

# OTIMIZAÇÃO DA VIDA EM FADIGA DE CILINDROS DE APOIO<sup>1</sup>

*Gilson Teixeira Cornelio<sup>2</sup>  
Leonardo Villabón<sup>3</sup>  
Marcelo Arantes Rebellato<sup>4</sup>*

## **Resumo**

Um dos mecanismos de dano mais relevantes nos cilindros de apoio é a fadiga de contato na borda. Este trabalho concentra-se na otimização do perfil geométrico do caimento da borda da mesa, de modo a melhor distribuir o nível de tensões, sendo possível evitar a ocorrência de lascamentos nessa região, com subsequente aumento da campanha. Foi desenvolvido um sistema computacional, o qual é alimentado com dados geométricos do cilindro de trabalho e encosto. Também são utilizados dados de condição operacional da laminação. Com isso, são obtidos perfis de distribuição de tensões ao longo da mesa, os quais podem ser simulados modificando-se as condições previamente alimentadas. A partir dessas curvas e conhecimento do laminador e suas condições operacionais, é possível otimizar o perfil geométrico do cilindro de apoio. Com essa otimização, é possível eliminar a ocorrência de lascamentos nas bordas. Algumas simulações ainda estão sendo realizadas, inclusive como proposta de melhorias em aplicações reais.

**Palavras-chave:** Cilindros de apoio; Fadiga de contato; Otimização

## **BACK-UP ROLL FATIGUE LIFE OPTIMIZATION**

### **Abstract**

One of the most important mechanisms of damage in back-up rolls is the contact fatigue in the edge. This work is concentrated in the optimization of the geometric profile of the barrel edge relief, in order better to distribute the tension level, being possible to prevent the occurrence of spallings in this region, with subsequent increase of the campaign. A computational system was developed, which is fed with geometric data of the work and back-up rolls. Also they are used given of operational condition of the rolling mill. With this, profiles of tension distribution throughout the barrel are gotten, which can be simulated modifying the conditions previously fed. From these curves and operational knowledge of the rolling mill and its conditions, it is possible to optimize the geometric profile of the back-up roll. With this optimization, it is possible to eliminate the occurrence of edge spallings. Some simulations still are being carried through, also as proposal of improvements in real applications.

**Key words:** Back-up rolls; Contact fatigue; Optimization

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 45º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 21 a 24 de outubro de 2008, Ipojuca - Porto de Galinhas - PE*

<sup>2</sup> *Mestre em engenharia, engenheiro químico, coordenador de projetos – Rolling Mill Solutions – Villares Rolls e vice-diretor regional da ABM-Vale do Paraíba/SP.*

<sup>3</sup> *Mestre em engenharia, engenheiro mecânico, supervisor de engenharia – Villares Rolls*

<sup>4</sup> *Engenheiro metalúrgico, gerente – Rolling Mill Solutions – Villares Rolls*

# 1 INTRODUÇÃO

Segundo Ginzburg e Ballas,<sup>(1)</sup> o termo perfil da tira é utilizado para descrever a qualidade do produto obtido por laminação plana, no que diz respeito à homogeneidade da espessura, tanto no sentido longitudinal como transversal. O mesmo autor define como os principais parâmetros que afetam essa medida, listados a seguir:

- Deflexão do cilindro devido à carga de laminação;
- Coroamento mecânico e térmico do cilindro de trabalho;
- Desgaste e danos acumulados na superfície do cilindro de trabalho e
- Deformação irregular da borda da tira.

Diversas tecnologias têm sido desenvolvidas para minimizar esses efeitos, desde o uso de cilindros de apoio até a utilização de uma calibração diferenciada da mesa dos cilindros de trabalho e apoio. O uso de tecnologias tais como *bending*, *shifting* e *crossing* estão intensamente difundidas.<sup>(2)</sup> Entretanto, uma atualização de sistemas recentes como o CVC<sup>®</sup> (*Continuous Variable Crown*) está sendo disponibilizado ao mercado,<sup>(3)</sup> o que mostra a contínua preocupação de desenvolvimento de tecnologias que propiciem uma melhor qualidade dimensional da tira.

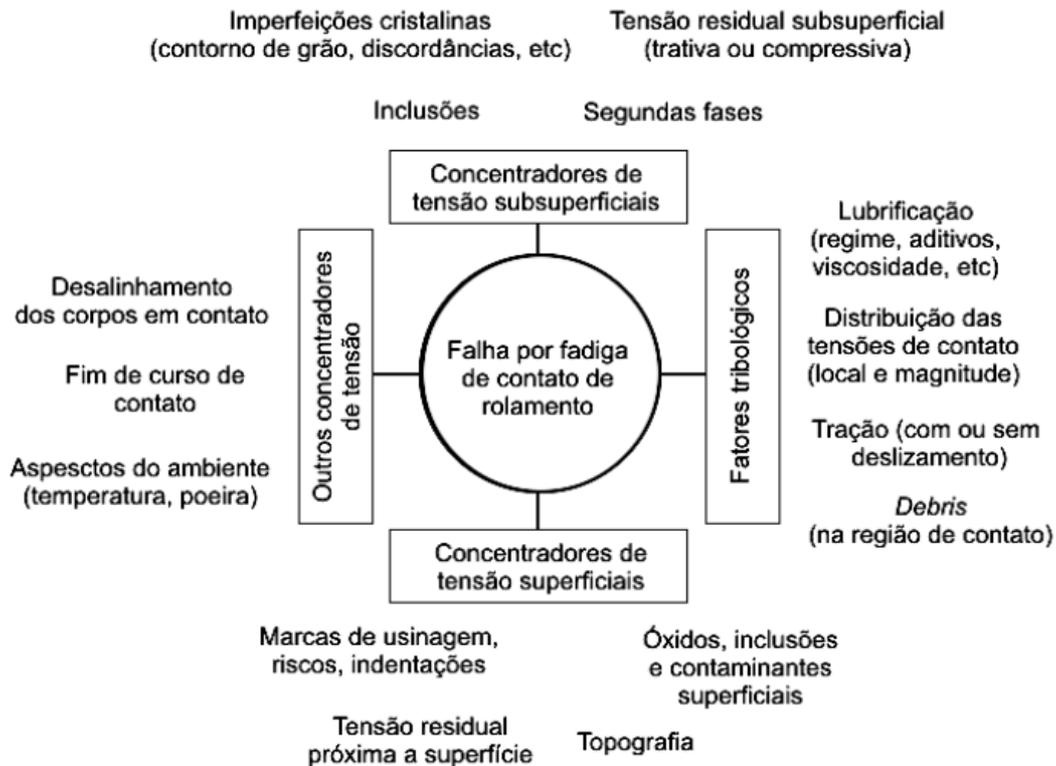
No caso de laminação de tiras, a utilização de cilindros de apoio (*back-up*) deve-se à minimização do efeito de deflexão do cilindro de trabalho. Entretanto, as condições de uso e sua manutenção divergem daquelas observadas aos cilindros de trabalho. Um cilindro de apoio é submetido a diversas condições de desgaste,<sup>(4)</sup> 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 no acúmulo de dano<sup>1</sup> 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>(5)</sup>, como pode ser observado na Figura 1. Contudo, pode-se observar que todos eles convergem para o nível de tensões que a região está submetida, sendo afetada por diferentes intensificadores de tensões. Esses intensificadores poderão ter origem externa, como a presença de debris, particulados, contatos disformes, etc. Mas também poderá apresentar origem interna, incluindo imperfeições microestruturais, inclusões, rugosidade, entre outros. Enfim, o tribossistema irá definir a condição e intensificação do nível de tensões.

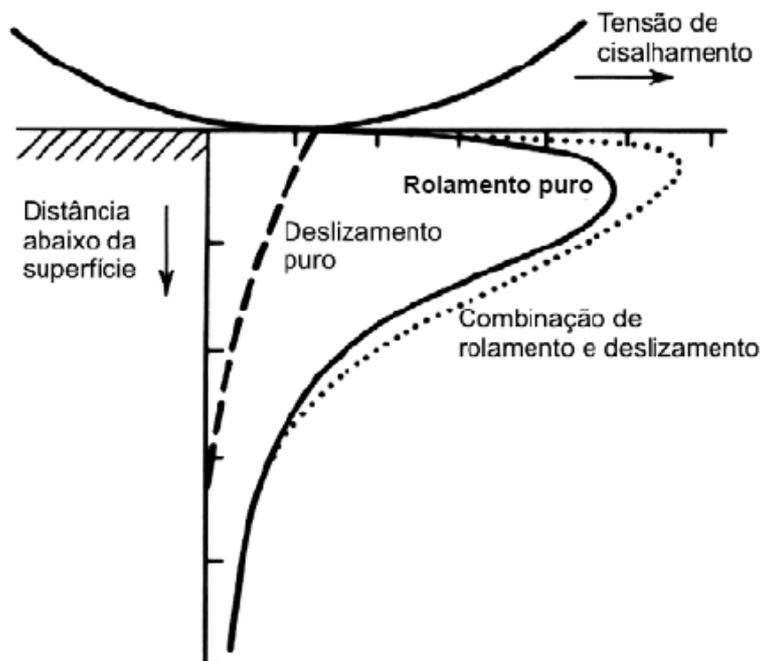
Considerando um movimento de rolamento puro de um cilindro sobre uma superfície plana, a máxima tensão de cisalhamento está posicionada abaixo da superfície de contato, enquanto que em deslizamento puro, a máxima tensão cisalhante ocorre na própria superfície de contato. Quando são considerados regimes mistos, nos quais estão presentes tanto rolamento como deslizamento, a posição da máxima tensão cisalhante dependerá da magnitude do atrito de deslizamento. Esse comportamento está mostrado na Figura 2.

---

<sup>1</sup> Acúmulo de discordância devido deformações plásticas ocorrentes nesse tribossistema.



**Figura 1:** Fatores que afetam a vida em fadiga de contato (ASM *apud* Neves)



**Figura 2:** Representação esquemática da distribuição de tensões de cisalhamento abaixo do contato nas situações de rolamento puro, deslizamento e rolamento com deslizamento (ASM *apud* Neves).

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

afetam<sup>(6)</sup> 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 provocará acúmulo de dano e nucleação de trincas subsuperficiais;
- Propagação de trincas nucleadas na superfície, devido ocorrência de choques térmicos em acidentes ou remanescentes do processo de retificação.

Com a contínua necessidade de aumento de produtividade para atender a atual demanda e um mercado aquecido para consumo de aço, práticas operacionais de manutenção de cilindros de apoio necessitam desenvolver métodos que otimizem maior tempo de trabalho no laminador à segurança do cilindro. A Figura 3, proposta por Ohkomori et al.,<sup>(6)</sup> mostra a evolução do acúmulo de dano ao longo das retificações. Uma boa prática opera até 80% do limite teórico de resistência à fadiga. O acúmulo de dano poderá ser praticamente medido mediante incremento de dureza superficial como incremento de tensões residuais. Este pode ser determinado mediante técnicas de difratometria de raios-X.

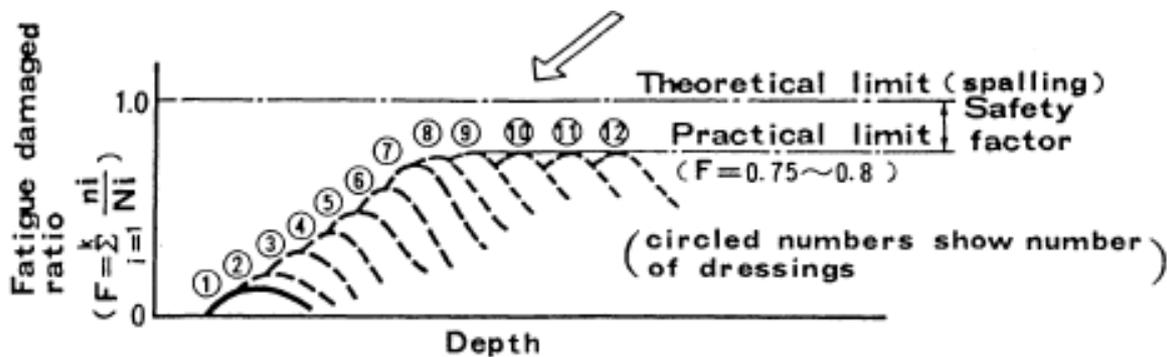


Figura 3: Acúmulo de dano em vida à fadiga, ao longo das manutenções do cilindro de apoio.<sup>(6)</sup>

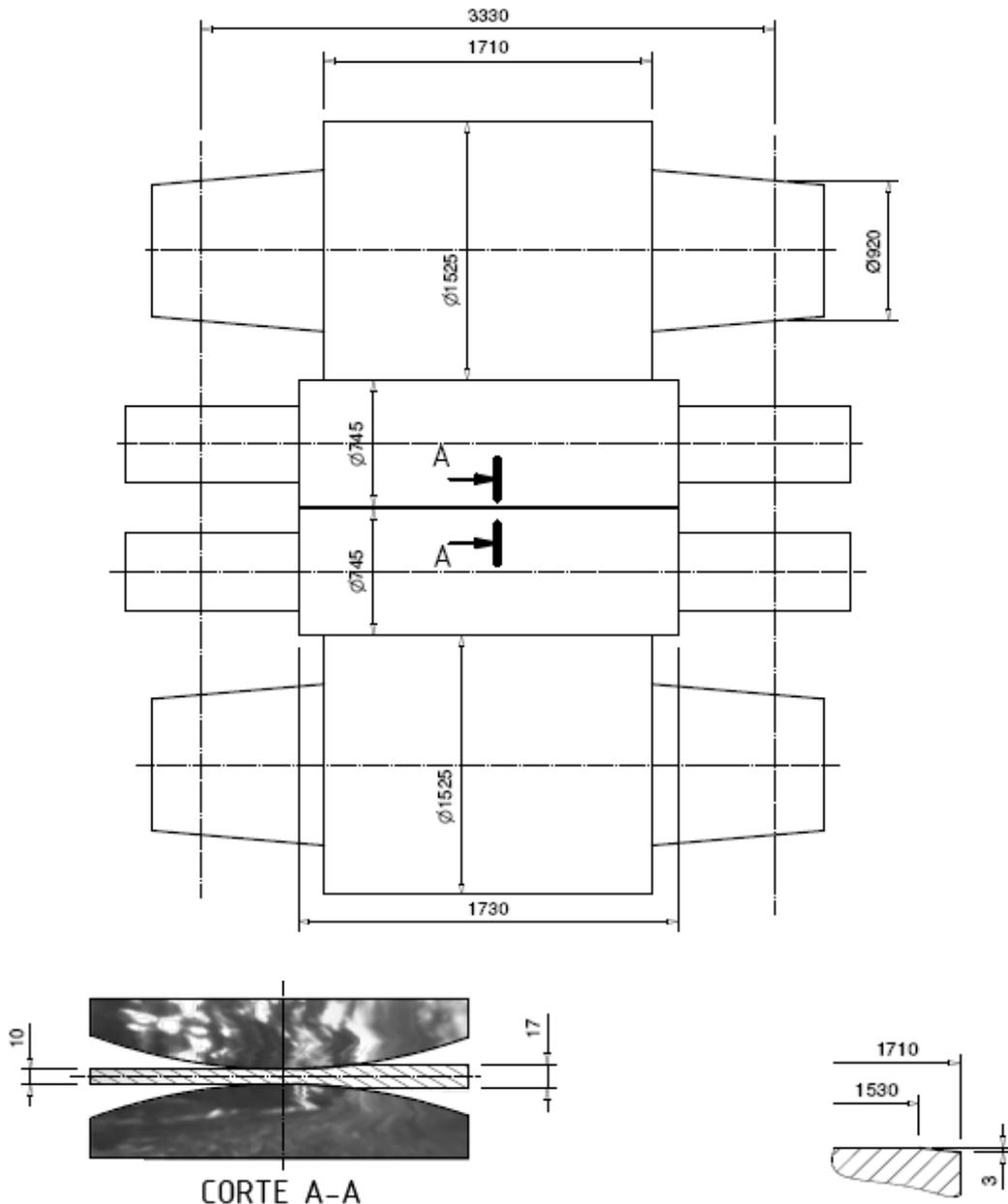
Partindo dessas premissas, uma boa prática operacional de manutenção de cilindros de apoio consiste em medições de perfil dimensional, dureza e, se possível, tensões residuais, ao longo da mesa. Essas realizadas antes e depois do trabalho em laminador, fazendo-se análise do encruamento e desgaste, para a melhor decisão da remoção em retífica. Com isso, é possível associar produtividade à segurança, pensando em vida à fadiga.

Outras premissas podem ser consideradas, entre elas, dimensões do caimento de borda (*BUR edge relief*), o qual afetará na distribuição de carregamento ao longo da mesa do cilindro de apoio e, portanto, também afetará sua vida em fadiga. Pensando nisso, foi desenvolvido um aplicativo em plataforma JAVA<sup>®</sup> para a determinação desse perfil, variando-se condições dimensionais dos cilindros de apoio e trabalho, bem como dimensões da tira laminada. Esse desenvolvimento foi feito utilizando métodos analíticos e por diferenças finitas.

Esse trabalho tem como objetivo mostrar algumas condições de simulação, de modo a tornar efetiva a utilização dessa ferramenta como um meio de decisões de definições dimensionais na manutenção de cilindros de apoio para laminação de tiras.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Utilizando o aplicativo desenvolvido em plataforma JAVA<sup>®</sup>, foram simuladas quatro diferentes condições para o perfil de contato. Entretanto, como condições de referência foram adotadas as dimensões mostradas na Figura 4, denominada de condição ZERO. A partir desta, apenas uma variável foi estudada, conforme descrito adiante.



**Figura 4:** Esquematisação das dimensões da condição ZERO.

**Condição A:** Variado o comprimento de contato do cilindro de apoio

ZERO:	1.530 mm
A1:	1.500 mm
A2:	1.550 mm
A3:	1.510 mm

**Condição B:** Incluído o coroamento convexo, adotando-se o mesmo valor para cilindro de apoio e trabalho.

ZERO:	0 mm
B1:	0,1 mm
B2:	0,2 mm
B3:	0,3 mm

**Condição C:** Variada altura do chanfro de alívio de borda.

ZERO:	3 mm
C1:	1 mm
C2:	2 mm
C3:	5 mm

**Condição D:** Variada largura da tira laminada

ZERO:	1.240 mm
D1:	1.200 mm
D2:	1.300 mm
D3:	1.350 mm

A partir de cada uma dessas condições, os dados foram inseridos no aplicativo. As saídas foram exportadas e tratadas em MS-Excel® e apresentados na forma gráfica por pontos de dispersão. Adicionalmente a essas simulações ainda foi realizado um projeto de experimentos com somente dois fatores: coroamento do cilindro de apoio e largura da tira laminada. Objetivou-se mostrar uma possibilidade de verificação de iterações, calculando-se os efeitos para cada um desses fatores (variáveis). A matriz de experimentos utilizada está mostrada na Tabela 1.

**Tabela 1:** Matriz de experimentos (testes) planejados.

Teste	Coroamento	Largura
1	0,1 mm	1.250 mm
2	0 mm	1.250 mm
3	0,1 mm	1.200 mm
4	0 mm	1.200 mm

Os cálculos dos efeitos são realizados pela diferença do somatório dos resultados regulados no nível superior e inferior. Também foi calculado o efeito da iteração (Coroamento x Largura).

### 3 RESULTADOS

Os resultados de cada uma das simulações podem ser observadas nas Figuras 5 a 8. O comprimento de contato não mostrou, nas condições estudadas, grandes variações na distribuição do carregamento ao longo da mesa do cilindro de encosto, porém, mostrou grande influência no nível global de tensões, conforme mostra a Figura 5. Esse mesmo comportamento também foi observado quando variada a altura do caimento (chanfro), mas com menor intensidade e mais observado quando se aproxima da borda da mesa, conforme pode ser observado na Figura 7.

Tanto o uso de coroamento como a alteração da largura da tira mostraram alterações do perfil de distribuição de carregamento ao longo da mesa, como

mostrado nas Figuras 6 e 8. Observou-se significativa intensificação da amplitude de carregamento a medida que se incrementavam ambas variáveis.

Os perfis obtidos da simulação de iteração entre os fatores coroamento do cilindro de apoio e largura da tira laminada pode ser observado na Figura 9. Ainda o coroamento possui influência mais marcante no que diz respeito à intensificação e concentração de carga, entretanto, com maior largura de tira, essa distribuição apresenta uma menor amplitude.

A Tabela 2 mostra o cálculo dos efeitos para cada um dos fatores e sua iteração. Foi verificado que o coroamento apresenta a maior influência, tanto no máximo carregamento como na amplitude da distribuição. A iteração entre os fatores também apresentou significativa influência, entretanto, com comportamentos contrários, indicado pelo sinal negativo dos respectivos efeitos.

**Tabela 2:** Cálculos dos efeitos para cada fator e iteração.

	Coroa	Largura	Coroa.Largura	Máx	R
1	1	1	1	1167	133
2	-1	1	-1	1164	66
3	1	-1	-1	1184	158
4	-1	-1	1	1156	41
<b>Efeito - Máx</b>	<b>31</b>	<b>-9</b>	<b>-25</b>		
<b>Efeito - R</b>	<b>184</b>	<b>0</b>	<b>-50</b>		

A seguir está mostrado o memorial de cálculo dos efeitos.

$$\text{Efeito (Coroa no Carregamento máximo)} = (1167 + 1184) - (1164 + 1156)$$

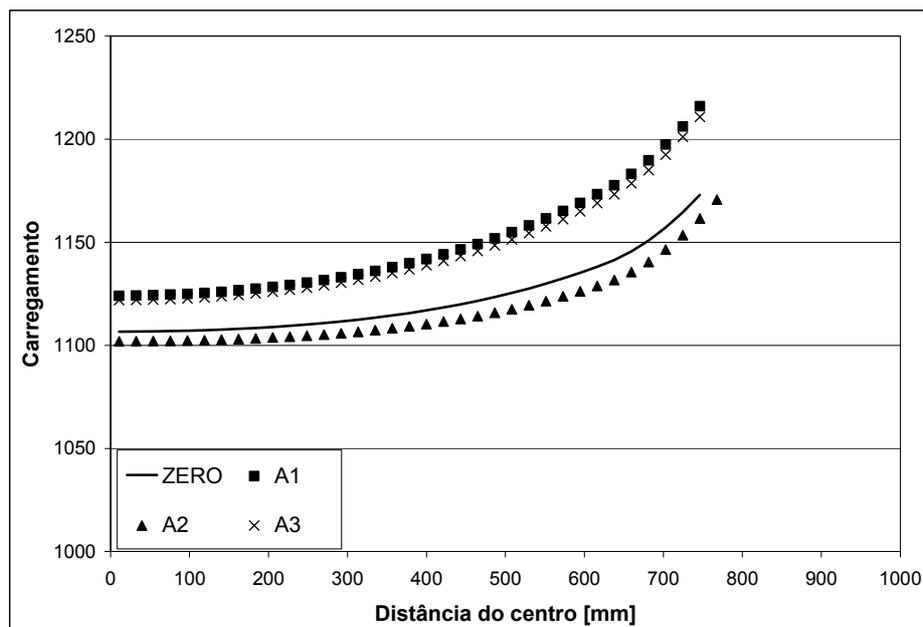
$$\text{Efeito (Largura no Carregamento máximo)} = (1167 + 1154) - (1184 + 1156)$$

$$\text{Efeito (Coroa na amplitude da distribuição)} = (133 + 158) - (66+41)$$

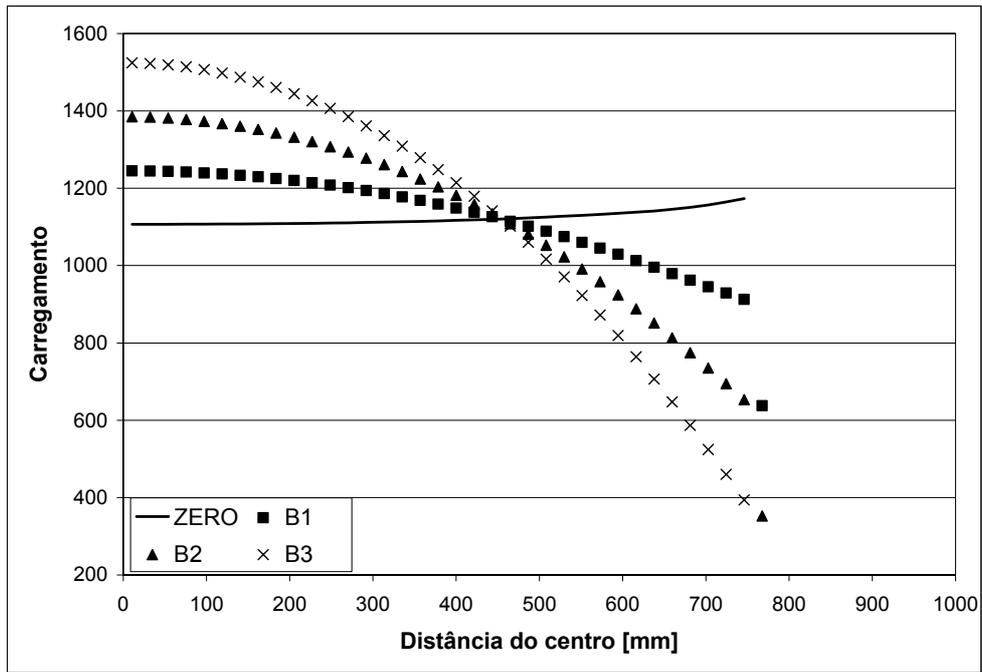
$$\text{Efeito (Largura na amplitude da distribuição)} = (133 + 66) - (158 + 41)$$

$$\text{Efeito (Iteração no Carregamento máximo)} = (1167 + 1156) - (1164 + 1184)$$

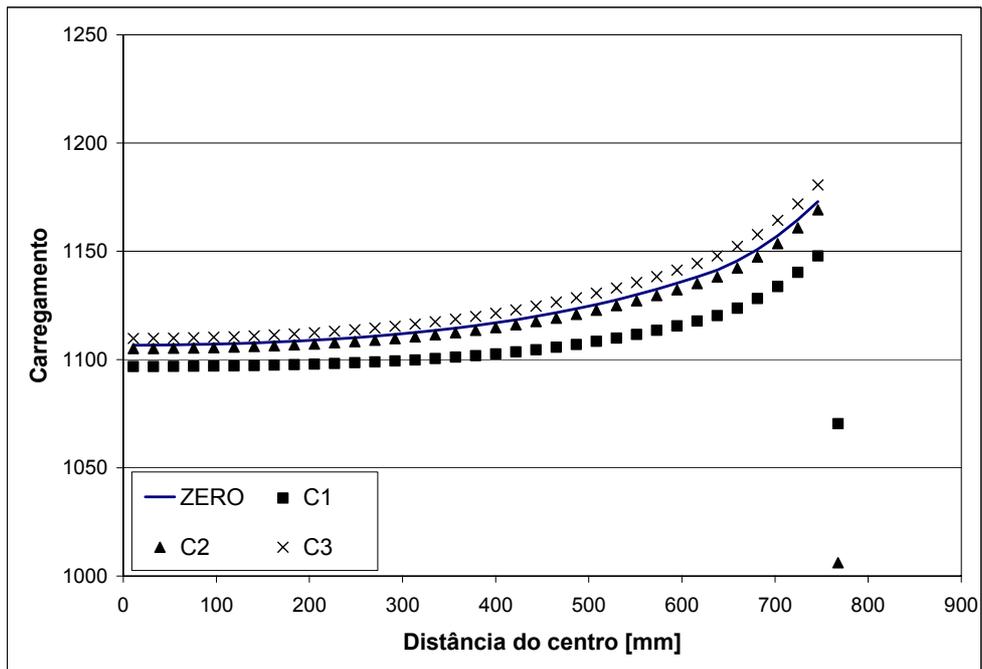
$$\text{Efeito (Iteração na amplitude da distribuição)} = (133 + 41) - (66 + 158)$$



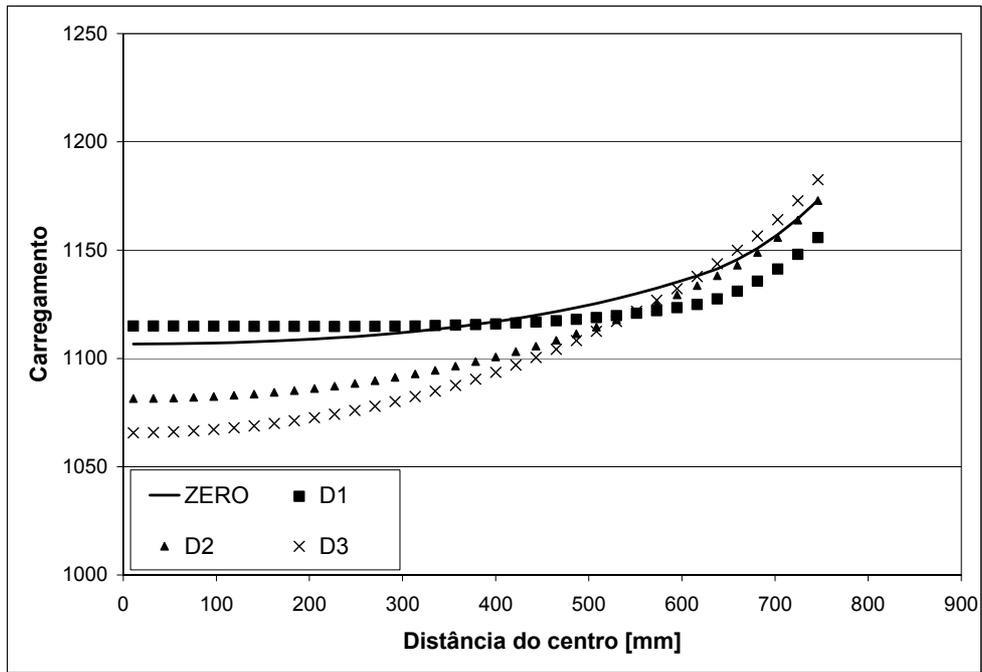
**Figura 5:** Perfil de carregamento linear no semi-comprimento do cilindro de apoio variando-se o comprimento de contato. ZERO=1530mm, A1=1500mm, A2=1550mm, A3=1510mm.



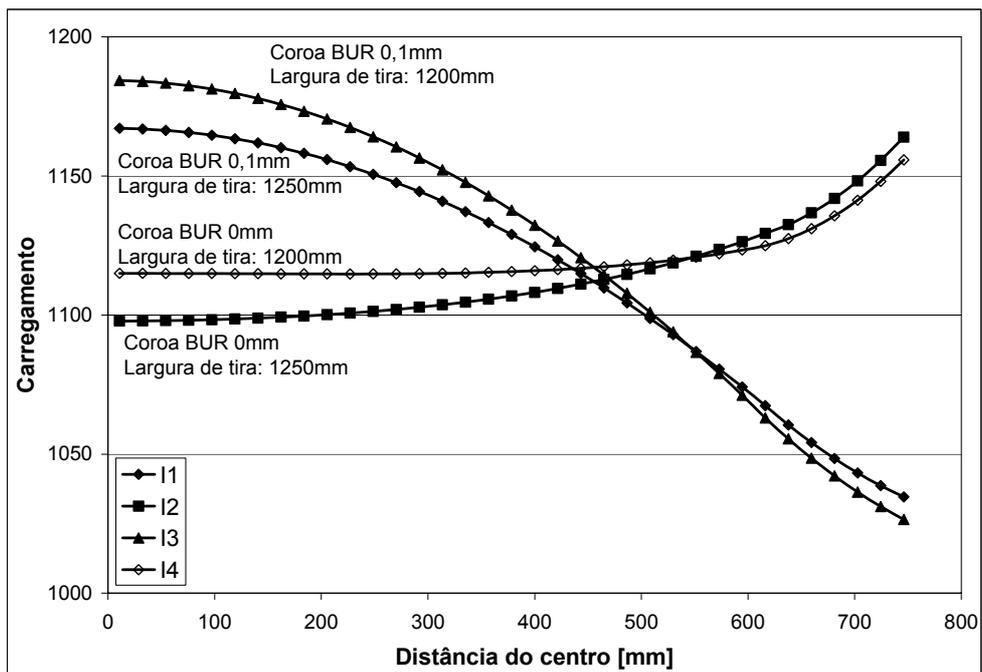
**Figura 6:** Perfil de carregamento linear no semi-comprimento do cilindro de apoio, incluindo coroamento mecânico. ZERO: 0mm, B1=0,1mm, B2=0,2mm, B3=0,3mm.



**Figura 7:** Perfil de carregamento linear no semi-comprimento do cilindro de apoio, variando-se a altura do chanfro. ZERO=3mm, C1=1mm, C2=2mm, C3=5mm.



**Figura 8:** Perfil de carregamento linear no semi-comprimento do cilindro de apoio, variando-se a largura da tira laminada. ZERO=1240mm, D1=1200mm, D2=1300mm, D3=1350mm.



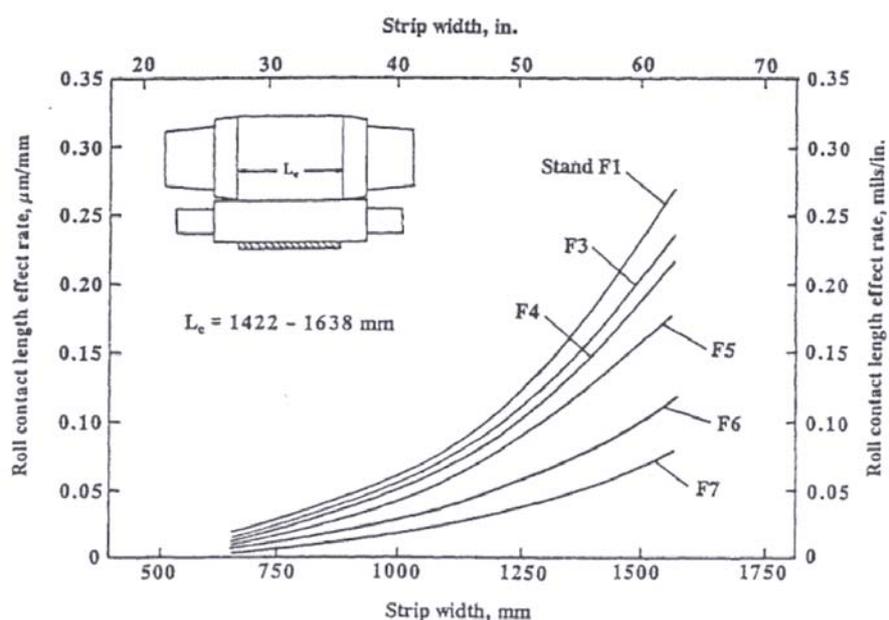
**Figura 9:** Perfil de carregamento linear no semi-comprimento do cilindro de apoio, variando-se a largura da tira laminada e coroa do cilindro de apoio, conforme projeto de experimentos.

## 4 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS ADICIONAIS

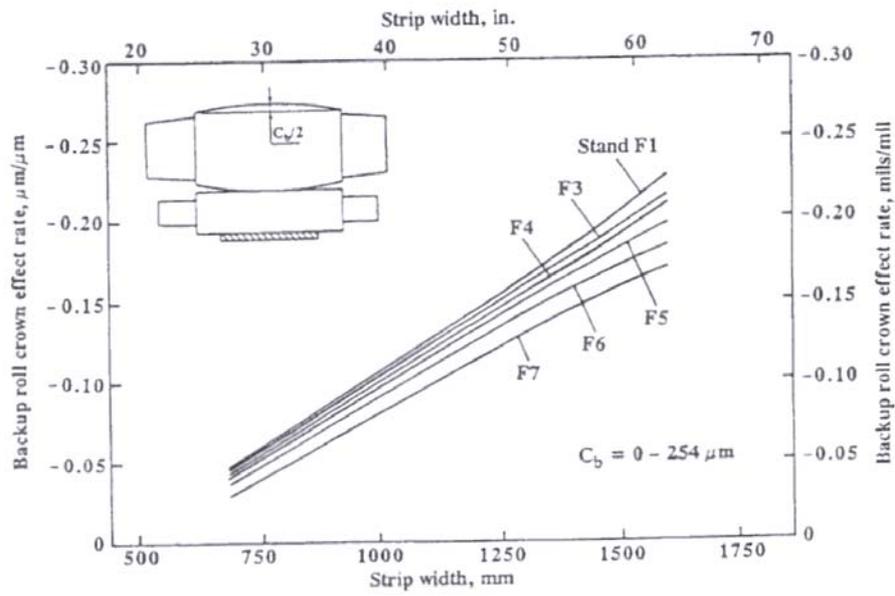
A ferramenta apresentada mostrou-se interessante para auxiliar na definição do perfil de mesa do cilindro de apoio, incluindo seu coroamento e caimento. Entretanto, variáveis em conjunto precisam ser estudadas, inclusive realizando projetos de experimentos com maior número de fatores e iterações. Adicionalmente é preciso realizar verificação da influência dessas possíveis alterações na qualidade da tira.

As Figuras 10 a 12 mostram que fatores como coroamento e largura de contato entre os cilindros de apoio e trabalho apresentam significativa influência<sup>7</sup> na planicidade da tira, assim como apresentam comportamentos distintos em relação à posição no trem contínuo acabador (referente às cadeiras).

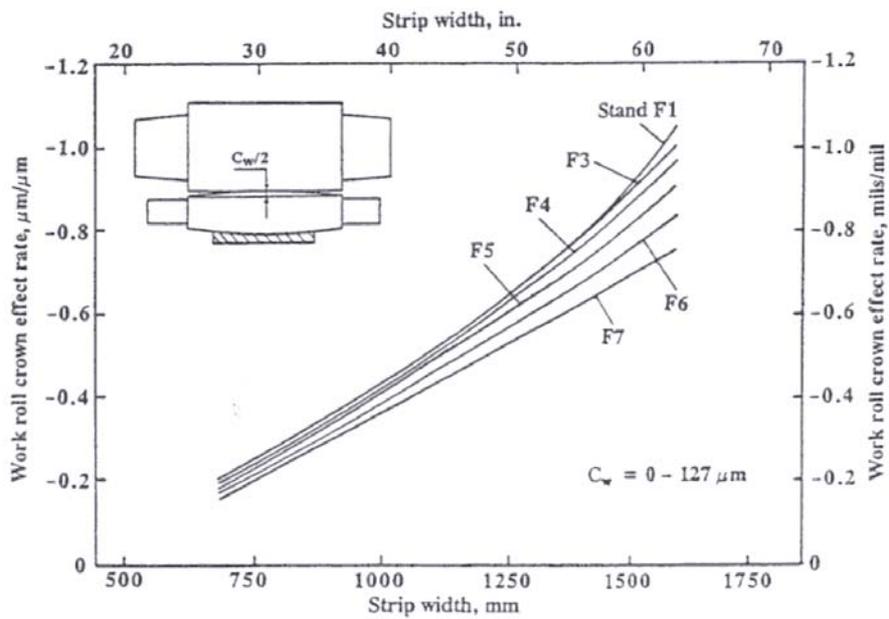
A continuidade desse trabalho será dada pela utilização de método de elementos finitos, sendo possível uma avaliação visual mais detalhada. Com esse método ainda é possível estudar a influência do contato na distribuição de tensões no cilindro sob âmbito global. Também é possível avaliar pontos de concentração de tensões, assim como simular modificações estruturais das concordâncias entre mesa e pescoço. A Figura 13 mostra um exemplo desse tipo de estudo.



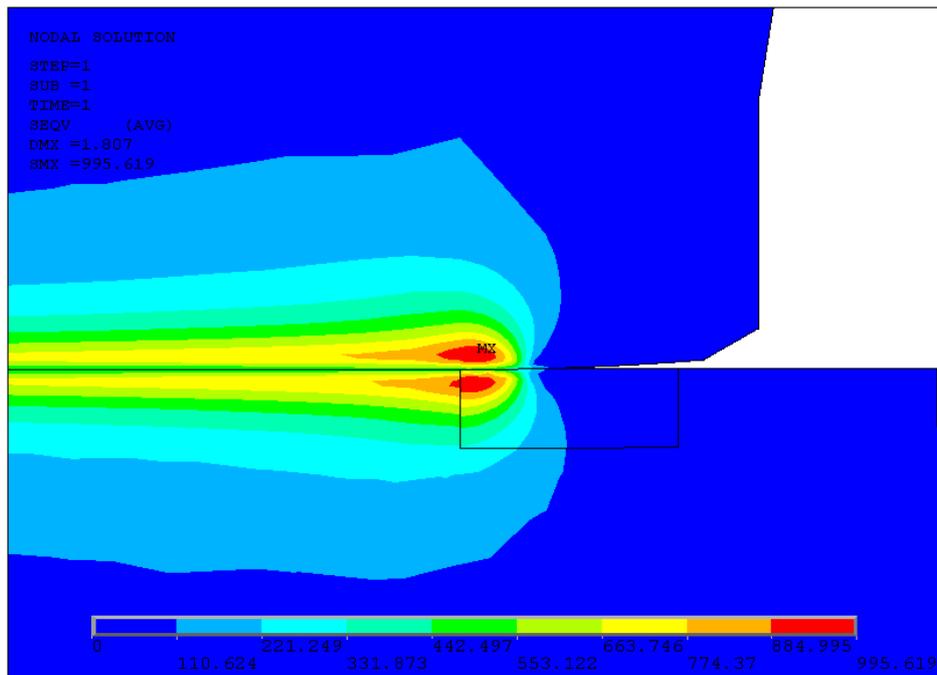
**Figura 10:** Influência da largura de contato entre cilindro de apoio e trabalho sobre a qualidade dimensional da tira, por cadeira. *As primeiras cadeira sofrem maior influência.*<sup>(7)</sup>



**Figura 11:** Influência do coroamento do cilindro de apoio sobre a qualidade dimensional da tira, por cadeia. As cadeia acabadores sofrem maior influência. <sup>(7)</sup>



**Figura 12:** Influência do coroamento do cilindro de trabalho sobre a qualidade dimensional da tira, por cadeia. As primeiras cadeia sofrem maior influência. <sup>(7)</sup>



**Figura 13:** Exemplo de análise por elementos finitos, simulando contato entre cilindro de apoio e trabalho.

## REFERÊNCIA

- 1 GINZBURG, Vladimir B. & BALLAS, Robert. Definition of geometrical parameters of rolled products. In: \_\_\_\_. **Flat rolling fundamentals**. New York: Marcel Dekker, Inc. - ISS, 2000. p.439-459.
- 2 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.
- 3 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.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 GINZBURG, Vladimir B. & BALLAS, Robert. Strip profile and flatness analysis. In: \_\_\_\_. **Flat rolling fundamentals**. New York: Marcel Dekker, Inc. - ISS, 2000. p.685-701.