

PARÂMETROS QUE AFETAM O DESGASTE DAS CHAPAS METÁLICAS DURANTE A LAMINAÇÃO A FRIO

Wilian da Silva Labiapari ¹
 Cláudio Moreira de Alcântara ²
 Gilvan José Coura ³
 Clênio da Silva Santana ⁴
 Cleber Barros Cunha ⁵
 José Carlos Batista ⁶
 Epifânio M. T. Souza ⁷
 José Torres de Castro ⁸
 Sandro Oliveira M. Lage ⁹

Resumo

O laminador a frio nº4 da Acesita possui um sistema de filtragem de óleo cujas paradas, devido ao excesso de resíduos, conduzia o equipamento a perdas na produção. Foi desenvolvida uma metodologia para avaliação da geração de partículas de desgaste das chapas durante a laminação, numa aproximação das condições industriais. Executou-se a caracterização dos materiais empregados como amostras de bobinas e de resíduos encontrados nos filtros. Constatou-se que o material encontrado é gerado durante a laminação a frio, fenômeno que é acentuado pelo acréscimo da temperatura do óleo de laminação, do encruamento da tira, pela qualidade da borda e da superfície da chapa. Sendo o desprendimento de material inerente ao processo, constatou-se em testes a saturação dos elementos filtrantes, que foram substituídos.

Palavras-chave: Laminação; Superfície; Desgaste.

PARAMETERS AFFECT THE WEAR OF METAL SHEETS DURING COLD ROLLING

Abstract

The Acesita's cold rolling mill number 4, LB4, has a oil filter system that left to lose working time when stopped, because the excess of dirty. In this work, we developed a method to evaluate the generation of wear debris on sheet surface during cold rolling, intending to approximate to the real process condition. In this way, some analysis of material used, like samples and filter system residues were done. This work shows detachment of particles of metal during the cold rolling as a normal process condition. This phenomena increases with the increase of oil temperature, total cold reduction, surface and edge of coil. The process wasn't with a problem and we needed to change the filter elements of the system.

Key words: Rolling; Surface; Wear.

1 INTRODUÇÃO

O laminador a frio de bobinas nº. 4 da Acesita, LB4, possui um sistema de filtragem de óleo cujas paradas conduzia o equipamento a perdas na produção. Com este trabalho, objetivou-se o entendimento da origem do particulado encontrado no sistema de filtragem do laminador a frio de bobinas nº. 4 da Acesita, LB4.

Para aproximação das condições do processo industrial, desenvolveu-se uma metodologia que permitiu diferenciar as condições de processo pelo grau de severidade do desgaste provocado nas amostras laminadas. Para isso, foram necessários ensaios de caracterização dos materiais empregados no estudo, como amostras

¹ Engenheiro Mecânico, M. Sc, Pesquisador do Centro de Pesquisa – Acesita S.A.

² Técnico Químico, Analista Téc. de Pesquisa de Inox – Acesita S.A.

³ Engenheiro Mecânico, Ass. Téc. Recozimento e Decapagem de Inox – Acesita S.A.

⁴ Engenheiro Mecânico, Assistente Técnico da Melhoria Contínua – Acesita S.A.

⁵ Engenheiro Metalúrgico, Ass. Téc. Recozimento e Decapagem de Inox – Acesita S.A.

⁶ Engenheiro Mecânico, M. Sc, Assistente Técnico da Laminação a Frio de Inox – Acesita S.A.

⁷ Técnico Metalúrgico, Analista Téc. de Recozimento e Decapagem de Inox – Acesita S.A.

⁸ Engenheiro Mecânico, Assistente Téc. Eng. Manutenção de Inox – Acesita S.A.

⁹ Técnico Químico, Analista Téc. de Recozimento e Decapagem de Inox – Acesita S.A.

de bobina decapada, após laminação a quente/recozimento, além dos resíduos encontrados no óleo e nos filtros.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

No processo de entendimento, foram recolhidas amostras de resíduo encontrados nos elementos filtrantes e no óleo de laminação. Para o primeiro caso, o material foi secado e utilizou-se difração de Raios X e MEV para caracterização. No caso do óleo, o tamanho do particulado disperso foi medido via granulometria laser.

Para a simulação das condições de laminação, foram utilizadas amostras metálicas de vários aços inoxidáveis, todas respeitando um tamanho inicial padrão, de 45 mm x 100 mm pela espessura. Foi utilizado um laminador piloto do Centro de Pesquisas da Acesita para laminação e, após limpeza da amostra, e uma balança de precisão para medida da perda de peso após cada passe.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise Química dos Resíduos

Inicialmente, os resíduos encontrados nos filtros eram designados como uma forma de “grafita” ou “graxa”, em função da coloração e textura. Isto gerava dúvida por não haver uma fonte definida para este material. Em análises morfológicas (Figura 1c) e químicas via MEV (Tabela 1), foi visto que se tratava de material metálico com alguma presença de óxido (Fe_2O_3), conforme espectro de raios X, Figura 2.

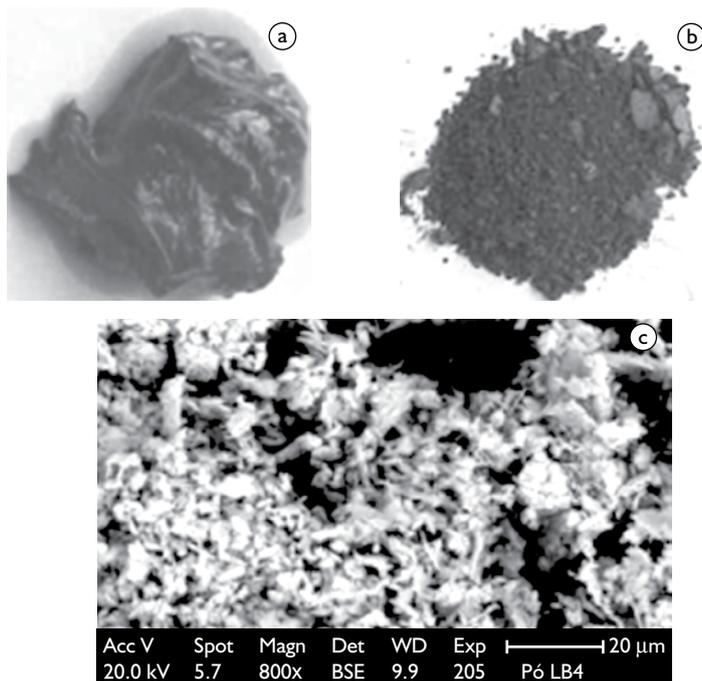


Figura 1. a) Resíduo recolhido; b) separado a fase sólida; e c) morfologia via MEV em função da redução.

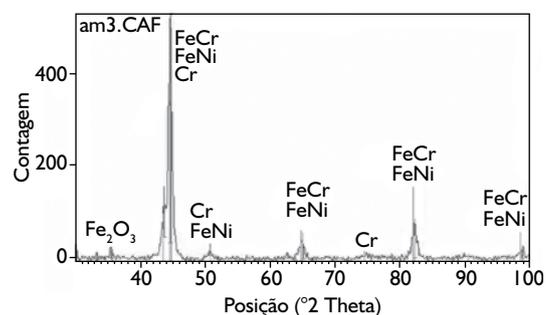


Figura 2. Espectro de difração de Raios X do resíduo.

Tabela 1. Análise química do resíduo recolhido no filtro do LB4.

Elemento	Fe	Cr	Ni	O ₂
Peso %	68,08	15,98	6,60	8,48

A origem é então da própria bobina, com uma forte ligação aos aços da série 304, em função do teor de Ni. Foi efetuada uma filtragem seletiva e análise química do resíduo do óleo de laminação. Na Tabela 2, a composição básica é a mesma, sendo progressivo o teor de oxigênio, quanto menor o tamanho do particulado. Como o óxido é friável, não comporta deformação plástica e se quebra, ele passa pela malha menor durante a filtragem seletiva.

Tabela 2. Análise química do resíduo após filtragem seletiva (%).

Malha (µm)	Fe (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	O ₂ (%)
1,00	67,37	0,73	1,59	17,61	5,77	6,93
0,80	67,26	0,77	1,53	17,23	5,51	7,71
0,45	66,04	0,73	1,69	16,99	6,50	8,05

3.2 Análise do Mecanismo

Na laminação de amostras no laminador do Centro de Pesquisa, foi observado o desprendimento de resíduo, conforme Figura 3.

Uma balança de precisão possibilitou medir a perda de peso, desgaste, das amostras, permitindo comparar diversos aços e condições de processo. Para todos os casos a rugosidade média do cilindro de trabalho foi $Ra = 0,25 \mu m$, mantendo um melhor controle das condições de contato.

3.2.1 Desprendimento de material em função da deformação a frio

Várias amostras de diferentes aços foram submetidas à laminação a frio em laboratório com o mesmo plano de redução da linha industrial. Trabalhou-se, nesta etapa, com o óleo de laminação à temperatura ambiente. Observou-se que o desgaste das amostras segue uma tendência, quase

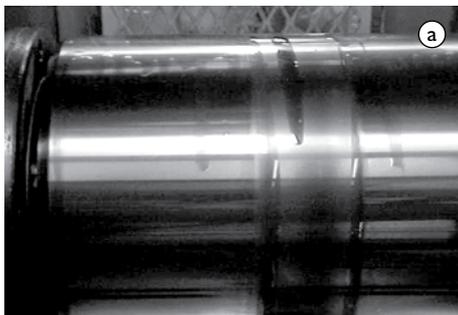


Figura 3. Resíduos que se desprenderam durante a laminação a frio no laminador do Centro de Pesquisa a) sobre o cilindro; e b) sobre a amostra.

exponencial, para todos os aços, em função da redução, conforme a Figura 4a. Na Figura 4b vê-se que, ao perder a capacidade de alongar-se, o material torna-se mais susceptível ao desgaste. Há uma forte correlação entre o desprendimento de massa e a redução total a qual é submetida. A partir de determinada redução, o material tem um desgaste progressivo, associando-se à perda de ductilidade. Contudo, os dados não podem ser aplicados diretamente na escala industrial, onde os laminadores têm menores diâmetros de cilindros, que promovem um acúmulo maior de energia de deformação plástica nas asperezas da superfície. A energia acumulada, também, aumenta com decréscimo do número de passes de laminação, para uma mesma redução a frio, o que muitas vezes, é praticado visando o aumento de produtividade. Este fenômeno está relacionado ao aumento do ângulo de entrada da chapa entre os cilindros.⁽¹⁾ Na linha industrial, também se trabalha em uma maior velocidade, ou seja, em outro regime de lubrificação.

3.2.2 Desprendimento de material em função do aspecto superficial

A Figura 5 mostra o aço 304 com diferentes acabamentos superficiais, refletindo nos resultados da Figura 6. A superfície que foi superdecapada (Figura 5b) não tem tantos grãos superficiais propícios a se desprenderem como na condição padrão industrial (Figura 5a), levando ao menor desprendimento de material. A

condição superescovada (Figura 5d) propicia uma maior área isenta de grãos praticamente soltos (Figura 5c), o que leva também a um menor desgaste.

Finalizando, amostras dos aços 409 e 304 em três condições de superfície, polidas, jateadas e de material padrão, foram testadas. A Figura 7 mostra o aspecto superficial após a preparação e a Figura 8 o desempenho.

As que foram polidas perdem muito menos material do que as sem polimento. Isto se deve à remoção dos picos de rugosidade que se soltariam durante a laminação, colocando-as em um patamar de desgaste 50% menor.

3.2.3 Desprendimento de material em função ausência de recozimento da BQB

Para finalizar a questão da influência do encruamento, a Figura 9 compara dois tipos de aço 304, com e sem recozimento em laboratório. Novamente evidencia-se a influência do material mais encruado.

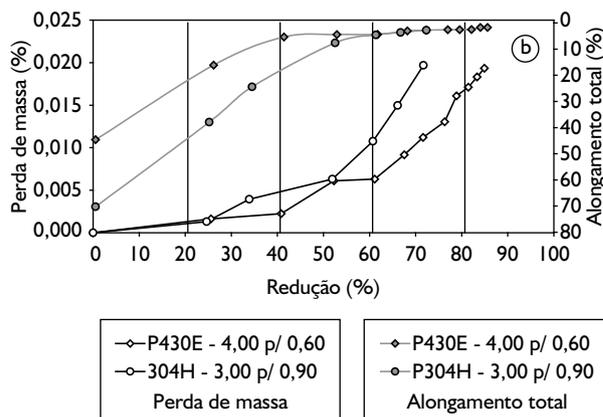
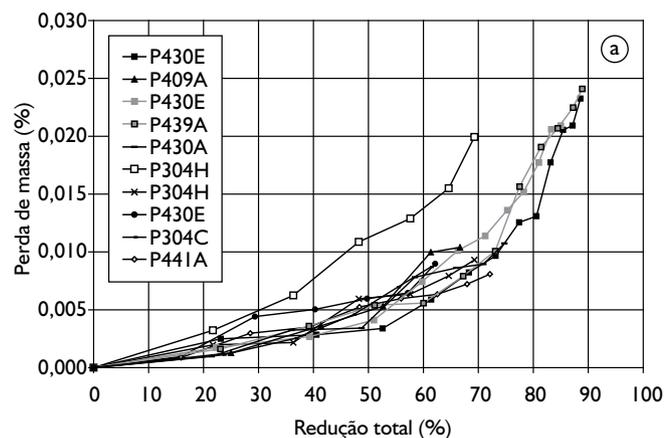


Figura 4. a) Perda de massa acumulada por cada passe de laminação em função da redução; e b) perda de massa e alongamento em cada passe de laminação.

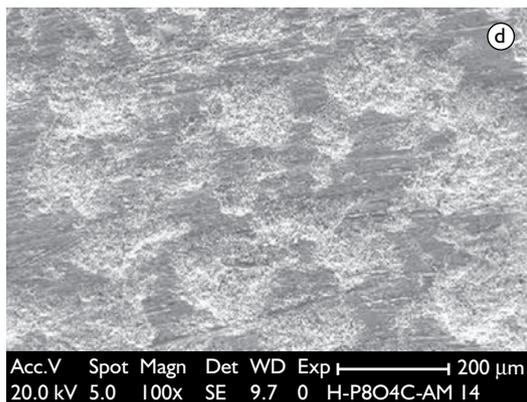
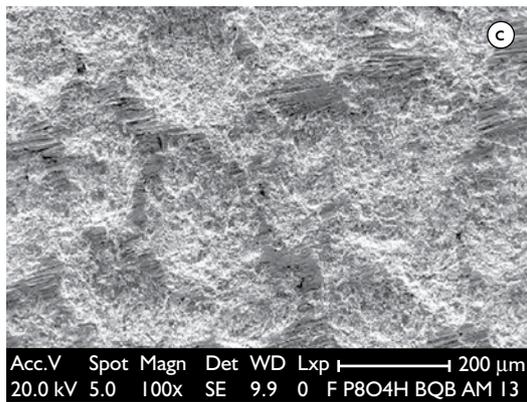
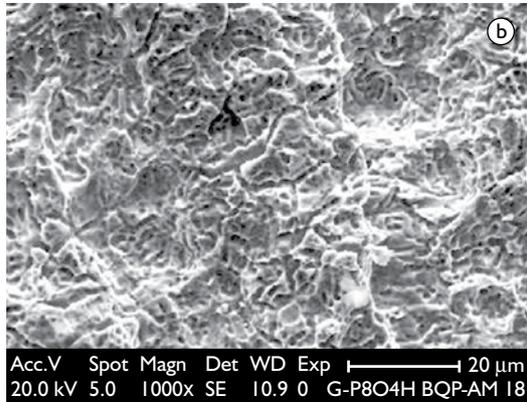
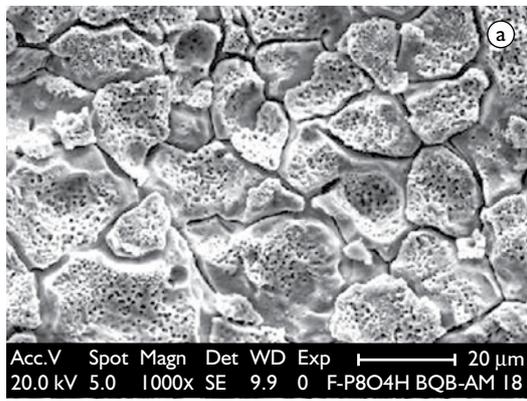


Figura 5. Superfície do 304 a) decapagem padrão; b) superdecapada em laboratório; c) escovamento padrão; e d) superescovada.

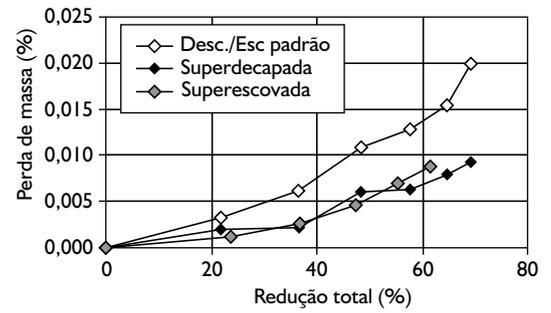


Figura 6. Perda de massa entre amostras de aço 304 com diferentes superfícies.

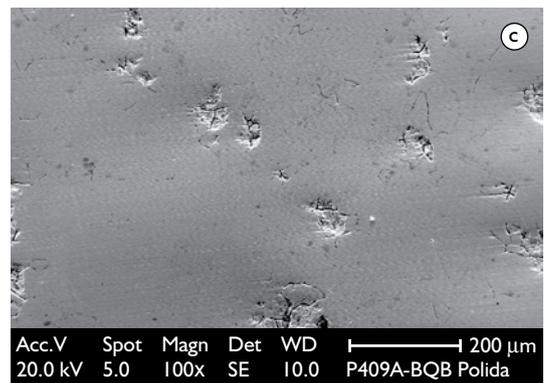
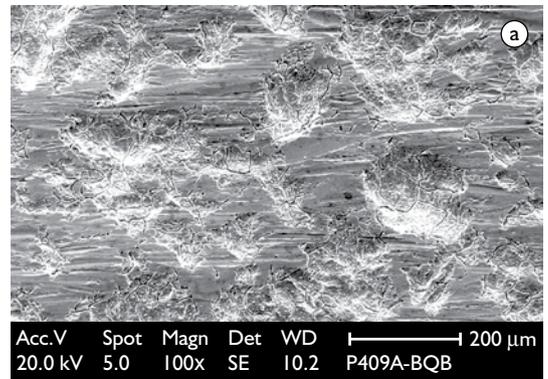


Figura 7. Aspecto superficial das amostras para laminação. a) padrão; b) jateada com posterior redcapagem; e c) polida.

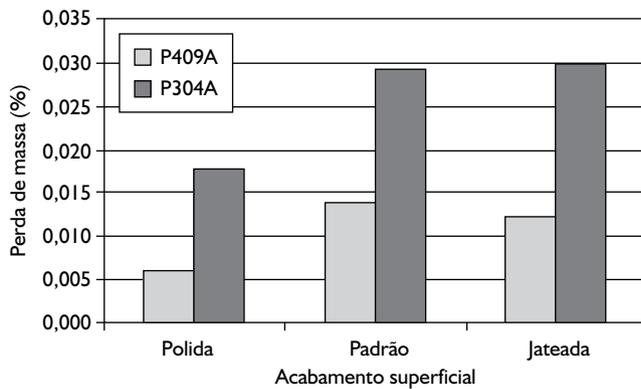


Figura 8. Perda de massa em função do acabamento superficial.

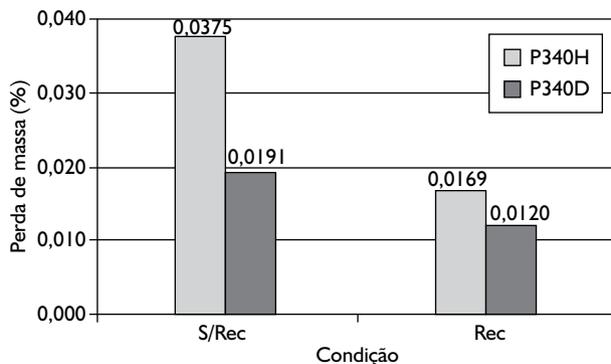


Figura 9. Perda de massa comparativa para o aço 304 com e sem recozimento.

3.2.4 Desprendimento de material em função da temperatura do Óleo de laminação

A Figura 10 mostra a importância da temperatura do óleo de laminação, que na linha industrial é de aproximadamente 40°C, controlada por trocadores de calor. Contudo, nos passes intermediários, a tira pode chegar a 150°C de forma que no contato chapa/cilindro, a temperatura é bem superior. Há uma nítida diferença entre os materiais processados com o óleo à temperatura ambiente e à 85°C, sendo pior quanto maior a temperatura. Segundo Sutcliffe e Montmitonnet,⁽²⁾ o cálculo da espessura do filme de óleo leva em consideração a viscosidade do lubrificante. O aumento da temperatura geralmente provoca uma maior fluidez do óleo lubrificante, pois, aumenta a energia interna do fluido, separando as moléculas que o compõe, reduzindo assim o atrito interno deste permitindo-o fluir mais facilmente.

O aumento da viscosidade promove o aumento do filme de lubrificação,⁽³⁾ conforme descrito pela equação abaixo, onde, h_w é a espessura do filme de óleo descrita por Le e Sutcliffe;⁽⁴⁾ η_0 é a viscosidade; α um coeficiente de variação da viscosidade com a pressão; \bar{U} a velocidade média de laminação; ϕ_0 o ângulo de mordida; e Y o limite de escoamento no estado plano de deformação.

$$h_w = \frac{6\eta_0\alpha\bar{U}}{\phi_0(1 - \exp(-\alpha Y))} \quad (1)$$

Em relação aos dois aços, a diferença é sistemática, condizente com a composição química do material encontrado nos filtros do LB4.

3.2.5 Desprendimento de material em função da posição da amostragem, borda e centro, da bobina

Como até o momento foi estudado apenas o material do centro da largura da bobina, foi mudado o foco bordas, pela possibilidade de apará-las antes da laminação, evitando seu efeito, mas gerando custo. A Figura 11 mostra os aços 304 e 430 de forma comparativa. Fica mais uma vez evidente qual aço perde mais massa. Contudo, esta análise não é suficiente, pois, com 60% de redução na borda, os dois aços se equivalem em perda de massa. No centro, a tendência é condizente com os dados já apresentados. Isto se deve ao fato de que a borda do 430 geralmente vem acompanhada de muito óxido, Figura 12, que se solta nos primeiros passes de laminação.⁽⁵⁾ Após se soltar, o desprendimento que ocorre é de material metálico, onde o 304 evidencia mais este comportamento. A Tabela 3 mostra dados comparativos da perda de massa entre a borda e o centro.

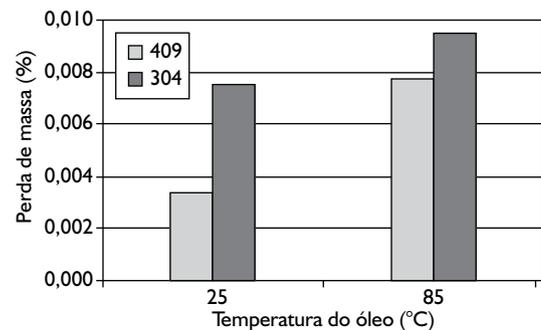


Figura 10. Perda de massa para os aços 409 e 304, laminados de 3,00 mm para 0,60 mm. Óleo de laminação na temperatura ambiente e a 85°C.

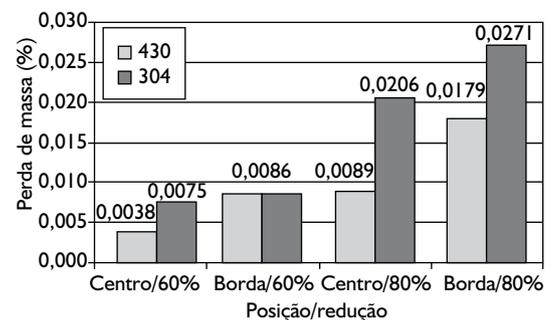


Figura 11. Perda de massa para o 430 e 304, laminados de 3,00 mm p/1,20 mm e posteriormente 0,60 mm.

Tabela 3. Perda de massa para os dois aços, no centro da largura e na borda.

	60% de redução			80% de redução		
	Centro (%)	Borda (%)	Difer. (%)	Centro (%)	Borda (%)	Difer. (%)
430	0,0038	0,0086	125,97	0,0089	0,0179	101,48
304	0,0075	0,0086	15,02	0,0206	0,0271	31,36

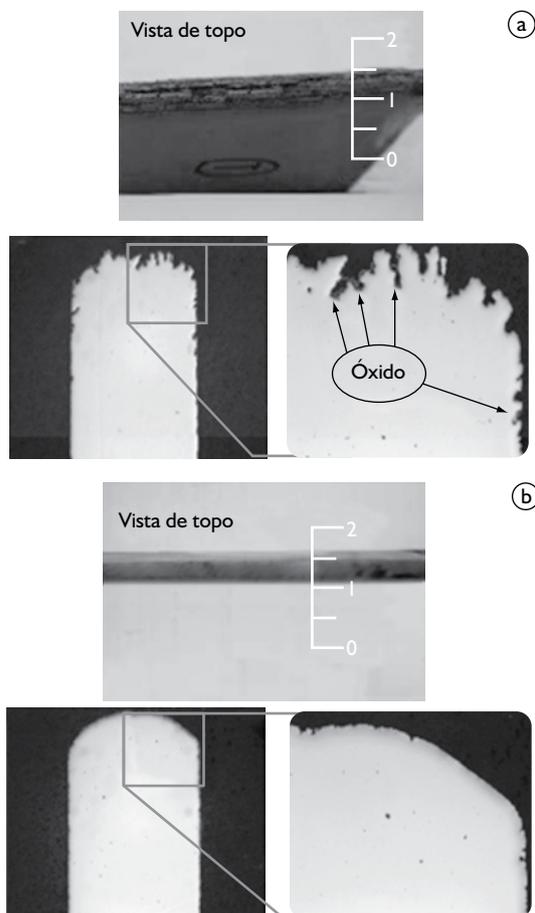


Figura 12. Vistas de topo e transversal da borda de BQB dos aços a) 430; e b) 304.

A diferença de perda de massa borda/centro nos primeiros 60% de deformação é de 125% contra 15%, respectivamente para o 430 e o 304. Isto muda um pouco até 80% de redução. No primeiro a diferença cai, pois, não há muito óxido a se soltar e a taxa de perda de massa metálica é menor do que a de resíduo óxido que já se desprende. No segundo, como praticamente não há óxido na borda, a diferença é crescente em função da deformação, desprendendo apenas material metálico.

3.2.6 Desprendimento de material em função da presença de particulado no Óleo

É sabido que a presença de particulado metálico entre as duas superfícies em contato deslizante promove um maior desgaste, pelo mecanismo de abrasão por terceiro corpo.⁽⁶⁾ Desta forma, a presença de resíduos gera mais resíduos. Embora tenha sido testada esta hipótese, o ensaio de laboratório não foi preciso o suficiente para diferenciar o comportamento entre o óleo sujo e limpo.

3.3 Análise do resíduo encontrado dentro do elemento filtrante

Foi recolhido um elemento filtrante sujo e retirado o particulado metálico que se encontrava em seu interior. A Figura 13b mostra o material agarrado dentro do elemento filtrante e na Tabela 4 vê-se

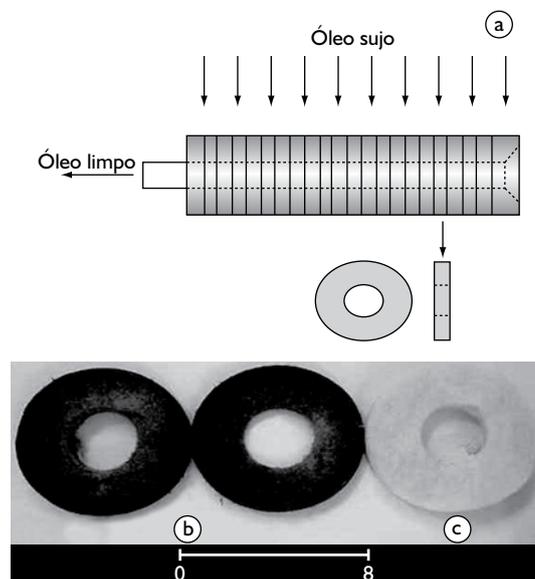


Figura 13. Esquema de um a) elemento filtrante, apresentando sua malha interna; b) suja após uso; e c) limpa, que ainda não foi utilizada.

um teor de níquel mais baixo e oxigênio mais alto que os valores até então apresentados nas Tabelas 1 e 2, o que nos leva a dois raciocínios. No primeiro, pelo teor de níquel mais baixo, há uma menor influência dos aços da série 304 em sujar as partes internas do filtro, que obviamente, é mais difícil de se limpar. No segundo, pelo teor de oxigênio mais alto, há uma maior influência dos óxidos, ainda presentes desprendidos durante a laminação.

Tabela 4. Análise química do particulado recolhido no interior do elemento filtrante.

	Fe	Si	Mn	Cr	Ni	O ₂
(%)	67,02	3,17	1,28	15,32	3,11	9,93

O fato de que o óxido quebra-se tornando uma partícula muito mais fina que os resíduos metálicos, permite que eles entrem nos poros dos elementos filtrantes. Como em uma bobina há mais superfície central do que de borda, região preferencial para acúmulo de óxido, torna-se evidente que haja mais perda de massa metálica do que de material oxidado.

3.4 Distribuição Granulométrica do Particulado no Óleo de Laminação

Amostras do óleo de laminação foram recolhidas na cadeira do LB4. Antes da coleta, várias bobinas de aço 304 foram processadas e posteriormente, o mesmo procedimento para o aço 409, de forma que o óleo estivesse com concentrações representativas de particulado para estes aços. A Figura 14 mostra a distribuição medida por um granulômetro a laser.

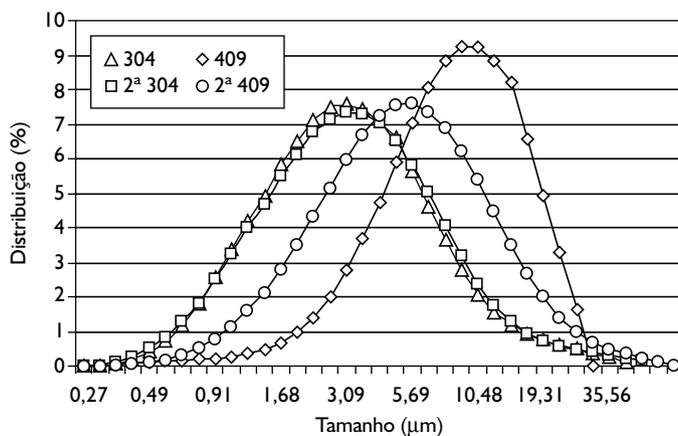


Figura 14. Distribuição granulométrica do particulado no óleo recolhido da cadeira do LB4 durante o processo dos aços P304A e P409A.

Para o aço 304, é visto que as duas curvas se sobrepõem, em uma distribuição mais homogênea. Destaca-se que suas bordas não têm óxidos, o que tende a ser principalmente material metálico arrancado durante a laminação. Para o aço 409, têm-se duas populações distintas. Esta diferença de particulado pode ser atribuída à presença de duas fases sólidas, sendo uma metálica e outra óxida, muito observada nas bordas destes aços.

4 CONCLUSÕES

Tem-se a perda de massa como inerente ao processo de laminação, e que a borda da bobina é a região onde isto mais se acentua. Quando há a presença de óxido, este fenômeno é agravado. Pode-se afirmar também que, outros fatores influenciam no aumento do desprendimento de material, como:

- Aumento da redução total a frio, sem um processo intermediário de recozimento, sendo uma função direta do encruamento do material;
- Materiais sem recozimento após a laminação a quente, que obviamente estão mais encruados; e
- Aumento da temperatura do óleo de laminação.

A qualidade da superfície, pois, os picos de rugosidade são os mais propícios a serem arrancados, assim como os grãos com os contornos atacados.

O aço 304 perde mais material que os aços da série 4XX (430 e 409).

O estudo pode ser complementado com outras condições de contato como influência da redução total por passe, do diâmetro dos cilindros além da rugosidade do cilindro de trabalho. Esta metodologia pode ainda ser melhorada com a utilização de equipamentos que permitam uma melhor aproximação das condições industriais, como as tensões de tração envolvidas e as condições de contato em altas velocidades.

Principalmente, o laminador piloto se mostrou capaz de executar trabalhos tribológicos para a laminação a frio.

O processo não estava descontrolado, sendo que todas as modificações possíveis foram testadas. Houve uma real saturação dos elementos filtrantes, sendo substituídos.

REFERÊNCIAS

- 1 HUART, S.; DUBAR, M.; DELTOMBE, R.; DEBOIS, A., DUBAR, L. Asperity deformation, lubricant and iron fines formation mechanism in cold rolling processes. **Wear**, v. 257, n. 5-6, p. 471-80, Sept. 2004.
- 2 SUTCLIFFE, M. P. F. ; MONTMITONNET, P. Numerical modelling of lubricated foil rolling. **Revue de Métallurgie**, v. 5, p. 435-42, 2001.
- 3 ESSO. Esso serves the world metalworking industry: metalworking process and products. In: SEMINAR PRESENTED BY ESSO, 1979.
- 4 LE, H. R.; SUTCLIFFE, M. P. F. Evolution of surface pits on stainless steel strip in cold rolling and strip drawing. **Journal of Tribology**, v. 125, n. 2, p. 384-90, April 2003.
- 5 LABIAPARI, W. S.; BATISTA, J. C., SANTANA, C. S., LAGE, S. O. M., FERNADES, N. G. F Simulação do mecanismo de formação do defeito mecânico impresso na superfície da tira laminada de aços inoxidáveis. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO – PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, 42., 2005, Santos. **Anais...** São Paulo: ABM, 2005.
- 6 HUTCHINGS, I. M. Wear by hard particles. In: _____. **Tribology: frictional and wear of engineering materials**. Cambridge: Department of Materials Science and Metallurgy University of Cambridge, 1992. Cap. 6, p.133-97.

Recebido em: 26/12/06

Aceito em: 09/07/07

Proveniente de: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO – PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, 43., 2006, Curitiba. São Paulo: ABM, 2006.