

MECANISMOS DE DESGASTE DE CILINDROS DE TRABALHO DOS LAMINADORES TANDEM DE TIRAS A FRIO DO BRASIL¹

Mario Vitor Leite²
Marcio Matos dos Santos²
José Daniel Biasoli de Mello³
Anderson Gonçalves de Lima⁴
Gilmar Procópio Ramos⁴
José Renato Machado⁵
Nelson Luiz dos Santos⁵
Celio Souza do Rosário⁶
Antonio Fabiano de Oliveira⁶
Magleife Eden Guasti Rampinelli⁷
Sérgio dos Santos Rocha⁷
Ricardo Lívio de Oliveira Ferreira⁸
Rochel Alan Gonçalves Lessa⁸

Resumo

Estudos realizados na laminação a frio sobre o efeito de diversas variáveis do processo de laminação tiveram como objetivo melhorar a qualidade do produto laminado e/ou aumentar a produtividade do laminador, tais como: lubrificação, revestimento dos cilindros de trabalho e materiais dos cilindros de trabalho. Entretanto, uma vez que estes trabalhos não estavam inseridos num contexto tribológico, não apresentam uma descrição sistemática dos fenômenos tribológicos e conseqüentemente não trazem informações dos mecanismos de desgaste presentes no tribossistema. O presente trabalho teve como objetivo descrever os mecanismos de desgaste do tribossistema com foco no cilindro de trabalho e suas relações com as variáveis do processo de laminação de tiras a frio. Para isso, foram avaliados cilindros forjados Villares Rolls, dos principais laminadores do tipo tandem de tiras a frio do Brasil: CSN, Usiminas/MG, Usiminas/SP e Vega do Sul, por meio de investigações da superfície de desgaste com técnicas de microscopia e topografia. Os resultados identificaram que o processo de abrasão a dois corpos é o mecanismo de desgaste que prevalece no sistema tribológico dos cilindros de trabalho durante a laminação de tiras a frio.

Palavras-chave: Cilindros forjados; LTF; Desgaste; Rugosidade.

WEAR MECHANISMS IN WORK ROLL OF THE BRAZILIAN'S TANDEM COLD STRIP MILL

Abstract

Studies of the effect of cold strip mill variables such as: lubricant, work roll coating and work roll material, had the objective of improving the quality of strip and/or increasing the productivity of the mill. However, since these works were not inserted in a tribological context, they do not present a systematic description of the tribological phenomena and consequently do not provide information about the wear mechanisms. The present study aims to describe the wear mechanisms of the work roll and their relationship with cold strip mill variables. In order to do this, forged Villares Rolls used in CSN, Usiminas/MG, Usiminas/SP and Vega do Sul were studied by means of investigations of the wear surface with techniques of microscopy and topography. The results identified that, independently of the cold strip mill variables between the different mills, the wear mechanism that prevails in the studied tribological system is the abrasive wear process into two-body.

Key words: forged rolling mill rolls; cold strip mill; wear; roughness.

¹ Contribuição técnica ao 48º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 24 a 27 de outubro de 2011, Santos, SP.

² Assessor Técnico. Representação comercial dos cilindros Villares Rolls. Pindamonhangaba.

³ Professor Dr., Laboratório de Tribologia e Materiais – Universidade Federal de Uberlândia.

⁴ Eng. de Processo, CSN – Companhia Siderúrgica Nacional.

⁵ Eng. de Processo, Usiminas - Ipatinga-MG.

⁶ Eng. de Processo, Usiminas, Cubatão-SP.

⁷ Eng. de Processo, Vega do Sul, São Francisco do Sul-SC.

⁸ Eng. de Qualidade, CRC do Sul, BR 280, km 11. CEP: 89240-000. São Francisco do Sul-SC.

1 INTRODUÇÃO

O significado comum e perceptível do desgaste pode ser resumido em: modificações da forma original de um corpo por ação do tempo ou frequência de contato com outro corpo. Esta percepção é maior à medida que o tempo passa, pois essa variável é diretamente proporcional à intensidade das alterações da forma original. Entre uma grande quantidade de exemplos cita-se o cilindro destinado a laminação de tiras a frio, onde o desgaste pode ser identificado após o tempo de laminação.

A combinação da variável tempo com outras variáveis do processo de laminação, como por exemplo: força e velocidade de laminação, tipo de material laminado, refrigeração e lubrificação, entre outros, pode resultar num aumento do desgaste dos cilindros laminadores.

Para abordar a combinação das variáveis de um processo com o desgaste surgiu a Tribologia, que é a ciência dedicada ao estudo da interação entre os corpos com movimento relativo.⁽¹⁾

Um dos grandes desafios da Tribologia é antecipar a forma e a intensidade com a qual irá ocorrer o desgaste em um dado componente.⁽²⁾

Para compreender a forma pela qual o desgaste ocorre é importante conhecer dois aspectos do problema. O primeiro é o tipo de movimento que causa o desgaste, como se vê na norma DIN 50320,⁽³⁾ ou seja: o deslizamento, o rolamento, o movimento oscilatório, o de impacto e o erosivo. O segundo é o próprio mecanismos de desgaste, que pode ser: adesão (deformação plástica e ruptura das junções entre corpos), abrasão, reações triboquímicas e a fadiga superficial.⁽³⁾

A identificação do tipo de movimento e mecanismo de desgaste é realizada em duas etapas, primeiro com a descrição detalhada dos corpos e a forma na qual se interagem e segundo por meio de análises das entradas e saídas do sistema de controle. Este sistema de controle é denominado por tribossistema.

Os elementos que compõem o tribossistema são:

- corpo, elemento que é o objetivo de estudo;
- contra-corpo, elemento com força e movimento relativo em relação ao corpo;
- meio interfacial, elemento sólido, líquido ou gasoso presente entre o corpo e contra-corpo; e
- meio circunvizinho, ambiente que envolve o corpo e contra-corpo.

As respostas de um tribossistema (tipo de movimento e mecanismo de desgaste) é que permitirão antecipar a forma na qual o desgaste irá ocorrer. No processo de laminação a frio a previsão do desgaste do cilindro responsável pela laminação das tiras é fundamental, pois afeta diretamente a qualidade do produto laminado.

Os estudos tribológicos já realizados e referentes à laminação de tiras a frio tiveram como objetivo melhorar a qualidade do produto laminado e/ou aumentar a produtividade do laminador, porém em nenhum um deles houve um estudo sistemático do desgaste. Alguns trabalhos a serem citados estudaram variáveis como: lubrificação,⁽⁴⁾ revestimento dos cilindros de trabalho⁽⁵⁾ e materiais dos cilindros de trabalho.⁽⁶⁾ Isto impossibilita extrapolar os resultados obtidos nestes trabalhos para condições tribológicas diferentes daquela estudada.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é descrever os mecanismos de desgaste por meio de uma análise do tribossistema com foco no cilindro de trabalho e suas relações com as variáveis do processo de laminação de tiras a frio.

A seguir, descreve-se o tribossistema do processo de laminação a frio.

1.1 Tribossistema da Laminação de Tiras a Frio

Os elementos que compõem o tribossistema do processo de laminação estão descritos na Figura 1. A definição do objeto de estudo, isto o corpo, é definida pelo tribologista, neste trabalho o corpo foi definido como sendo o cilindro que entra em contato com a tira, isto é, o cilindro de trabalho. A tira é o contra-corpo e o lubrificante e refrigerante são o meio interfacial. No meio circunvizinho inclui-se o calor gerado pelo processo de deformação plástica da tira laminada.

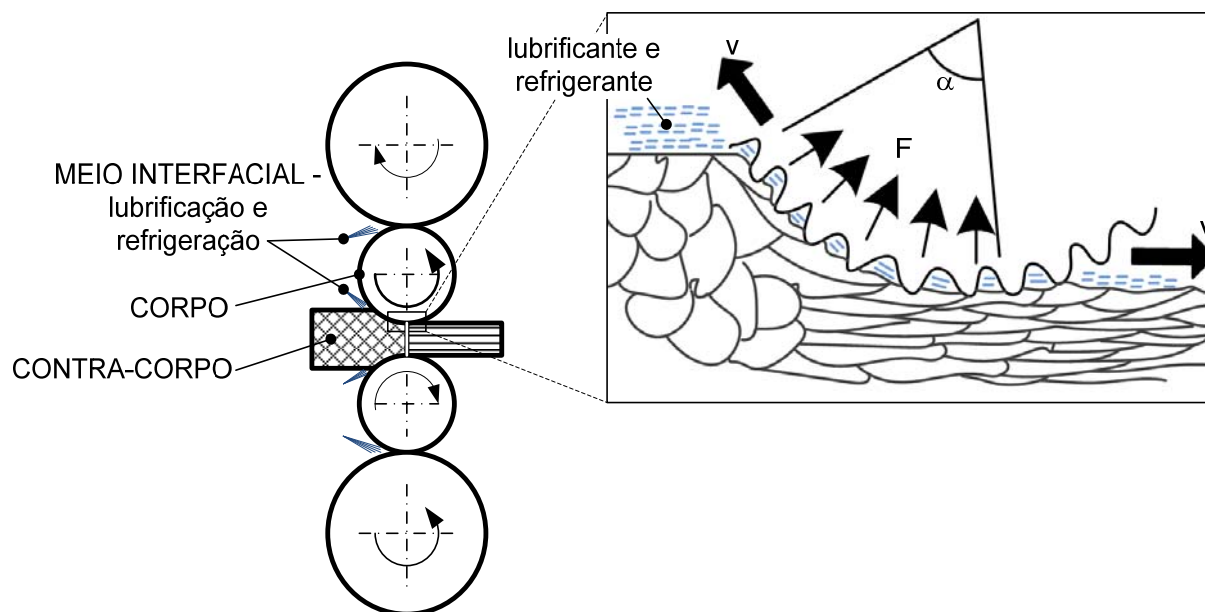


Figura 1. Elementos do tribossistema do processo de laminação a frio.

Observa-se ainda na Figura 1 a presença de variáveis operacionais tais como a velocidade (v), que pode ser à frente ou a ré, a força de laminação (F) e o arco de contato (α) que é basicamente determinado em função do grau de redução da espessura da tira laminada. Além dessas variáveis apresentadas esquematicamente, deve-se citar: a engenharia de superfície do cilindro (texturização e deposição da camada de cromo), o comprimento de material laminado e posição do cilindro no trem laminador (1^a, 2^a, 3^a, 4^a/5^a cadeiras). A combinação dos elementos do tribossistema com as variáveis operacionais resultam em ruído, geração de calor, e produtos do desgaste (e.g. alteração da forma do cilindro e formação de finos de ferro provenientes da tira laminada).⁽⁷⁾

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo do mecanismo de desgaste dos cilindros para laminação de tiras a frio teve como principal variável os diferentes laminadores do tipo tandem do Brasil, citados a seguir em ordem alfabética:

- CSN – laminador de cinco cadeiras denominado LTF-3;
- Usiminas/MG – laminador contínuo de cinco cadeiras;
- Usiminas/SP – laminador de quatro cadeiras; e
- Vega do Sul – laminador contínuo de quatro cadeiras.

As variáveis que derivam dos diferentes laminadores e que podem afetar o desgaste dos cilindros de trabalho são as seguintes: força de laminação, grau de redução, velocidade de laminação, quantidade de líquido lubrificante, quantidade de líquido

refrigerante, quantidade de material laminado, tipo de material laminado, laminação contínua ou interrompida, características do contato com o cilindro de encosto (pressão de contato e deslizamento) características superficiais dos cilindros (rugosidade e tratamento de superfície) e características dos cilindros (material e dureza).

A justificativa para o método utilizado neste estudo que possui um pequeno número de amostras para uma grande quantidade de variáveis, como listado acima, está na hipótese de que, com base em observações visuais dos cilindros após a laminação, o mecanismo de desgaste deve ser único e independente do tipo e variáveis de operação de cada laminador.

O método de estudo consiste em:

- análise de apenas um cilindro de cada cadeira (o cilindro superior) de cada um dos quatro laminadores. Foi analisado um total de 18 cilindros; e
- interpretação dos resultados das análises com base nas características superficiais dos cilindros anterior ao processo de laminação.

Além da hipótese de que os cilindros não apresentam grandes variações de desgaste entre uma campanha e outra se tem o fato de que durante o período no qual o cilindro permanece no laminador é suficiente para experimentar grandes oscilações das variáveis como força e tipo de produto laminado. Estas oscilações são constantes ao longo das diferentes campanhas consideradas normais, o que permite selecionar um cilindro que passou por um tempo médio no laminador, tempo correspondente a uma quantidade média de material laminado.

As análises para entendimento dos mecanismos de desgaste utilizadas neste estudo foram:

- análise da superfície do cilindro após laminação. As análises foram realizadas in loco na região central do comprimento da mesa. Estas análises foram realizadas por meio de microscopia óptica, com o auxílio de um microscópio óptico portátil e sistema de aquisição de imagem com o aplicativo ScopePhoto; e
- análise do perfil de rugosidade. O perfil de rugosidade foi analisado por meio de um perfilômetro de contato da marca Kosaka, modelo Surfcomer 1.700 α , que possui resolução de até 1 nm, cedido gentilmente pelo Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) (colocar o site) do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP).

Diferente da análise por microscopia óptica, a análise do perfil de rugosidade foi realizado com o auxílio de réplicas das superfícies. O material utilizado para réplica foi da marca Zhermack, modelo colorbite D. A capacidade de replicar a topografia desta réplica foi medida neste trabalho. Para isso, utilizou-se como referência um padrão de rugosidade de 3,0 μm de rugosidade média (Ra) e 101 μm de espaçamento médio entre picos (RSm).

A Figura 2 apresenta o resultado da réplica comparado à medida realizada no padrão de rugosidade. Observa-se que a diferença na escala vertical (parâmetro Ra) é de 5% e na escala horizontal (parâmetro RSm) é inferior a 1%.

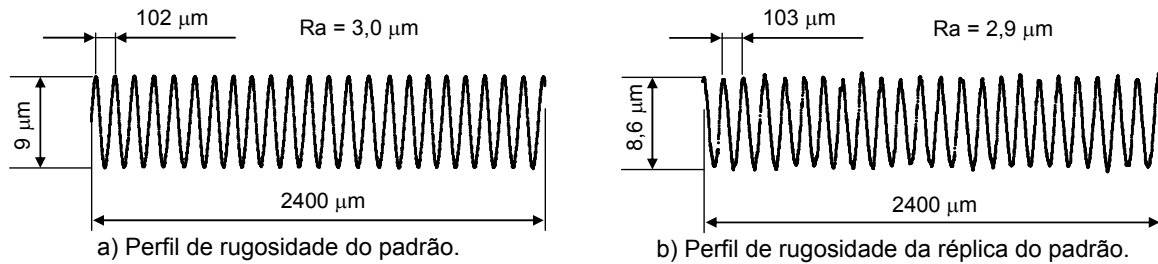


Figura 2. (a) Comparação entre as medidas dos perfis de rugosidade do padrão; e (b) da réplica do padrão. Medidas realizadas com filtro de Gauss, comprimento amostral (*cut-off*) de 0,8 mm e comprimento total igual a três vezes o comprimento amostral (2,4 mm).

A resistência da réplica a ação do apalpador do perfilômetro de contato foi igualmente medida por meio de sucessivas medições sobre o mesmo perfil topográfico. Os resultados mostraram que não há deformações plásticas da réplica pela ação do apalpador capaz de alterar o perfil topográfico e conseqüentemente seus parâmetros de rugosidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados a seguir não têm como objetivo determinar a intensidade do desgaste, mas sim seu mecanismo de formação. Por esse motivo os resultados não estarão correlacionados a um laminador, mas com a posição do cilindro nas respectivas cadeiras.

3.1 Análise dos Cilindros Utilizados na Última Cadeira

A Figura 3 apresenta o resultado das análises por microscopia óptica dos cilindros que laminaram na última cadeira do conjunto laminador. Todos os laminadores, independente de suas variáveis tais como o processo de texturização, apresentaram as mesmas características da superfície após a laminação, identificadas pelas áreas com marcas de desgaste e áreas que não apresentaram marcas de desgaste.

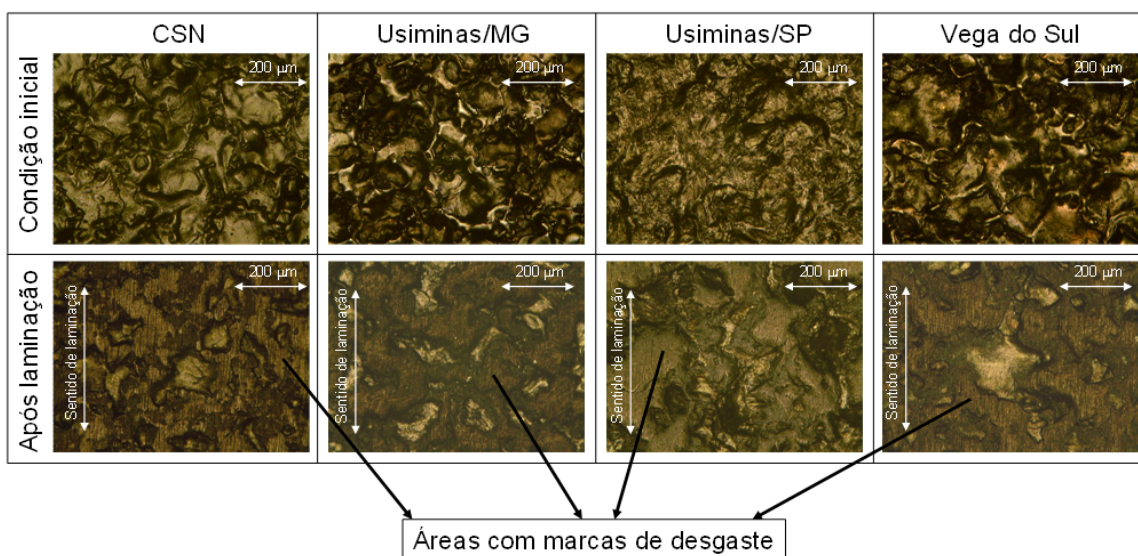


Figura 3. Variação superficial do cilindro utilizado na última cadeira em função da laminação dos diferentes laminadores.

Observações com maior aumento das áreas com marcas de desgaste permitiram identificar que estas marcas são como riscos causados por uma partícula com dureza suficiente para penetrar e deslizar sobre o material do cilindro (Figura 4). O fato dos riscos estarem no mesmo sentido de laminação sugere que estes foram causados por partículas abrasivas que deslizaram junto com a tira laminada.

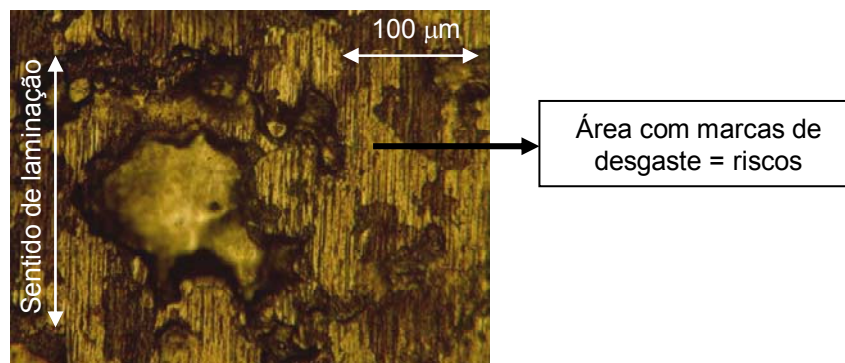


Figura 4. Detalhe de uma região de desgaste de um cilindro utilizado na última cadeia.

O processo de desgaste que resulta nas marcas de desgaste deve ser também responsável pela redução em altura do perfil de rugosidade com surgimento de platô. A Figura 5 mostra um exemplo da variação do perfil de rugosidade de um cilindro utilizado na última cadeia. Observa-se que há uma redução nas asperezas mais altas com formação de platôs e manutenção dos vales. A variação do perfil de rugosidade apresentado na Figura 5 é representativa para todos os laminadores analisados.

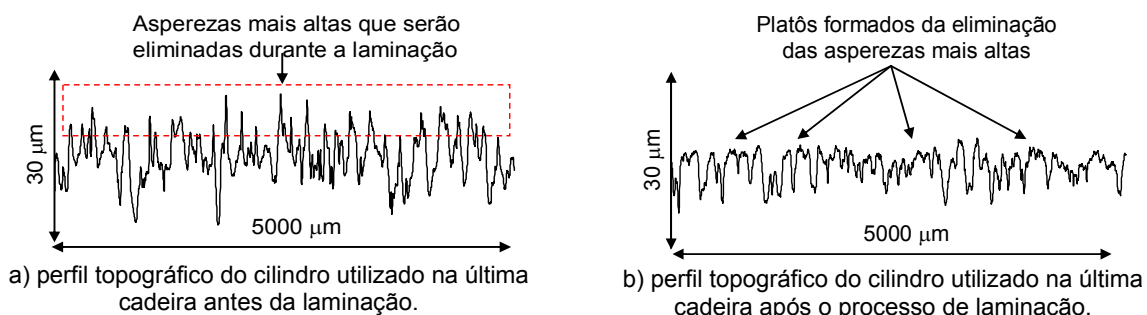


Figura 5. Variação do perfil de rugosidade de um cilindro utilizado na última cadeia antes (a); e depois da laminação (b).

A identificação dos platôs é importante, pois é um indicativo de que o desgaste não remove completamente o perfil de rugosidade estabelecido antes do processo de laminação.

Outro ponto importante da identificação dos platôs é que a presença desses platôs indica que a característica topográfica inicial não oferece área de sustentação suficiente para suportar as cargas de laminação. Prova disso é a redução de aproximadamente 30% das asperezas mais altas e também alteração da distribuição de altura das asperezas, que na condição antes da laminação apresenta uma distribuição normal diferente da distribuição após o processo de laminação (Figura 6).

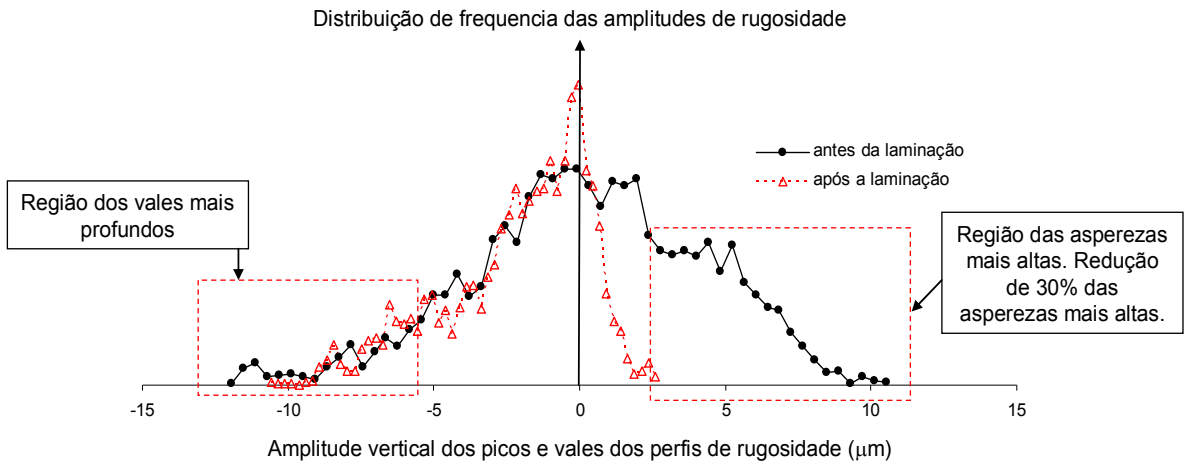


Figura 6. Histograma da distribuição de altura dos perfis de rugosidade de um cilindro utilizado na última cadeira antes e depois do processo de laminação.

3.2 Análise dos Cilindros Utilizados nas Demais Cadeiras do Laminador – Primeira a Penúltima

As análises realizadas com microscopia óptica dos cilindros que laminaram nas cadeiras anteriores a última não revelaram diferença significativa entre as superfícies antes e após a laminação.

A Figura 7 apresenta as análises realizadas nos laminadores da Usiminas/SP e Vega do Sul. Observa-se que independentemente do fato dos cilindros utilizados na Vega do Sul possuir revestimento de cromo as características das superfícies dos cilindros após a laminação são semelhantes, caracterizadas por riscos orientados com o sentido de laminação. Estas características foram também observadas nos cilindros utilizados nas cadeiras correspondentes dos laminadores da CSN e Usiminas/MG.

	Usiminas/SP		Vega do Sul	
	Primeira cadeira	Penúltima cadeira	Primeira cadeira	Penúltima cadeira
Condição inicial				
Após laminação				

Figura 7. Variação superficial do cilindro utilizado na primeira e penúltima cadeira em função da laminação dos diferentes laminadores (Usiminas/SP e Vega do Sul).

Os riscos que caracterizam a superfície do cilindro após a laminação são semelhantes aqueles riscos resultantes do processo de retífica e isto dificulta a interpretação do mecanismo de desgaste.

As análises do perfil de rugosidade dos cilindros que trabalharam nestas cadeiras não auxiliaram na identificação dos mecanismos de desgaste, pois diferente do observado no perfil de rugosidade da última cadeira, não há alteração na forma da distribuição de altura das asperezas. A distribuição de altura das asperezas segue uma distribuição normal, seja antes ou após o processo de laminação (Figura 8), onde se observa somente uma redução na amplitude vertical dos picos e dos vales do perfil de rugosidade.

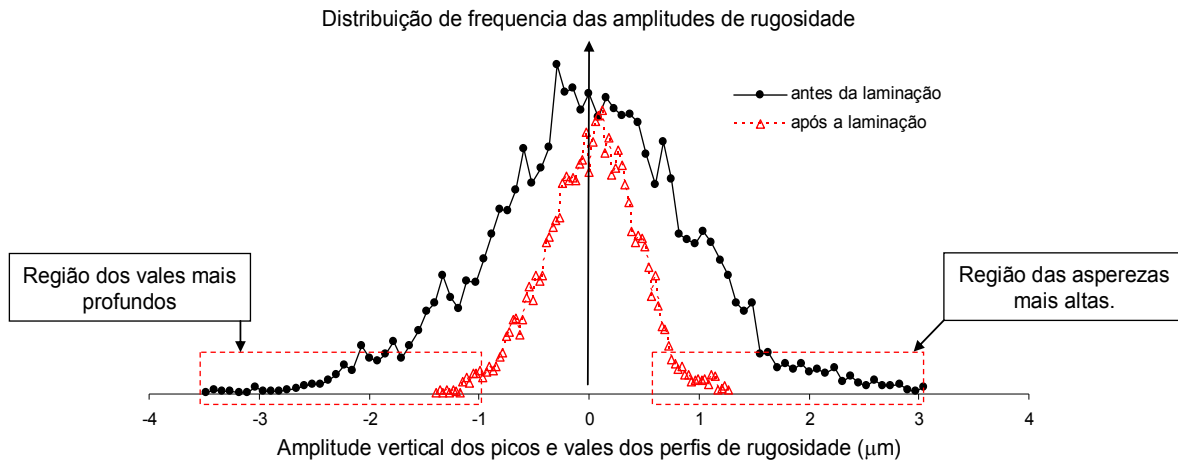


Figura 8. Histograma da distribuição de altura dos perfis de rugosidade de um cilindro utilizado na primeira cadeira antes e depois do processo de laminação.

Uma exceção aos resultados é o cilindro utilizado na primeira cadeira da CSN. Este cilindro apresentou marcas como os riscos semelhantes àqueles da última cadeira. A Figura 9 apresenta a característica de desgaste da primeira cadeira e da segunda cadeira da CSN e da Usiminas/MG. Observa-se que a maior diferença entre a condição inicial e após laminação esta na primeira cadeira. A partir da segunda cadeira do laminador da CSN as características de desgaste são semelhantes às cadeiras da Usiminas/MG (Figura 9), Usiminas/SP e Vega do Sul.

	CSN		Usiminas/MG	
	Primeira cadeira	Segunda cadeira	Primeira cadeira	Segunda cadeira
Condição inicial				
Após laminação				

Figura 9. Variação superficial do cilindro utilizado na primeira e segunda cadeira em função da laminação dos diferentes laminadores (CSN e Usiminas/MG).

3.3 O Mecanismo de Desgaste

As marcas caracterizadas como riscos indicam que o mecanismo de desgaste dos cilindros que trabalham na última cadeira é abrasão. Neste mecanismo de desgaste uma partícula abrasiva (dureza maior que o cilindro), engastada na tira, penetra, desliza e remove o material do cilindro.

Com base nos resultados do cilindro com superfície isotrópica utilizado na primeira cadeira do laminador da CSN, sugere-se que o mecanismo de desgaste é abrasão da primeira a penúltima cadeira.

A Figura 10 apresenta a hipótese para a ocorrência da abrasão nos cilindros retificados. Nesta descrição esquemática do mecanismo de desgaste a partícula abrasiva é da mesma ordem de grandeza dos relevos topográficos. A superfície retificada tem seus sulcos orientados com a direção de laminação e esta característica topográfica torna provável que a partícula abrasiva fique posicionada em um sulco durante o deslizamento, porém com a mesma probabilidade, é provável que alguma partícula remova por abrasão algum pico de rugosidade.

Diferente da superfície retificada, a superfície texturizada não apresenta orientação topográfica com a direção de laminação, isto é, a partícula abrasiva certamente encontrará um pico de rugosidade durante seu trajeto promovendo a abrasão.

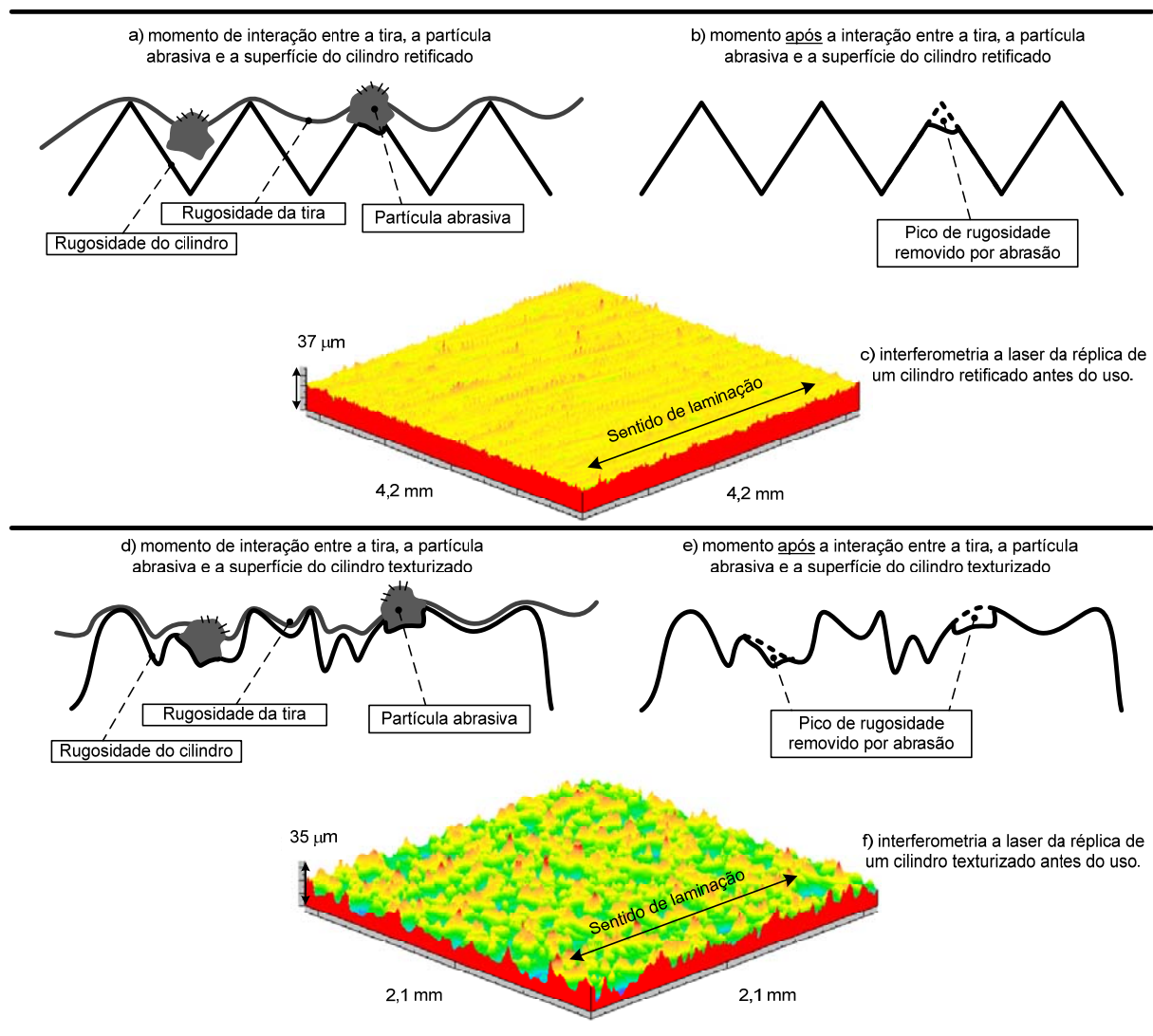


Figura 10. Representação esquemática do mecanismo de desgaste.

Neste estudo o desgaste do cilindro de trabalho foi interpretado somente pela sua interação com a tira (contra-corpo). Observações da região de contato do cilindro de trabalho com o cilindro de encosto mostraram que não há alterações significativas que necessitem ser consideradas (Figura 11).

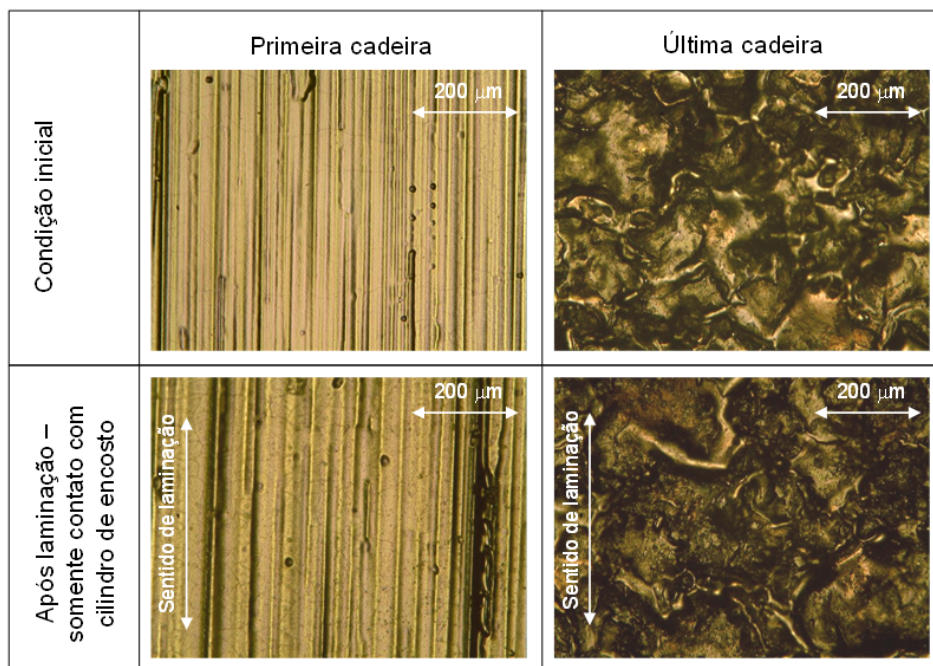


Figura 11. Superfície do cilindro de trabalho na região de contato com o cilindro de encosto.

4 CONCLUSÃO

O estudo permitiu formular que o mecanismo de desgaste predominante dos cilindros utilizados na laminação de tiras a frio é o processo abrasivo.

As formas possíveis para reduzir o desgaste por abrasão são:

- com foco no cilindro – introdução de segunda fase dura (carbonetos) na microestrutura do cilindro; e engenheirar uma superfície capaz de facilitar o deslocamento dos abrasivos para manter a rugosidade durante o tempo de laminação; e
- com foco no processo de laminação – eliminar as partículas abrasivas que são o produto da interação do cilindro com a tira laminada.

Agradecimentos

Agradecimentos ao Laboratório de Fenômenos de Superfície da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, em especial ao Professor Titular Deniol K. Tanaka, pela disponibilização do equipamento para medida dos perfis topográficos.

REFERÊNCIAS

- 1 JOST, H.P. Tribology – origin and future. *Wear*, 136, 1990. p. 1-17.
- 2 American Society for Metals. Friction, lubrication and wear technology. In: *Metals Handbook*, Vol. 18, 942 p., 1992.
- 3 ZUM GAHR, K.H. *Microstructure and wear of materials*. New York: Elsevier, 1987.

- 4 DICK K.; LENARD, J. G. **“The effect of roll roughness and lubricant viscosity on the loads on the mill during cold rolling of steel strips”**. Journal of Materials Processing Technology, Volume 168, N° 1, September, 2005, pp. 16-24.
- 5 SIMÃO, J.; ASPINWALL, D. K. **“Hard chromium plating of EDT mill work rolls”**. Journal of Materials Processing Technology, Volumes 92-93, N° 30 August, 1999, pp. 281-287.
- 6 TANAKA, T.; KOIE, T.; AYAGAKI, M.; YAMASHITA, M.; HASHIMOTO, M.; OTOMO, S.; INOUE, T. **“High speed steel typo cold rolling mill roll by continuous pouring process for cladding”**. Nippon Steel Technical Report, N° 86, July, 2002, pp. 80-85.
- 7 HUART, S.; DUBAR, M.; DELTOMBE, R.; DUBOIS, A.; DUBAR, L. **“Asperity deformation, lubricant trapping and iron fines formation mechanism in cold rolling processes”**. Wear, Volume 257, 2004, pp. 471-480.