

REDUÇÃO DOS CUSTOS RELACIONADOS AO CONSUMO DE CILINDROS DE ENCOSTO ATRAVÉS DO COROAMENTO DO CILINDRO NO LAMINADOR REVERSÍVEL 4-HI DE 1 CADEIRA DA CSN-PR¹

Diego Augusto de Azevedo²
Alexandre Yukio Shigemori³
Fernando Celso Kaminski⁴
Elias Gonçalves⁵

Resumo

O laminador reversível 4-HI de uma cadeira da CSN-PR entrou em produção em Jan/2004 utilizando a tecnologia CVC do fabricante original do equipamento. Essa tecnologia baseia-se em obter diferentes coroas mecânicas através da movimentação axial dos cilindros de laminação. Para isso os cilindros de trabalho são retificados em forma de curva côncavo/convexa. No caso do laminador da CSN-PR, a retífica do cilindro em perfil côncavo/convexa somente era efetuada nos cilindros de trabalho, sendo os cilindros de encosto retificados em perfil plano. Devido à retificação em perfil dos cilindros de trabalho e não dos cilindros de encosto, a distribuição de cargas de laminação era efetuada de maneira não uniforme ao longo da mesa dos cilindros. Devido a esse fator, é gerada uma diferença na fadiga sofrida pelo cilindro de encosto, o que provoca um maior volume de desgaste na retífica e uma redução na campanha devido a riscos de deslocamento do cilindro de encosto por fadiga mecânica.

Este trabalho aborda a redução nos custos de laminação alcançada através da retificação em perfil dos cilindros de encostos no laminador reversível de redução LRF-1 da CSN-PR.

Palavras-chave: Cilindros de encosto; Consumo de cilindros; Coroamento; Laminação à frio.

COST REDUCTION RELATED TO THE BACK-UP ROLL CONSUMPTION BY THE MEANS OF CROWN PROFILE IN THE SINGLE STAND 4-HI REVERSING COLD MILL IN CSN-PR

Abstract

The single stand 4-Hi Reversing Cold Mill from CSN-PR started its production in Jan/2004 using the CVC technology supplied by the original equipment manufacturer. This technology is based on having a continuously variable crown by axially displacing the work rolls. In order to accomplish that, the work rolls are ground with a concave/convex curve profile. In the CSN-PR's mill, the grinding of the concave/convex profile was done only for the work rolls, while the back-up rolls were ground with a parallel profile. Due to the different crown profile grinding for the work and back-up rolls, the mill stress distribution wasn't uniform along the roll length, causing a fatigue difference along the back-up roll surface, leading to a more severe roll wear, which in turn, restricted the rolls campaign due to the risk of roll spalling. This work copes with the mill cost reduction achieved by optimizing the profile grinding for the back-up rolls in the CSN Reversing Cold Mill

Key words: Back-up rolls; Roll consumption; Crown profile; Cold mill.

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, Coordenador de da Gerência de Laminação e Galvanização da Companhia Siderúrgica Nacional, Araucária / PR.

³ Engenheiro Mecânico, Engenheiro de Desenvolvimento da Gerência de Laminação e Galvanização da Companhia Siderúrgica Nacional, Araucária / PR.

⁴ Técnico Mecânico, Supervisor da Oficina de Cilindros da Gerência de Laminação e Galvanização da Companhia Siderúrgica Nacional, Araucária / PR

⁵ Engenheiro Eletrônico, Coordenador de Galvanização da Gerência de Laminação e Galvanização da Companhia Siderúrgica Nacional, Araucária/ PR

1 INTRODUÇÃO

A planta da CSN, localizada em Araucária/PR, começou sua produção em 2000 com a entrada em operação do Centro de Serviços. Em 2003 as linhas de Decapagem, Laminação a Frio, Galvanização Contínua e Pintura Contínua entraram em operação. O principal foco da planta no Paraná é atender aos mercados de linha branca e construção civil. É a única planta no Brasil a produzir o Galvalume®. A implantação da fábrica no Paraná faz parte da estratégia da empresa de ampliar seus negócios e de se aproximar de seus principais clientes.

Em 2006, a CSN-PR adotou a metodologia de gerenciamento por diretrizes, GPD, para redução dos custos de produção. No laminador de redução foram definidos dois principais insumos: Cilindros e Óleo de laminação. Nesse contexto de otimização dos custos de produção e com vistas na otimização de processo iniciou-se o trabalho de coroamento dos cilindros de encosto.

2 DADOS DO LAMINADOR

Seguem abaixo as características principais do Laminador de Redução à Frio da CSN-PR

Tabela 1 – Principais características do laminador reversível

Dados do equipamento		Dados de material processado	
Tipo	Quádruo reversível 4HI	Tipo de aço:	Baixo carbono
Velocidade máxima:	1.350 m/min	Largura:	700...1.600 mm
Força máxima:	2.100 ton	Peso máximo:	25 t
Diâm. Cilindros		Entrada	
Trabalho:	400 mm-450 mm	Diâm. Interno:	610 mm
Encosto:	1.150 mm -1.250 mm	Espessura:	1,5...5 mm
Potência		Saída	
Enroladeiras:	2.717.kW	Diâm. Interno:	508 mm
Cadeira:	6.000.kW	Espessura:	0,25...1,55 mm

3 DADOS DAS RETIFICAS E CILINDROS

Seguem as características principais das retificas de cilindros da CSN-PR.

Tabela 2 – Principais características das retificas

Dados da retifica de cilindros de trabalho		Dados da retifica de cilindros de encosto	
Tipo	WS5CD 6x5000	Tipo	WS3CP 25.200x5000
Comprimento	13000	Comprimento	12200
Lunetas	Hidrodinâmicas	Lunetas	Hidroestática
Principais eixos de deslocamento	Z – Longitudinal X – Transversal U – Transversal – (proporciona o perfil) B – Ângulo de giro do rebolo U 1 – Transversal - (alinhamento) X1 – Braços de medição	Principais eixos de deslocamento	Z – Longitudinal X – Transversal U – Transversal – (proporciona o perfil) B – Ângulo de giro do rebolo U 1 – Transversal - (alinhamento) X1 – Braços de medição
Controle	CNC Sistema operacional QNX PLC – S7	Controle:	CNC Sistema operacional QNX PLC – S7

Tabela 3 – Principais características dos Cilindros

Dados do Cilindro do Trabalho		Dados do Cilindro de Encosto	
Material	Aço forjado VC9	Material	Aço forjado VC4A
Fabricante	Aços Villares	Fabricante	Aços Villares
Peso	3.400 Kg	Peso	23.485 Kg
Diâmetro Máximo	450 mm	Diâmetro Máximo	1.250 mm
Diâmetro Mínimo	400 mm	Diâmetro Mínimo	1.150 mm
Dureza	840 LD 794 HV 87 SH 60 HRC	Dureza	720 LD 538 HV 66 SH 45 HRC

4 AVALIAÇÃO DOS GANHOS

O principal objetivo do trabalho é a redução dos custos de transformação através da redução do desbaste dos cilindros de encosto durante o processo de retífica.

Outras melhorias e ganhos do trabalho seriam:

- aumento da campanha dos cilindros de encosto e trabalho reduzindo o número de trocas de cilindros;
- melhoria na planicidade do material a ser processado, devido à eliminação de assimetrias do gap de laminação;
- a não necessidade de rodízio de cilindros entre topo e baixo para atenuação dos efeitos da assimetria e de fadiga térmica;
- menor risco de acidentes operacionais através da diminuição do risco de deslocamento dos cilindros de encosto e trabalho devido à fadiga mecânica;

5 DESENVOLVIMENTO PROJETO

Segundo Stone,⁽¹⁾ se dois cilindros de diferentes diâmetros são pressionados juntos, um contra o outro, com os seus eixos paralelos e sob a ação de uma força específica uniforme, então um sistema complexo de tensões é gerado tanto na região de contato quanto na seção transversal dos cilindros.

Hertz⁴, o primeiro a estudar essas tensões, afirma que na região de contato, ocorre uma deformação elástica dos cilindros com uma distribuição de tensão de compressão semi-elíptica (Figura 1), onde a largura da área de contato é dada por b , e P_{max} é a tensão máxima de compressão existente ao longo de uma linha (eixo x) através do centro do cilindro, P' é a força por unidade de comprimento exercida por um cilindro contra o outro, d_1 e d_2 são os diâmetros dos dois cilindros e E_1 e E_2 são os respectivos módulos de elasticidade.

$$b = 1,52 \sqrt{P' \times \frac{d_1 d_2}{(d_1 + d_2)} \times \frac{(E_1 + E_2)}{E_1 E_2}} \quad \text{eq. 01}$$

$$P_{max} = \frac{4P'}{\pi b} \quad \text{eq. 02}$$

$$P_{max} = 0,83 \sqrt{P' \times \frac{d_1 + d_2}{(d_1 d_2)} \times \frac{E_1 E_2}{(E_1 + E_2)}} \quad \text{eq. 03}$$

Além da tensão normal gerada na região de contato, existe outra tensão, chamada de tensão de cisalhamento, que ocorre com um ângulo de 45° ao longo da linha que se conecta com o centro do cilindro.

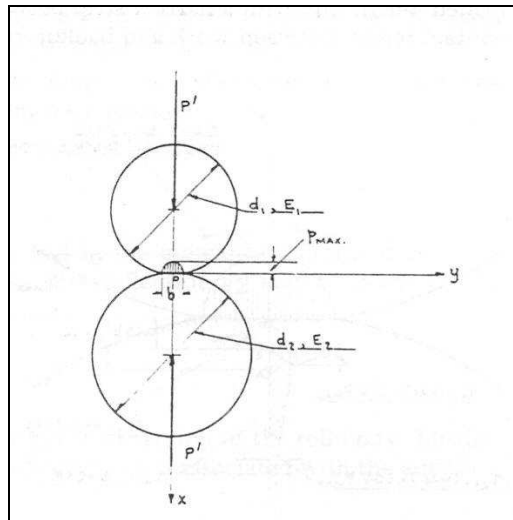


Figura 1: Tensão de contato entre cilindro de trabalho e de encosto.⁽²⁾

Essas tensões (Figura 2) variam de zero, região do ponto de contato, aumentando para um valor máximo em A e diminuindo novamente a medida que a profundidade em relação a superfície do rolo aumenta. O ponto A sob a região de contato e o valor da máxima tensão de cisalhamento são dados por:

$$A = 0,39b \quad \text{Eq. 04}$$

$$\tau_{45^\circ \text{max}} = 0,304 P_{\text{max}} \quad \text{Eq. 05}$$

À medida que os dois cilindros giram, as tensões nesse ponto aumentam de zero a um valor máximo e depois diminuem novamente pra zero quando ponto passa abaixo do eixo de rotação.

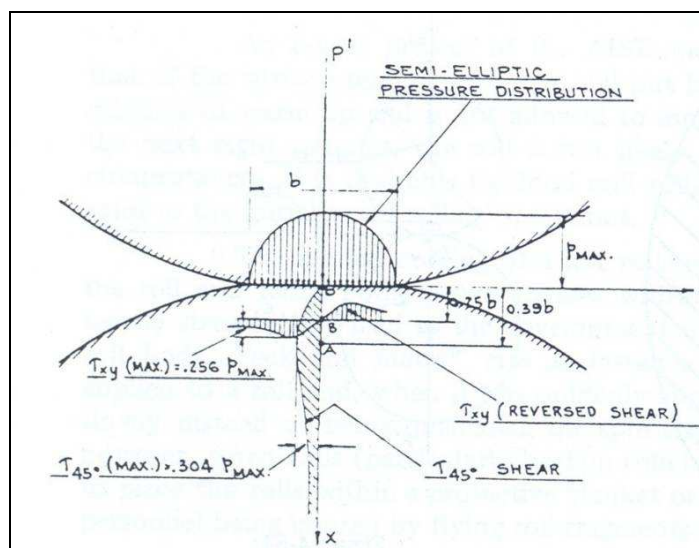


Figura 2: Distribuição da Tensão de contato entre cilindro de trabalho e de encosto.⁽²⁾

Já Radzimovsky,⁽³⁾ investigou as tensões T_{xy} que existem paralelamente ao eixo x e y em qualquer ponto dentro do corpo do cilindro. Segundo ele, os valores máximos dessas tensões ocorrem em um plano, na verdade uma superfície cilíndrica, a uma distância de $0,25 b$ abaixo do ponto de contato zero e o valor máximo dessa tensão de cisalhamento é de $0,256 P_{max}$. A particularidade desta teoria é de que a tensão de cisalhamento vai de um valor máximo em um ponto distante do eixo x, zero sobre o eixo x, atingindo um valor máximo novamente, a chamada máxima tensão de cisalhamento reverso, do outro lado do eixo x e de sinal oposto.

Tendo como base essas duas teorias, o gráfico abaixo mostra a profundidade, em relação à superfície do rolo, da máxima tensão de cisalhamento em função da força linear aplicada. Quanto maior a força, maior a profundidade e a tensão de cisalhamento.

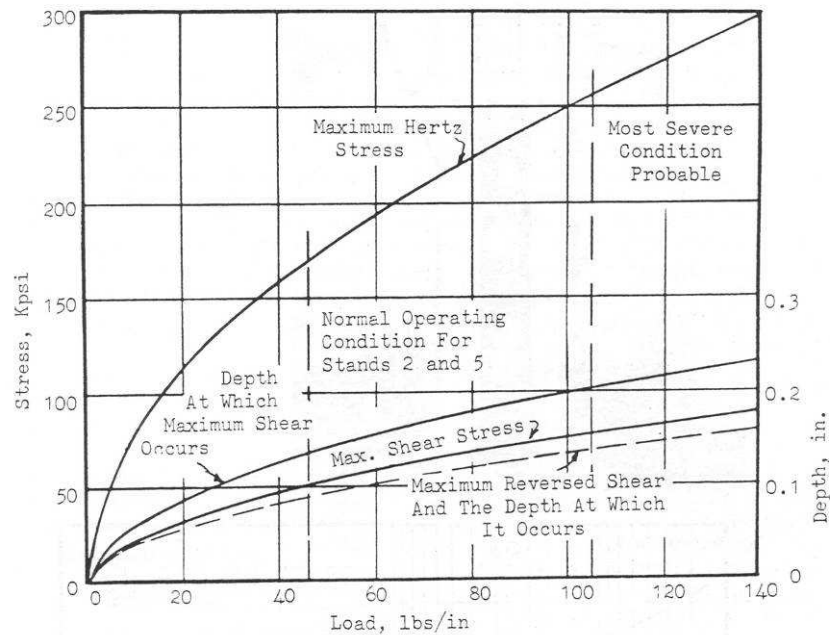


Figura 3: Magnitude e localização das tensões máximas no cilindro.⁽²⁾

No gráfico da Figura 4, pode-se verificar também a quantidade de ciclos necessários pra ocorrer uma falha em cilindros forjados através da máxima tensão de cisalhamento reversa admitida, que diminui em função do aumento número de ciclos.

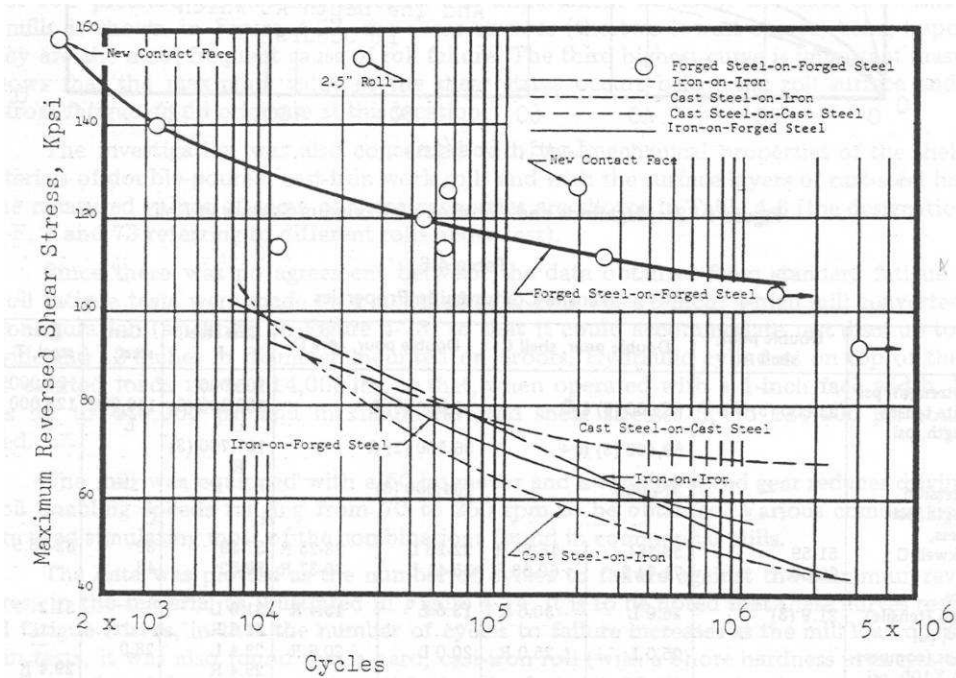


Figura 4: Máxima tensão de cisalhamento em função do número de ciclos.⁽²⁾

Há ainda os testes de dureza (Figura 5) em função da máxima tensão de cisalhamento, que mostram a profundidade dessa tensão máxima em relação à superfície de contato. Verifica-se ainda que quanto maior o número de ciclos para uma mesma força, maior a dureza.

Essas regiões, de maior dureza devido ao número de ciclos e às forças de contato, são mais propícias à geração de falhas e por isso torna-se desejável a remoção dessa camada.

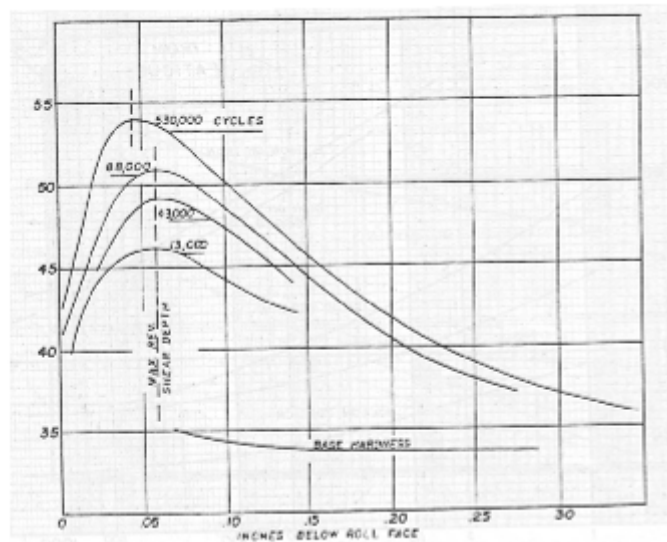
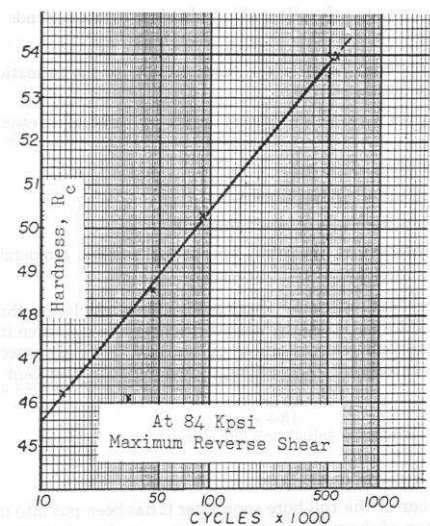


Figura 5: Dureza em função do número de ciclos e Variação da dureza e função da profundidade.⁽²⁾

Através dessas observações, nota-se a existência de um impacto direto da tensão de contato sobre o aumento de dureza e, por conseqüência, um maior consumo de cilindro devido à necessidade de um maior desgaste para a retirada da camada de maior dureza.

No caso da CSN-PR, o coroamento dos cilindros de trabalho gera pontos de “stress” sobre a superfície paralela do cilindro de encosto, devido a uma distribuição de carga não uniforme ao longo das superfícies dos dois cilindros.

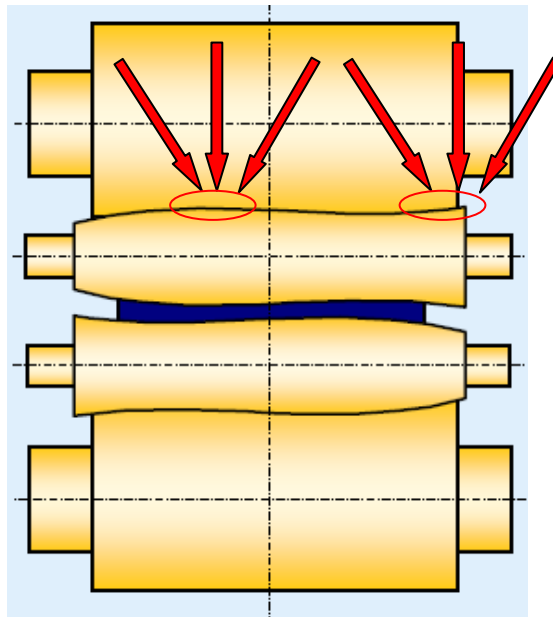


Figura 6: Pontos de stress no contato entre cilindro de trabalho e cilindro de encosto.

Utilizando a equação x como base, a solução encontrada foi diminuir a concentração de tensão no contato, ou seja, diminuir a força P , aumentando-se a área de contato entre os cilindros, fazendo com que o contato ocorra ao longo de toda a mesa.

Hoje, na CSN – PR, há dois tipos de coroamento utilizados nos cilindros de trabalho: a coroa 400 indicada para os materiais mais largos ($> 900\text{mm}$), e coroa 600, indicado pros materiais mais estreitos ($<900\text{mm}$). Já os cilindros de encosto, não possuem coroa, ou seja, o perfil é paralelo.

Os valores das coroas 400 e 600 dos cilindros de trabalho correspondem respectivamente à diferença de ($400\ \mu\text{m}$ e $600\ \mu\text{m}$) entre os picos superiores e inferiores do cilindro.

Para se descrever esse perfil do cilindro, são utilizados polinômios de 3ª ordem, sendo possível descrevê-lo com polinômios de 5ª ordem quando se deseja mais pontos de inflexão da curva.

Para se obter o perfil do cilindro de encosto do LRF, o perfil dos cilindros de trabalho foi levantado em um gráfico por meio do polinômio de 3ª ordem que descreve o perfil a ser usinado nas retíficas WS3 e WS5 da CSN-PR.

Nos polinômios de 3ª ordem temos que:

$$y=a3x^3+a2x^2+a1x+a0 \quad \text{onde } a0= \text{raio do cilindro} \quad \text{Eq.06}$$

Para se obter a curva do cilindro inferior basta inverter o sinal da equação.

Como as mesas dos cilindros de trabalho e encosto são diferentes, 1.950 mm e 1.750 mm respectivamente, selecionou-se a região eqüidistante do eixo de simetria na curva do cilindro de trabalho que perfazem o comprimento da mesa do cilindro de encosto.

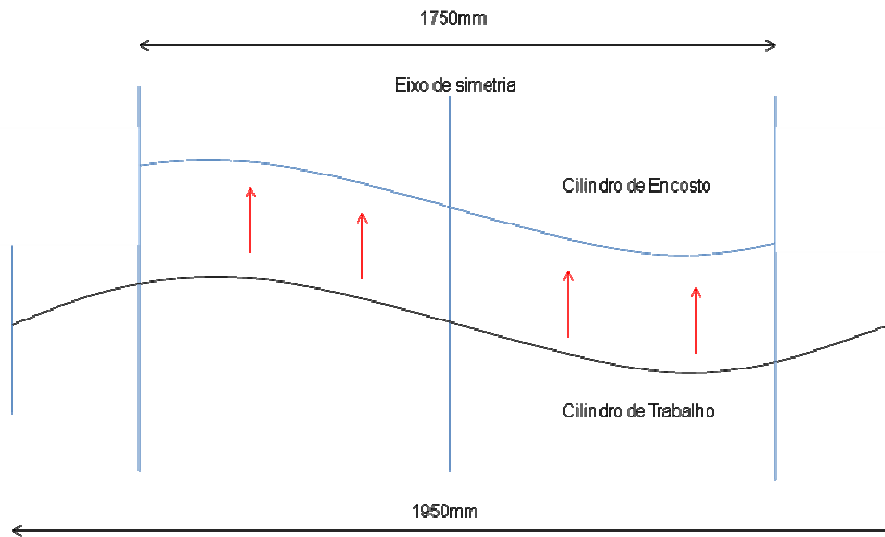


Figura 7: Rebatimento do perfil do cilindro de trabalho corado sobre o cilindro de encosto plano.

Como o rebatimento da curva por si só não garantia a simetria da curva, para evitar esforços axiais sobre o cilindro e também devido ao fato das pontas das curvas serem passíveis de esforços, quando solicitado um maior esforço, a curva teve que ser ajustada e os cantos aliviados com uma inclinação maior.

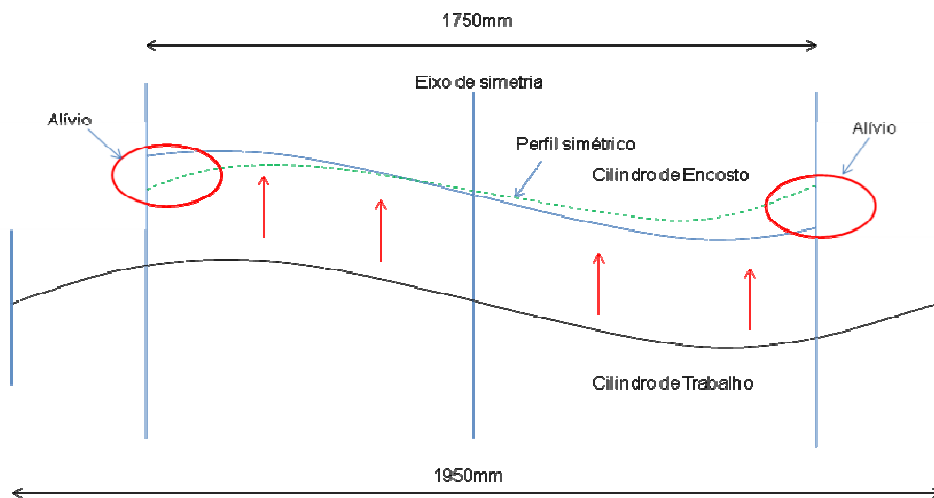


Figura 8: Alívio de tensões e ajustes na curva do novo perfil para cilindro de encosto.

Tendo o perfil definido, os pontos sobre a nova curva foram plotados em papel milimetrado para se obter os valores de x e y correspondente a cada ponto da curva.

Então, os pontos foram inseridos numa planilha e a curva foi plotada no Excell, obtendo-se assim, a linha de tendência de 3ª ordem e os coeficientes a3, a2 e a1 necessários para a usinagem dos cilindros de encosto na retífica.

$$y=0,0000000005260000x^3-0,00000169600000001x^2+0,00163000000000982x+a0 \quad \text{Eq.08}$$

Assim, para a execução desse projeto, realizamos o ciclo PDCA, onde pudemos acompanhar e avaliar o desenvolvimento do projeto desde a implantação dos novos perfis até a avaliação dos ganhos obtidos.

Plan (planejamento)→	Com base na teoria, elaborar as novas curvas
Do (execução)→	Implementar os coeficientes nas retíficas e usar os cilindros com o novo perfil. Processar material abrangendo a maior parte possível do mix de trabalho do LRF
Check (verificação)→	Analisar dureza dos cilindros, impacto na produtividade através do aumento de campanha, consumo e possíveis impactos mecânicos relacionados ao equipamento
Act (ação) →	Alteração do perfil dos cilindros conforme demanda. À medida que os cilindros paralelos são utilizados, usar com o novo perfil.

6 RESULTADOS

Após o coroamento dos cilindros de encosto observamos uma redução de aproximadamente 40% no consumo de cilindros num comparativo entre 2007 e 2008.

Além disso, a campanha dos cilindros aumentou de 4.000 t pra 6.000 t, um aumento de 50%, diminuindo a quantidade de trocas.

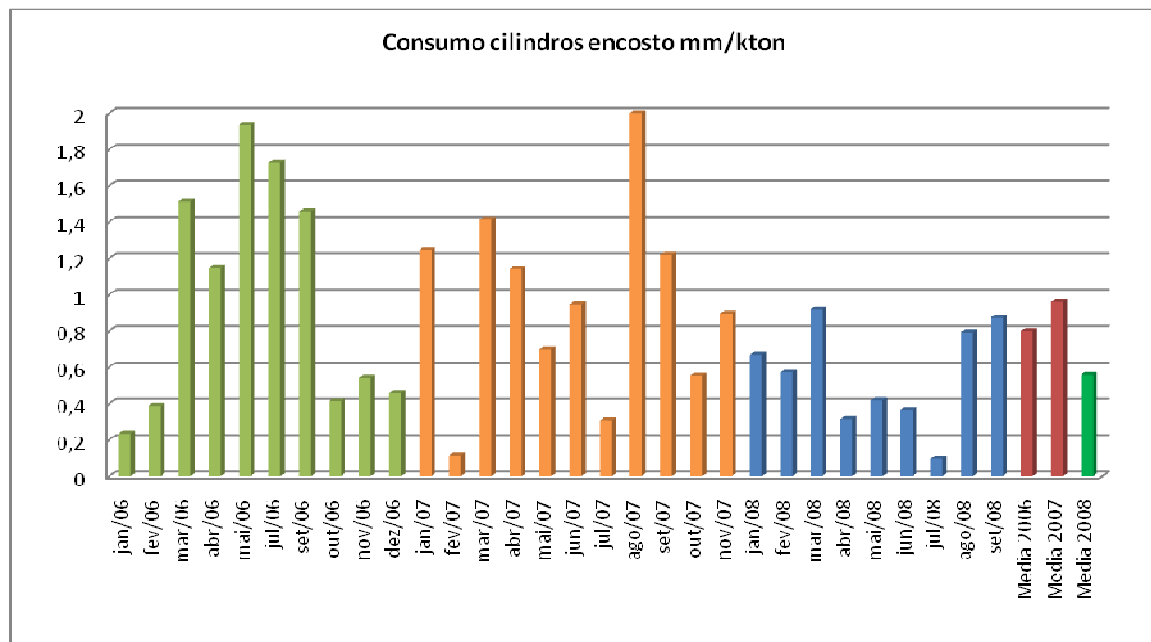


Figura 9: Consumo de cilindros de encosto.⁽²⁾

7 CONCLUSÕES

Através do coroamento dos cilindros de encosto obtivemos uma redução significativa nos custos de laminação referentes aos consumos de cilindros, através de uma redução da quantidade de milímetros desbastada no processo de retificação.

Além da redução de custo, outras vantagens do coroamento são uma maior campanha dos cilindros de encosto o que levam a uma maior disponibilidade do laminador, melhora na planicidade dos produtos e operação com maior segurança operacional.

REFERÊNCIAS

- 1 STONE, M. D. Rolling of Thin Strip. Iron and Steel Engineer Year Book, 1953. p. 115-128.
- 2 ROBERTS, W. L. Cold Rolling of Steel. Manufacturing Engineering and Materials Processing, 1978. p. 293-295, p. 559-564.
- 3 Radzimovsky, E. I. Stress Distribution and Streght Condition of Two Rolling Cylinders Pressed Together, University og Illinois Engineering Experimental Station, Bulletin 408, 1953
- 4 Hertz, H. Crelle´s Mathematical Journal (Berlin), Vol.9, 1881