a verificação das práticas operacionais na oficina de cilindros e no laminador. Em seguida, são utilizadas ferramentas de modelagem computacional para avaliar os fatores relevantes. A partir desses dados e de conhecimento prévio da aplicação, são realizadas alterações da geometria da mesa, bem como ações de acompanhamento operacional e adequação de especificação de cilindro, de modo a prolongar a vida em fadiga de contato. Neste trabalho foram consideradas duas aplicações distintas, em que foi possível aplicar a metodologia, promovendo melhoria de desempenho. Os resultados foram obtidos por meio de ações que abrangeram desde a geometria dos cilindros utilizados, com o emprego de modelamentos matemáticos, até a implementação de melhores práticas na oficina de cilindros. Essas ações permitiram, ainda, a utilização de materiais para cilindro de encosto com qualidade diferenciada.

Palavras-chave: Cilindro de encosto; Fadiga de contato; Otimização

BACK-UP ROLL OPTIMIZATION: PRACTICAL CASES

Abstract

One of the most relevant mechanisms of damage in backup rolls is contact fatigue, which is strongly related by operational maintenance requirements in the roll shop and with the material characteristics. The focus of this work is showing success cases in the optimization of fatigue tolerance, working on improving operational practices in the roll shop associated with the adequacy between roll qualities and the mill. This process starts with a roll shop and mill assessments. After this assessment, are used computer modeling tools to evaluate the mains relevant factors. From these data and prior knowledge of the application, some changes are made in the rolls geometry, operational maintenance and in some cases the roll specification is modified to ensure the better fatigue tolerance. In this paper is considered two distinct applications. It was possible to apply the methodology, enabling improved performance. Results were obtained with actions in roll geometries, by means of mathematical models, implementation of new practices in the roll shop and the better choice for the roll quality.

Keywords: Back-up rolls; Contact fatigue; Optimization.

¹ Contribuição técnica ao 47º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 26 a 29 de outubro de 2010, Belo Horizonte, MG.

² Engº Químico, doutorando em eng.mecânica, gestor de contas de aplicação – Villares Rolls

³ Engº Metalurgista, mestrando em engenharia metalúrgica, supervisor de inovação – Villares Rolls

⁴ Engº Metalurgista, gerente de departamento técnico-comercial de cilindros – Villares Rolls

⁵ Engº. Metalurgista, engenheiro de produção – CSN Volta Redonda.

⁶ Engº Metal, Jefe de Sector – Ternium Siderar.

1 INTRODUÇÃO

Sob o ponto de vista da construção de cadeiras para a laminação de tiras, é possível que o avanço mais significativo tenha sido a utilização de cilindros de apoio para garantir a planicidade da tira. Com a demanda crescente por qualidade, foram desenvolvidas tecnologias de posicionamento e controle do contato entre cilindros de trabalho e apoio, bem como entre cilindro de trabalho e tira. Entre essas tecnologias, pode-se citar como as mais difundidas: *bending*, *shifting*, *crossing*, e CVC® (*Continuous Variable Crown*).^(1,2) Entretanto, essas tecnologias não minimizaram as condições de dano superficial dos cilindros de apoio, os quais merecem especial atenção, principalmente quando há a intenção de aumentar o volume de produção e/ou produzir um novo tipo de produto.

Um cilindro de apoio é submetido a diversas condições de desgaste,⁽³⁾ principalmente 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 desses mecanismos de dano.

A fadiga de contato decorre do carregamento cíclico sobre contatos não-conformes, do qual resulta um acúmulo de dano¹ 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,⁽⁴⁾ como pode ser observado na Figura 1. Contudo, pode-se observar que todos os fatores são responsáveis por intensificar o nível de tensões a que a região está submetida. Esses intensificadores poderão ter origem externa, 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.



Figura 1: Fatores que afetam a vida em fadiga de contato.⁽⁴⁾

¹ Acúmulo de discordâncias devido a deformações plásticas ocorrentes nesse tribossistema.

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⁽⁵⁾ a vida do cilindro de apoio no que diz respeito à ocorrência de lascamentos – *spallings*. Esses lascamentos 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 à ocorrência de choques térmicos em acidentes ou remanescentes do processo de retificação.

A contínua necessidade de aumento de produtividade para atender a atual demanda de aço e a introdução de diferentes classes de produto, tanto de material como de especificações dimensionais das tiras laminadas, leva à implantação de práticas operacionais diferenciadas para manutenção de cilindros de apoio.

Partindo dessas premissas, uma boa prática operacional para manutenção de cilindros de apoio consiste em medições de perfil dimensional, de dureza e, se possível, de tensões residuais, ao longo da mesa. Essas medições devem ser realizadas antes e depois da utilização, fazendo-se análise do encruamento e do desgaste, para levar à melhor decisão de remoção em retífica. Com isso, é possível associar produtividade à segurança, no que tange vida em fadiga.

Outra premissa que deve ser considerada é a geometria do caimento de borda (*BUR edge relief*), a qual afetará a distribuição de carregamento ao longo da mesa do cilindro de apoio e, portanto, afetará sua vida em fadiga.

Esse trabalho tem como objetivo mostrar dois estudos, com foco na alteração do caimento de borda do cilindro de encosto, que foram sugeridas a partir de simulações computacionais. O uso dessas modificações resultou em redução de lascamentos de borda em um caso e melhoria do perfil da tira em outro, o que valida a utilização desse procedimento de análise.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As propostas de modificações geométricas foram idealizadas com o uso de dois recursos: i/ simulação da laminação com o uso do aplicativo Rollflex[®], desenvolvido pelo *ITA Technology & Software* e ii/ modelamento por elementos finitos, utilizando o *software Solidworks Simulation Professional 2010[®]*.

2.1 Rollflex

Esse aplicativo⁽⁶⁾ permite estimar a distribuição da força de laminação ao longo da mesa dos cilindros, inserindo apenas informações de geometria dos cilindros e da tira e de força total de separação. Devido à baixa rigidez transversal da tira, o aplicativo assume um carregamento vertical simétrico ao longo da tira (Figura 2), mesmo para configurações de cadeiras assimétricas.

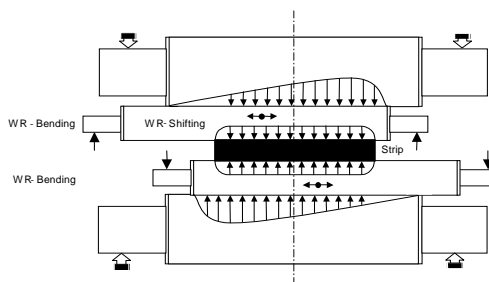


Figura 2: Distribuição esquemática da carga na tira gerada pelo aplicativo Rollflex.

Para as simulações realizadas nesse aplicativo, foram assumidas as seguintes premissas para o modelamento computacional:

- não há mudanças abruptas na força de contato entre os cilindros;
- os cilindros apresentam propriedades elásticas isotrópicas;
- as deformações dos cilindros são causadas por flexão; e
- a cadeia de laminação é considerada um corpo rígido.

Foi desenvolvido um modelo de viga elástica simples, cujos deslocamentos descrevem a deformação dos cilindros. Essa deformação é constituída por dois elementos: i/ flexão da linha de centro e ii/ deformação local causada pelos contatos cilindro-cilindro e cilindro-tira. O primeiro elemento obedece a um regime linear elástico, enquanto o segundo, obedece ao regime não-linear e pode ser removido se a pressão entre os cilindros for menor ou igual a zero. Nesse trabalho foram considerados dois casos de estudo, que serão detalhados a seguir.

- **CASO 1:** a necessidade de laminar produtos mais largos impossibilitou o uso do chanfro original (68,1 mm), uma vez que o comprimento de contato entre os cilindros de encosto e de trabalho, nessa nova configuração, seria inferior à largura da tira. Portanto, esse estudo objetivou alterar a distribuição de cargas de contato na borda, de modo a prevenir a ocorrência de lascamento nessa região. As características geométricas dos cilindros e o aumento da largura da tira podem ser observados na Figura 4. Foram realizadas simulações com diferentes geometrias de caimento do cilindro de encosto, cujo planejamento está mostrado na Tabela 1.

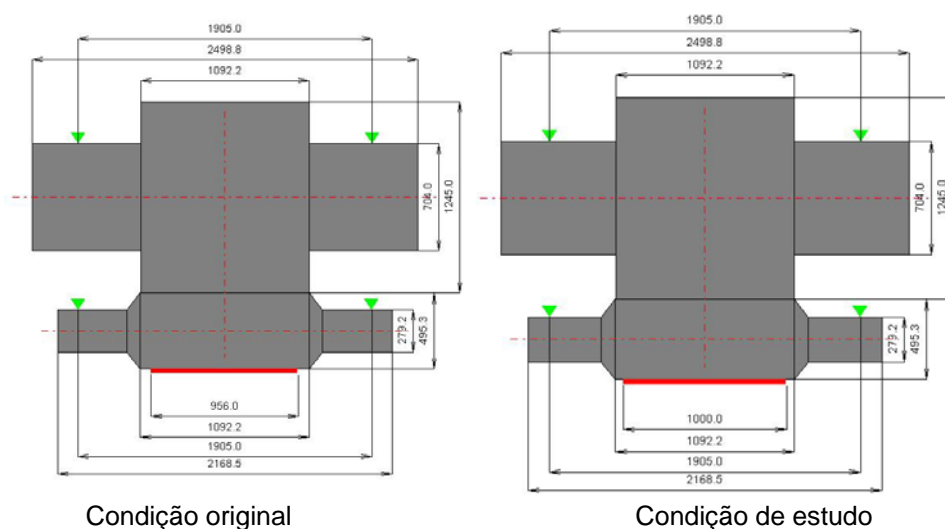


Figura 4: Representação esquemática dos cilindros e tira para o CASO 1. Esse estudo se concentra na possibilidade de laminação de produto mais largo.

Tabela 1: Planejamento de simulações para o CASO 1. Foram variadas as dimensões de comprimento e altura do chanfro (caimento). A configuração original encontra-se realçada e grifada. Dimensões em mm

Exp	Largura da tira	Comprimento do chanfro	Altura do chanfro
1	<u>956</u>	50,0	0,15
2			0,38
3		<u>68,1</u>	0,15
4			<u>0,38</u>
5	1000	50,0	0,15
6			0,38
7		68,1	0,15
8			0,38

- **CASO 2:** o aumento da largura de tira promoveu a incidência de lascamentos de borda em cilindros de encosto. A fim de reduzir essa incidência, estudou-se a possibilidade de efetuar modificações do chanfro (caimento). A Figura 5 mostra os detalhes dimensionais desse estudo.

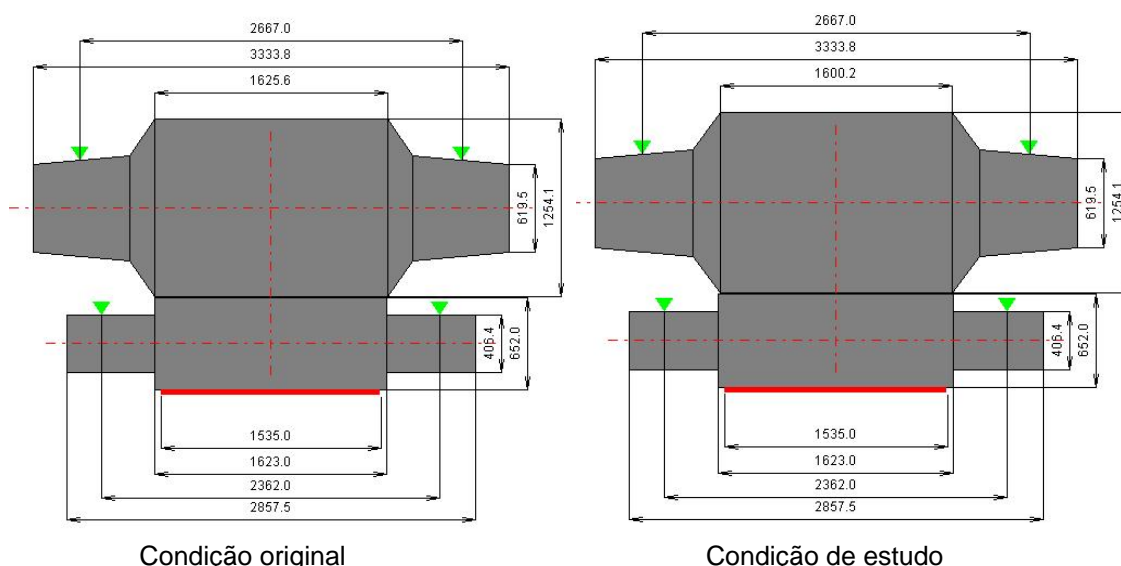


Figura 5: Representação esquemática dos cilindros e tira para o CASO 2. Esse estudo objetiva a redução da ocorrência de lascamentos de borda. Houve a necessidade de reduzir o comprimento da mesa dos cilindros de encosto.

Foram avaliadas duas condições de altura do chanfro e dois comprimentos de mesa, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2: Planejamento de simulações para o CASO 2. Foi realizada uma proposta de alteração, conforme necessidade prévia. Dimensões em mm

Exp	Comprimento da mesa	Altura do Chanfro	OBS
1	1.625,6	0,65	Referência paramétrica
2	1.600,2	2,54	Proposta

2.2 Elementos Finitos

Realizaram-se modelamentos sólidos dos cilindros de encosto e trabalho, utilizando malhas com elementos tetraédricos com quatro pontos jacobianos. A figura 6 detalha o modelamento sólido tridimensional e a malha gerada, com atenção especial ao refino utilizado nas bordas da mesa dos cilindros de encosto. Para

modelar o contato entre o cilindro de trabalho e a tira, foi utilizado o recurso “parede virtual” do próprio *software* e testes de convergência para refino da malha. Para todo o modelamento foi considerado regime linear elástico, sendo realizada uma análise paramétrica, a fim de verificar o efeito das modificações na distribuição de tensões. As condições dimensionais de simulação são análogas às descritas no item 2.1

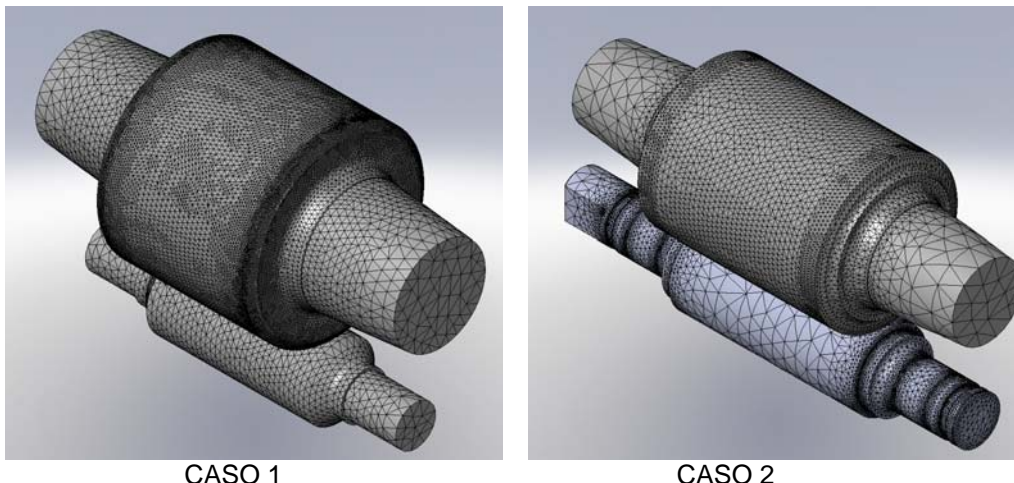


Figura 6: Modelamento sólido tridimensional e malha de elementos finitos utilizados para os estudos de caso. *Objetivou-se, principalmente, o refino de malha próximo às bordas da mesa dos cilindros de encosto.*

3 RESULTADOS

3.1 Caso 1

A distribuição de carregamento linear na superfície da mesa do cilindro de encosto nas regiões próximo à borda e centro da mesa pode ser observada nas Figuras 7 e 8, respectivamente. Embora a configuração original (ch 68,1x0,38) apresente a condição de menor carregamento linear próximo à borda, a limitação dimensional do chanfro (proposto ch 50,0) em função da nova largura da tira impossibilitou seu emprego. O estudo realizado indicou que a distribuição mais adequada desta nova configuração é obtida pela altura 0,15 mm.

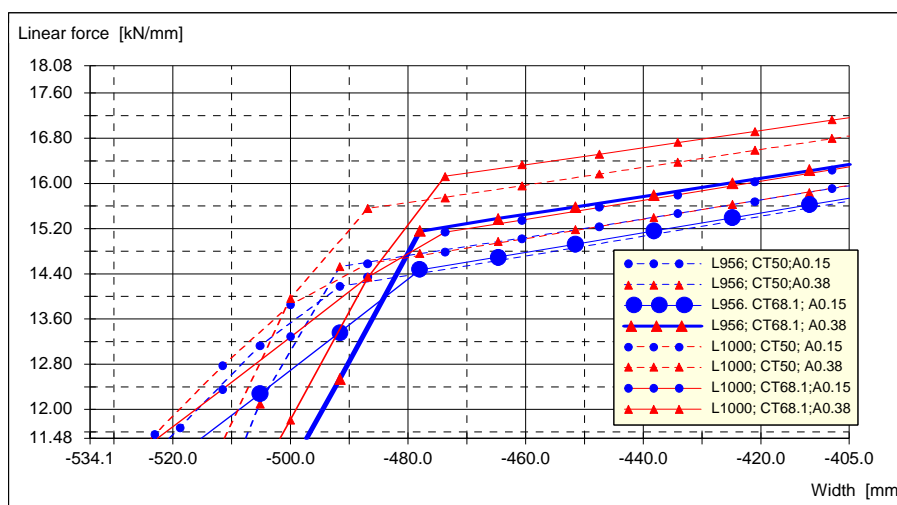


Figura 7: Distribuição de carga linear na superfície da mesa próximo à borda, Caso 1.

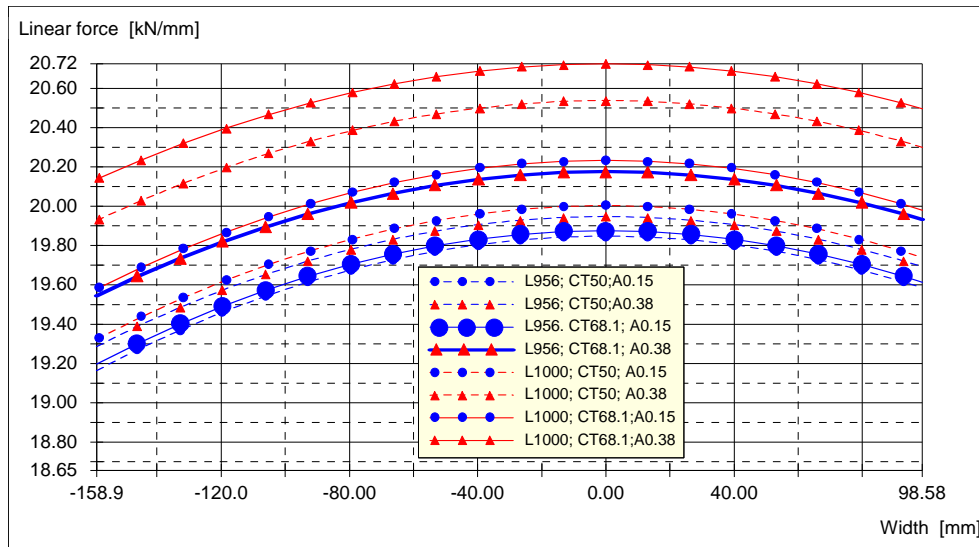


Figura 8: Distribuição de carga linear na superfície da mesa próximo ao centro, Caso 1.

A análise paramétrica por elementos finitos, representada graficamente na Figura 9, não constatou diferenças significativas na distribuição de tensões de Von Mises², quando comparadas as configurações de chanfro original (ch 68,1x0,38 mm) e a proposta final (ch 50,0x0,15 mm). Essa constatação validou a implementação dessa nova configuração, que após diversos testes na operação, promoveu melhoria na qualidade superficial da borda da tira, além da prevenção de ocorrência de lascamentos nessa região.

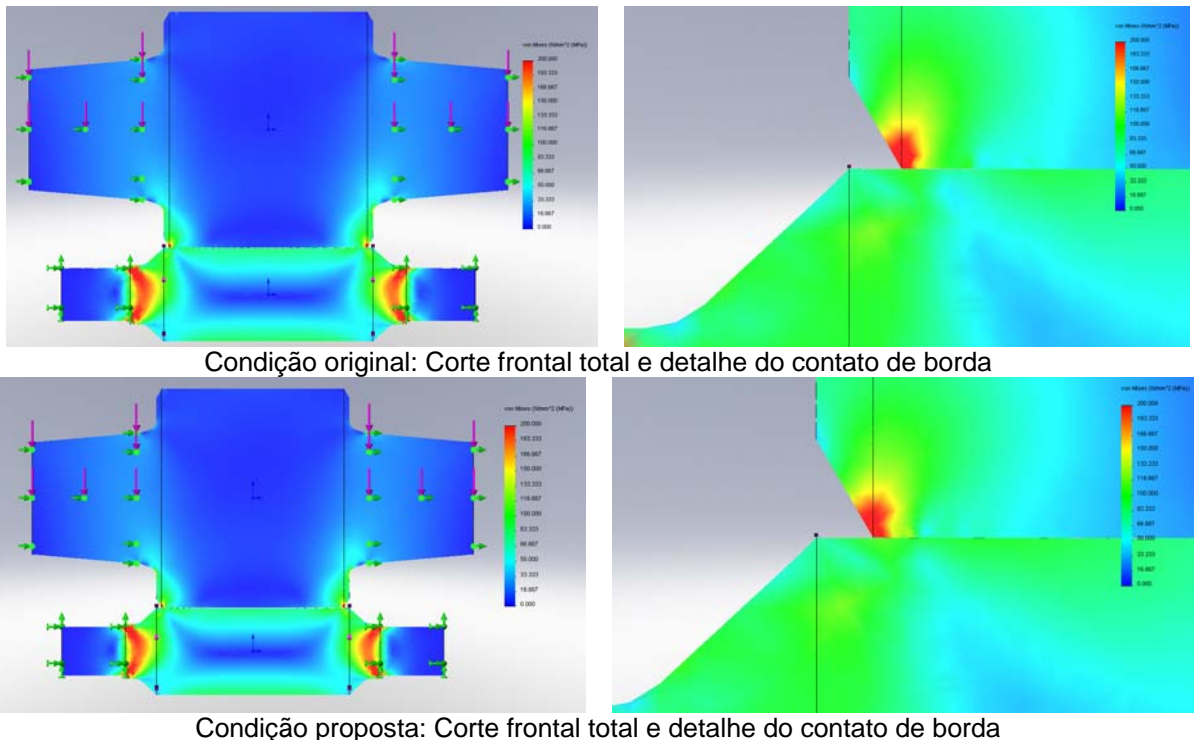


Figura 9: Representação gráfica da distribuição das tensões de Von Mises nos cilindros de trabalho e encosto, CASO 1. Não foi verificada uma diferença significativa entre as condições original e proposta.

² Tensões equivalentes, trata-se de um escalar positivo definido em termos das tensões normais e cisalhantes.

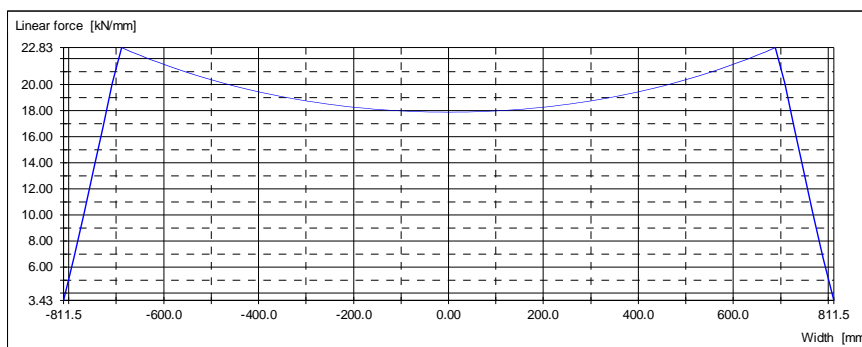
3.2 Caso 2

Neste estudo de caso foi realizada a proposta de alteração no comprimento da mesa, otimizando o contato entre os cilindros de encosto e trabalho. Objetivou-se a redução ou eliminação de carregamento linear próximo da borda da mesa do cilindro de encosto, evitando acúmulo de dano que pudesse promover a nucleação de trincas por fadiga de contato.

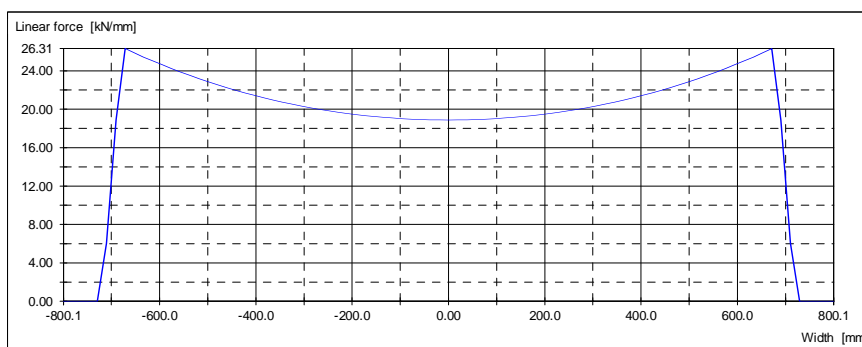
Com a alteração proposta foi possível eliminar tal condição, como mostrado na Figura 10. É possível verificar que o carregamento linear se anula junto às bordas da mesa do cilindro de encosto. O estudo paramétrico por elementos finitos também mostrou a eliminação de regiões de concentração de tensões nessa mesma região, conforme indica a representação gráfica das tensões de Von Mises na Figura 11.

Após a implementação dessas modificações, observou-se a redução da ocorrência de lascamentos nessa aplicação.

O estudo indicou, ainda, a possibilidade de prolongamento de campanha, com ganhos potenciais em produtividade e disponibilidade do laminador. Para tanto, seria necessário um modelamento matemático, considerando a distribuição de tensões máximas cisalhantes em função das geometrias de contato, do material laminado e do material de cilindro, de modo a determinar o número de ciclos até a nucleação da trinca por fadiga em contato.



Condição original



Condição proposta

Figura 10: Distribuição de carga linear na superfície da mesa do cilindro de encosto, CASO 2. Verificou-se a anulação do carregamento na borda na condição proposta.

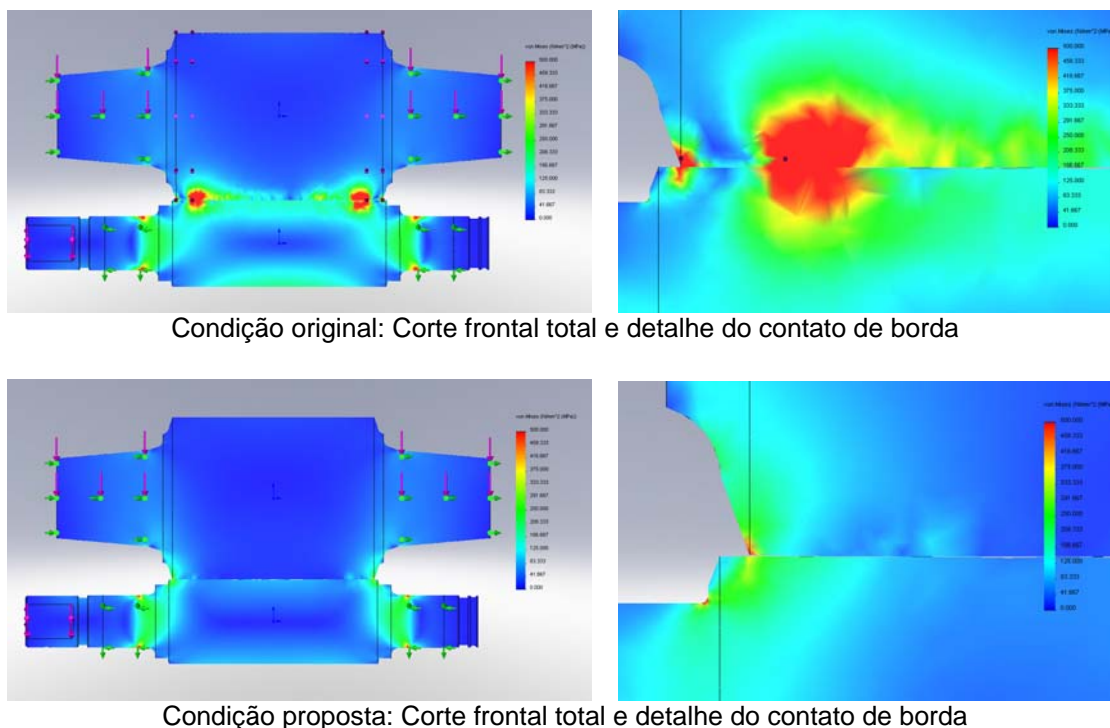


Figura 11: Representação gráfica da distribuição das tensões de Von Mises nos cilindros de trabalho e encosto, Caso 2. Foi verificada uma diferença significativa entre as condições original e proposta.

4 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS ADICIONAIS

O método e as ferramentas utilizadas mostraram-se eficientes para auxiliar na definição do perfil de mesa do cilindro de encosto, tanto para prevenção como para solução de ocorrências de falhas por fadiga de contato. Entretanto, a iteração de variáveis precisa ser estudada, inclusive realizando projetos de experimentos com maior número de fatores. Adicionalmente, é preciso verificar a influência dessas possíveis alterações na qualidade da tira, de forma não só qualitativa, mas quantitativa.

Essa metodologia também possibilita avaliar, empiricamente, a extensão de campanha, em função da otimização do acúmulo de dano em fadiga de contato. Dessa forma, além do atendimento de novos requisitos do mercado em termos dimensionais de tiras, ainda é possível obter ganhos de produtividade e disponibilidade do laminador.

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 39th 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.
- 6 HAJDUK, Daniel. **ROLLFLEX – Roll Stack deflection analysis: Engineering Manual.** 2009. ITA Technology & Software. 40p.