



EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE A ENERGIA ESPECÍFICA DE RISCAMENTO DO ALUMÍNIO COMERCIALMENTE PURO

Renato Formoso Maracini

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Sta. Mônica, s/n, 38.400-902, Uberlândia-MG, renatofm@triang.com.br

Alisson Rocha Machado

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Sta. Mônica, s/n, 38.400-902, Uberlândia-MG, alisson@mecanica.ufu.br

Sinésio Domingues Franco

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Sta. Mônica, s/n, 38.400-902, Uberlândia-MG, ltm-sdfranco@ufu.br

Resumo. *A esclerometria pendular consiste de um penetrador preso à extremidade de um pêndulo, que percute sobre uma amostra, gerando, assim, um risco. A energia dissipada na geração do risco é determinada pela variação da energia potencial do pêndulo, de maneira análoga à utilizada nos ensaios de impacto. A energia específica de riscamento, dada pela relação entre a energia necessária para gerar um risco e a massa removida, é um parâmetro de rápida obtenção, e representativo da resistência à abrasão dos materiais para várias situações práticas. Assim, através da esclerometria pendular é possível classificar diferentes materiais com relação ao desgaste abrasivo, e de forma relativamente barata. No presente trabalho foram realizados ensaios de esclerometria pendular com profundidade de riscamento constante e variável em diferentes temperaturas com o objetivo de identificar os efeitos desse parâmetro sobre a energia específica de riscamento do alumínio comercialmente puro. Os mecanismos de formação de cavacos foram analisados através de microscopia eletrônica de varredura. Os resultados obtidos mostram que a energia específica diminui com o aumento da profundidade para uma mesma temperatura. Esse efeito de escala é, todavia, mais evidente em amostras ensaiadas com profundidade de riscamento constante. Com o aumento da temperatura há uma redução da energia específica. Os cavacos observados são basicamente do mesmo tipo, independentemente da temperatura e da profundidade de riscamento, qual seja, de empilhamento. Em amostras não recozidas e a baixas temperaturas nota-se a presença de cavacos alongados tendendo à forma contínua.*

Palavras-chave: *Esclerometria pendular, energia específica de riscamento, desgaste abrasivo, riscamento a altas temperaturas, alumínio*

1. INTRODUÇÃO

É sabido, que as propriedades mecânicas dos materiais é, de forma geral, fortemente influenciada pela temperatura (Sims *et al.*, 1987). Como exemplo, citam-se as reduções de dureza e resistência mecânica com o aumento da temperatura na maioria dos materiais. Por outro lado, a tenacidade à fratura pode experimentar consideráveis aumentos. Por isso, é de se esperar que o comportamento tribológico seja também afetado. Esse aumento de temperatura de superfícies técnicas em contato e movimento relativo ocorre devido à deformação plástica das mesmas, ao atrito, à atmosfera presente, ou ainda, devido a uma combinação desses fatores.

A simulação de tribosistemas envolvendo temperaturas elevadas é significativamente dificultada, pois são necessários sistemas adicionais de controle da temperatura, de refrigeração, etc.. Por esse motivo, apesar da importância do assunto, a maior parte dos trabalhos sobre desgaste de peças e componentes são conduzidos à temperatura ambiente (Franco, 1996). Para simular os efeitos da temperatura sobre a abrasão, a erosão e a usinagem, a esclerometria pendular apresenta-se como uma alternativa interessante, uma vez que se trata de uma técnica relativamente barata e de fácil realização. O princípio de funcionamento da esclerometria pendular é apresentado na Fig. (1). Com a liberação do pêndulo, o elemento riscante gera sobre a amostra, fixa na parte inferior da trajetória, um risco de comprimento $2L$, cuja geometria depende da do elemento riscante. A energia dissipada para produzir o risco é determinada pela variação da energia potencial do pêndulo, de maneira análoga à utilizada nos ensaios clássicos de resistência ao impacto.

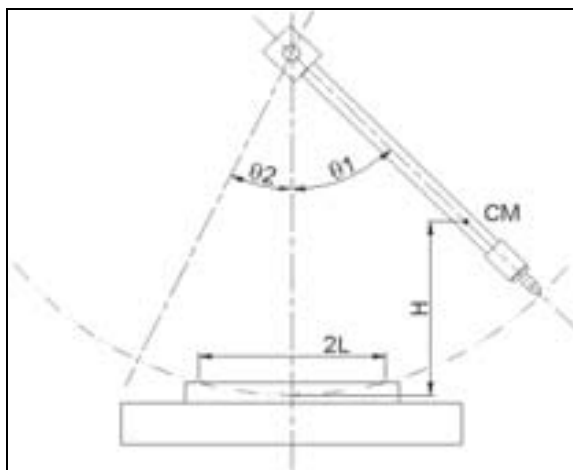


Figura 1. Representação esquemática do esclerômetro pendular utilizado; θ_1 e θ_2 representam os ângulos de disparo inicial e final, $2L$ o comprimento do risco, H a altura do centro de massa em relação à horizontal.

O emprego dessa técnica no estudo do processo abrasivo foi largamente utilizado inicialmente por Bryggman *et al.* (1979 e 1985), Soderberg *et al.* (1985), que acoplaram um penetrador de extremidade truncada a um pêndulo de impacto Charpy. Desta forma, pode-se simular a ação de uma partícula dura riscando uma superfície técnica, determinando, por exemplo, a energia específica de riscamento. Esse parâmetro se mostrou diretamente proporcional à resistência ao desgaste abrasivo operante em vários tribosistemas.

As análises dos cavacos removidos fornecem informações importantes para o entendimento de aspectos fundamentais do processo abrasivo, bem como para a usinagem de metais. Na literatura encontram-se ainda tentativas de reduzir as dimensões dos riscos, de tal forma a se poder melhor reproduzir os eventos do desgaste abrasivo (Franco, 1989). Adicionalmente, através da instrumentação do elemento riscante com relação aos esforços normal e tangencial pode-se ter informações adicionais com relação ao processo de riscamento (Liang *et al.*, 1996, Liu, 1996, Vélez *et al.*, 2001).

Assim, devido à simplicidade e ao baixo custo desse ensaio, foi desenvolvido recentemente um porta-amostra para um pêndulo de baixa energia, e com capacidade de aquecimento dos corpos de prova (Ramos Neto *et al.*, 2001). O presente trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos da temperatura sobre o processo de riscamento do alumínio comercialmente puro, bem como sobre os mecanismos de desgaste utilizando a esclerometria pendular.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios de esclerometria pendular a quente foram conduzidos em um pêndulo de impacto modificado, cuja energia potencial de disparo é de 15 J e a velocidade de riscamento de 3,83 m/s, Fig. (2). Para viabilizar os ensaios a quente foi especialmente desenvolvido, projetado e construído

um porta amostra, onde destacam-se as seguintes facilidades: a) ajuste da profundidade de riscamento, b) movimentação longitudinal e c) rotacional, como mostrado através da Fig. (3). Esses diferentes graus de liberdade foram desenvolvidos com o intuito de facilitar o posicionamento das amostras.

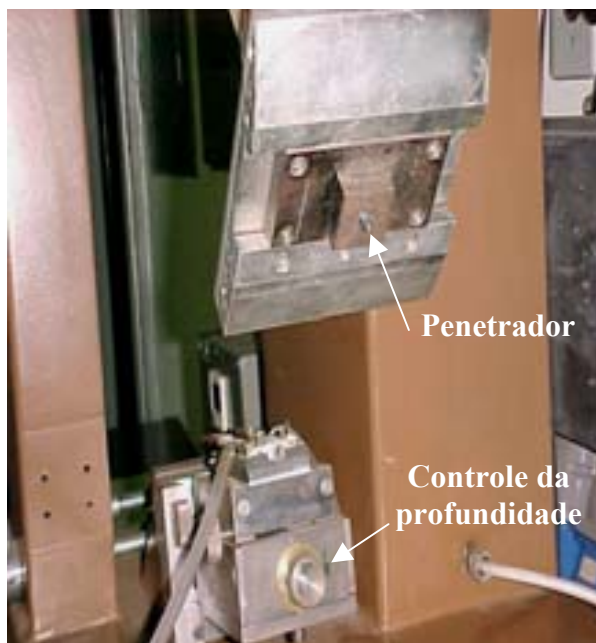


Figura 2. Vista frontal do equipamento utilizado nos ensaios de esclerometria pendular a quente.

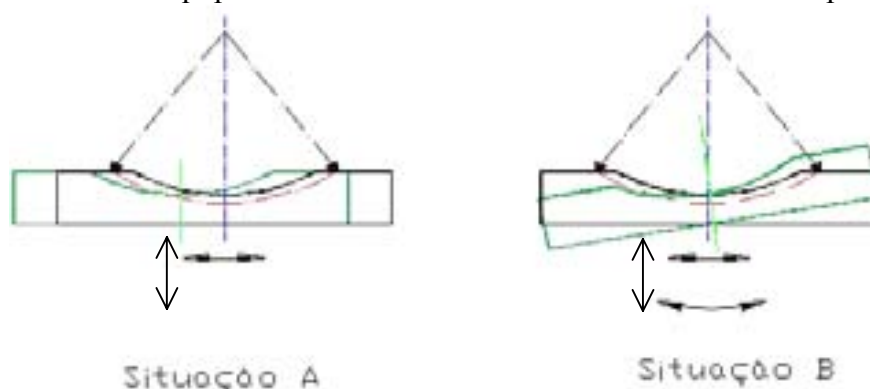


Figura 3. Ajustes de posição permitidos no porta-amostra, a) translação e b) rotação.

Foram empregados dois tipos de amostra, como mostrado na Fig. (4). O primeiro tipo é basicamente um paralelepípedo de seção quadrada de $8 \times 8 \text{ mm}^2$. O segundo possuía dimensões similares, contendo, todavia, um raio de curvatura igual ao descrito pelo penetrador (400 mm). Desta forma, no primeiro caso tem-se a possibilidade de realizar ensaios, cuja profundidade de riscamento varia continuamente na medida em que o penetrador evolui no material testado. No segundo caso, a profundidade de riscamento permanece constante durante todo o ensaio. A Fig. (5) apresenta de forma esquemática esses dois tipos de ensaios.

O aquecimento das amostras foi realizado através de resistências elétricas posicionadas lateralmente às amostras. A temperatura foi mantida no valor selecionado com uma precisão de $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ através de uma fonte com controle do tipo proporcional/integral/derivativo (PID). Os ensaios foram realizados com diferentes profundidades de riscamento e nas temperaturas de 25, 150, 200, 250 e $300 \text{ }^\circ\text{C}$. A medição da temperatura da amostra foi realizada através da inserção de um termopar do tipo K no orifício indicado na Fig. (4b).

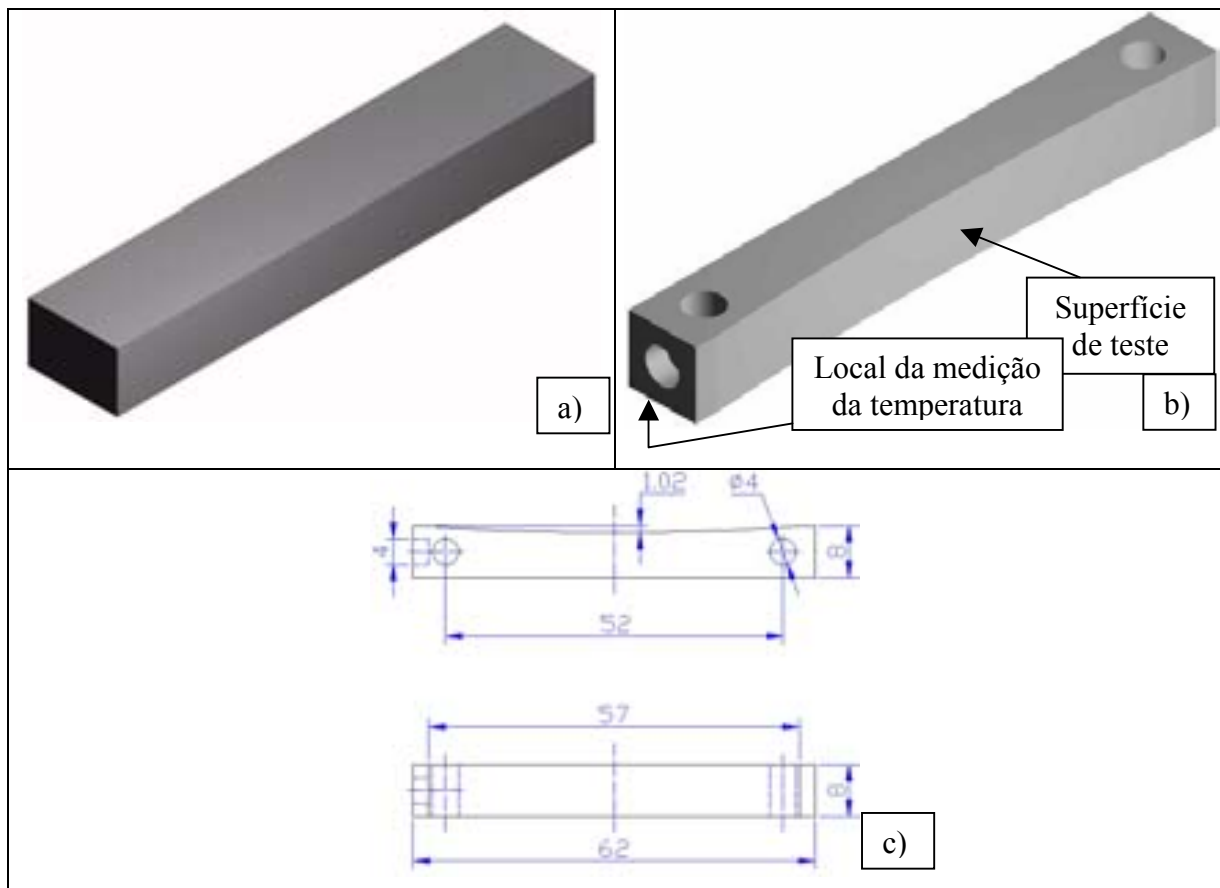


Figura 4. Geometria das amostras utilizadas, a) superfície plana, b) superfície curva e c) dimensões da amostra com superfície curva.

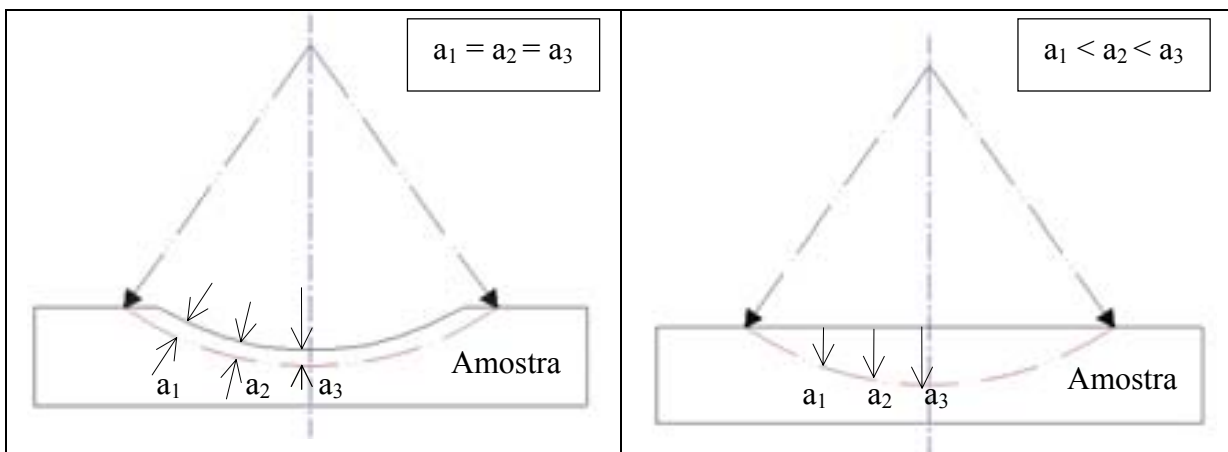


Figura 5. Representação esquemática dos processos de riscamento com, a) profundidade constante e b) profundidade variável.

Com o objetivo de avaliar os possíveis efeitos da oxidação na massa da amostra foram simulados ciclos térmicos equivalentes aos experimentados pela amostra durante os ensaios a 300°C. Nenhuma alteração de massa foi detectada, sendo os efeitos da oxidação nos ensaios desprezados.

Os corpos de prova foram confeccionados com amostras de alumínio comercialmente puro no estado recozido (50HV20) e não recozido (55HV20). A usinagem dos corpos de prova foi realizada em uma fresadora CNC. Como elemento riscante foi empregado um penetrador piramidal de base quadrada de WC-Co com ângulo de ataque de 45°. Para evitar possíveis alterações de geometria do penetrador durante os ensaios foi realizado um truncamento da extremidade, de tal forma a se ter um quadrado de 0,5X0,5 mm². A perda de massa nos ensaios foi determinada através do método

gravimétrico interrompido mediante limpeza ultrasonora das amostras. A resolução da balança empregada era de 10^{-4} g. A superfície dos riscos e a morfologia dos cavacos foram analisadas em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Zeiss, modelo LEO 940 A. A caracterização dos riscos foi realizada através de um interferômetro laser UBM, Microfocus Expert IV.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de energia específica de riscamento em função da perda de massa do teste são apresentados na Fig. (6). Nota-se que a energia específica aumenta com a redução da perda de massa decorrente do processo de riscamento para as duas amostras, para qualquer temperatura. Esse resultado é atribuído ao efeito de escala do evento, segundo Backer *et al.*, (1952) e Briggman *et al.*, (1985). No geral, esse aumento da energia específica com a redução da perda de massa é mais acentuado nas amostras com superfícies curvas. Além disso, a curva correspondente à amostra com superfícies planas se encontram abaixo da linha das superfícies curvas.

Essas diferenças de comportamento das duas curvas podem ser atribuídas à variação da seção ao longo do risco na amostra plana. Nessa amostra, tem-se uma profundidade de riscamento que varia continuamente, desde zero, no início do processo, até um valor máximo (localizado no centro do risco). A seguir, a profundidade é reduzida de forma progressiva até zero novamente. Como a energia específica é função das dimensões do evento, ou, no caso, da profundidade de riscamento, tem-se durante o processo de riscamento uma variação deste parâmetro, desde um valor máximo, localizado nas extremidades do risco, até um valor mínimo no centro do mesmo. Assim, a energia

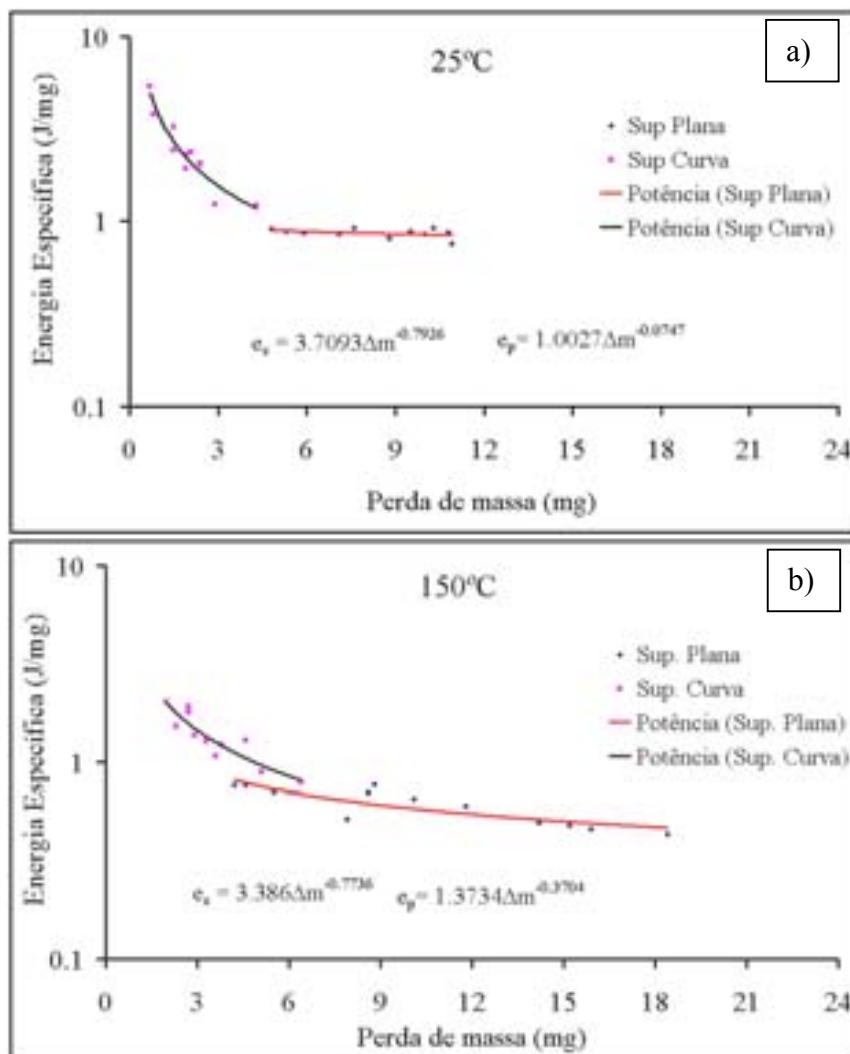


Figura 6. Continua

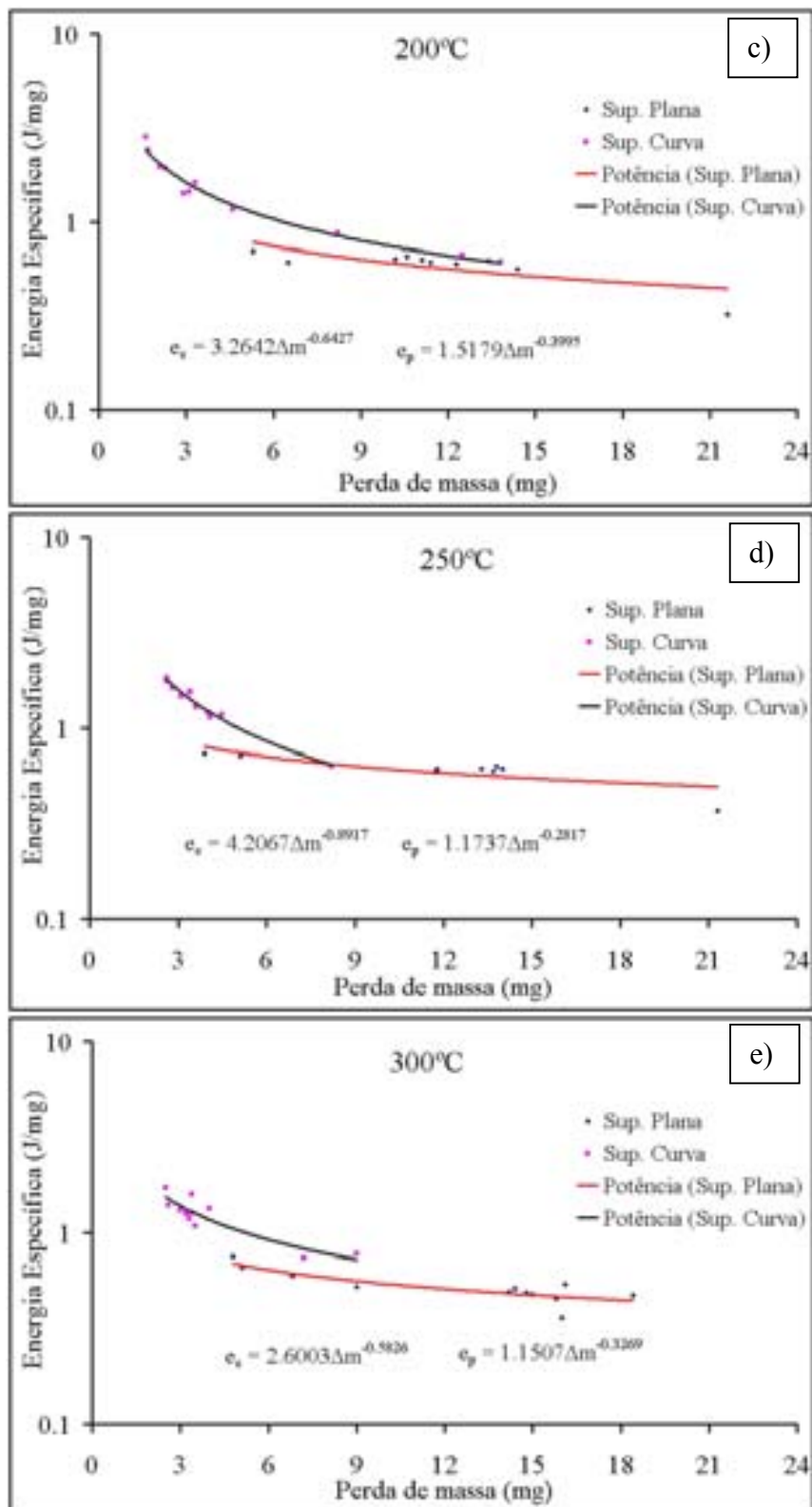


Figura 6. Energia específica em função da perda de massa nos ensaios de esclerometria pendular a quente com amostras planas e curvas, a) 25 °C, b) 150 °C, c) 200 °C, d) 250 °C e e) 300 °C.

específica é constituída de uma média dos diferentes valores. Esse processo de obtenção acaba levando, portanto, a um retardamento na detecção do efeito de escala, ou um deslocamento para a esquerda do crescimento rápido da energia em função da variação de massa.

O deslocamento da curva de energia específica para baixo na amostra com superfície plana pode ser associado, também, à mudança de profundidade durante o riscamento. Na amostra plana tem-se uma grande parte do volume do material sendo removido na região central do sulco, ou seja, na

região menor de energia específica. Para se ter a mesma perda de massa na amostra curva é necessário que a profundidade do risco seja reduzida, levando assim, valores de energia específica maiores na amostra com superfície curva.

Os resultados de energia específica a quente são inferiores aos obtidos à temperatura ambiente nas amostras planas e curvas. Esse efeito é mais visível, quando a temperatura se eleva de 25 °C para 150 °C nas amostras planas (ver Fig. (7)). Acredita-se, que isto esteja relacionado com a considerável redução das propriedades mecânicas do Alumínio na faixa de 25 °C a 150 °C. A 25 °C o limite de resistência à tração do Alumínio é de 90 MPa, e a 150°C é de 55 MPa, (ASM Handbook, 1990). Entre 150 °C e 300 °C, nota-se que as curvas de energia específica não apresentam grandes variações relativas. Isso se deve, muito provavelmente, ao fato de que nessa faixa de temperatura, a resistência mecânica é muito baixa. Além disso, de uma temperatura para outra há apenas uma pequena variação nas propriedades mecânicas.

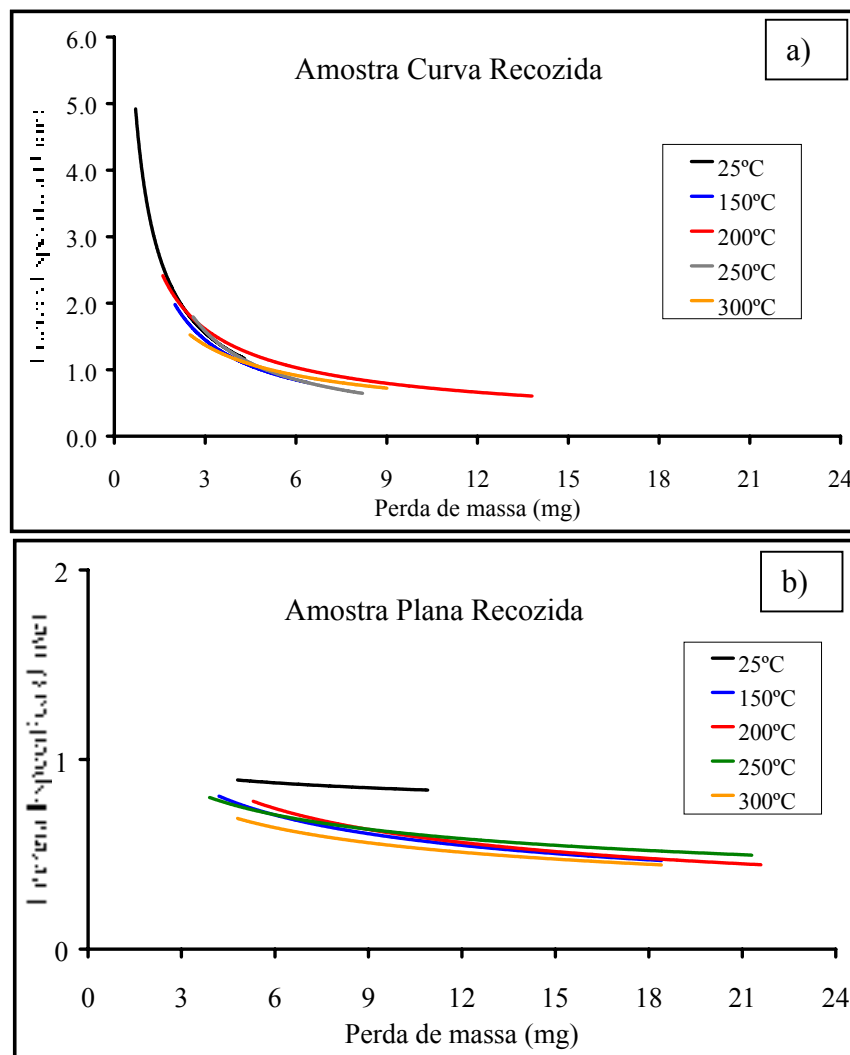


Figura 7. Efeito da temperatura de teste na energia específica do alumínio recozido, a) amostras curvas e b) planas.

Os coeficientes de correlação r dos resultados de energia específica com as respectivas regressões do tipo potência são resumidos através da Tabela (1). Nota-se aqui, que os coeficientes obtidos nas amostras com profundidade de riscamento constante são relativamente bons e muito superiores aos obtidos nas amostras com profundidade de riscamento variável (amostras planas). Isso se deve ao fato de que nas amostras planas o efeito de escala é em parte descaracterizado, pois a energia específica neste caso é constituída de uma média de diferentes valores.

O perfil do risco foi analisado ao longo do risco através de interferometria laser. Nota-se através da Tabela (2), que a profundidade de riscamento se mantém praticamente constante ao longo de

todo o risco. As diferenças de profundidade de riscamento da entrada em relação ao centro do risco, e deste em relação à saída, foram inferiores a 5%. Por conseguinte, nota-se também uma largura de risco praticamente constante ao longo do mesmo. Na Figura (8) são apresentados os perfis obtidos na região central do risco para amostras testadas em várias temperaturas. Mesmo à temperatura ambiente, tem-se uma significativa movimentação lateral de material. Com o aumento da temperatura não há um aumento significativo desse sulcamento. Todavia, é evidente em quase todas as amostras analisadas um truncamento de pelo menos um dos picos do sulcamento, como indicado pela seta da Figura (8b). Análises das superfícies riscadas evidenciaram as razões para tal constatação: devido à elevada plasticidade do material, mesmo à temperatura ambiente, durante o processo de riscamento, o cavaco desenvolve rebarbas laterais que reduzem a altura dos sulcamentos. Esse fenômeno pode ser observado nas Figuras (9), de Alumínio recozido e (10) de Alumínio não recozido.

Tabela 1. Coeficiente de correlação r entre a regressão de potência ($e = K \cdot \Delta m^q$) e os respectivos resultados experimentais.

Temperatura de teste °C	Amostra plana	Amostra curva
25	0,722	0,945
150	0,839	0,900
200	0,726	0,986
250	0,765	0,984
300	0,844	0,894

Tabela 2. Variação da profundidade de riscamento entre a entrada e o centro do risco, bem como deste em relação à saída. Amostra recozida testada a 25 °C, amostras curvas.

Risco	Início da Amostra	Centro da Amostra	Final da Amostra
Profundidade média (μm) [*]	94.72	90.63	89.56
Largura média (mm) [*]	0.92	0.89	0.89

* - Média de três medições.

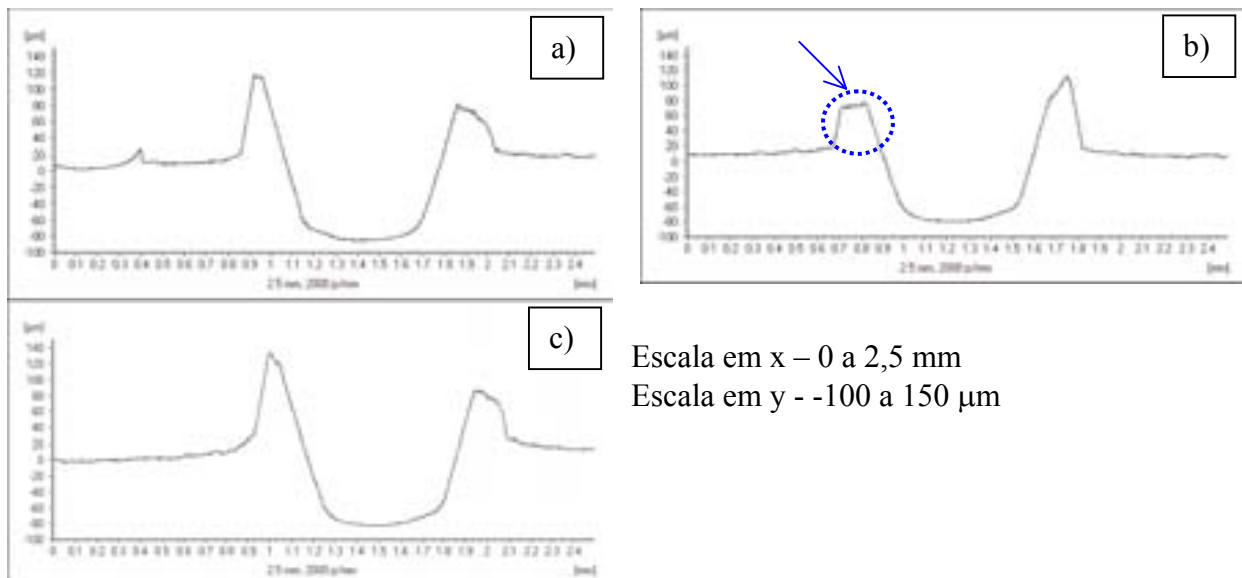


Figura 8. Caracterização dos perfis de topografia de superfície das amostras de Alumínio comercialmente puro recozido, determinados à temperatura ambiente no centro do risco. Amostra testada à a) 25 °C, b) 200 °C e c) 300 °C.

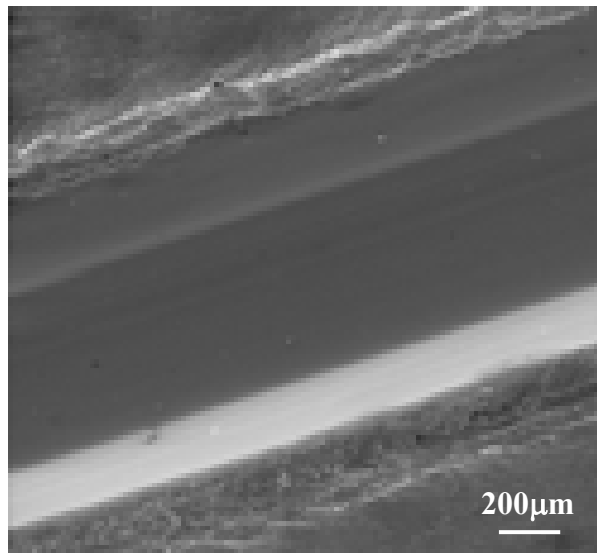


Figura 9. Superfície típica dos riscos produzidos em amostras curvas de Alumínio, recozidas. Amostra testada à temperatura ambiente.

Os cavacos obtidos nas amostras não recozidas são apresentados na Figura (10d). À temperatura ambiente e a 150 °C tem-se cavaco do tipo contínuo. A 300 °C tem-se um cavaco de empilhamento. Já nas amostras recozidas, em todas as temperaturas e profundidades testadas foram observados cavacos de empilhamento.

Essa mudança de tipo de cavaco das amostras não recozidas para as recozidas pode ser explicada através das alterações de propriedades mecânicas introduzidas com o recozimento: aumento da plasticidade.

A Figura 11 apresenta maiores detalhes dos cavacos obtidos neste trabalho. Nota-se, que nos cavacos contínuos são formadas lamelas finamente espaçadas. Os cavacos do tipo empilhado, observados nas amostras recozidas e nas amostras não recozidas e testadas a 300 °C, apresentam também características lamelares, porém os sinais de escorregamento entre essas lamelas são bem menos evidentes.

4. CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- a) a variação da profundidade de riscamento nas amostras planas conduz a uma energia específica média, que é inferior à obtida em amostras com superfícies curvas, ou seja, com profundidade de riscamento constante. Como consequência disso, o efeito de escala é evidenciado com maior facilidade nessas amostras;
- b) os resultados obtidos com as amostras de superfície curva correlacionam-se melhor com funções de potência, quando comparado com os obtidos com superfície plana, em todas as temperaturas testadas;
- c) a temperatura conduz a uma redução da energia específica, pois facilita a plasticidade;
- d) nas amostras recozidas, os cavacos foram todos do tipo empilhado, enquanto que em amostras não recozidas a forma contínua pode ser notada nas menores temperaturas de teste.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão da bolsa de iniciação científica a Maracini, R.F., e ao técnico Reginaldo Ferreira de Souza pela usinagem dos corpos de prova.

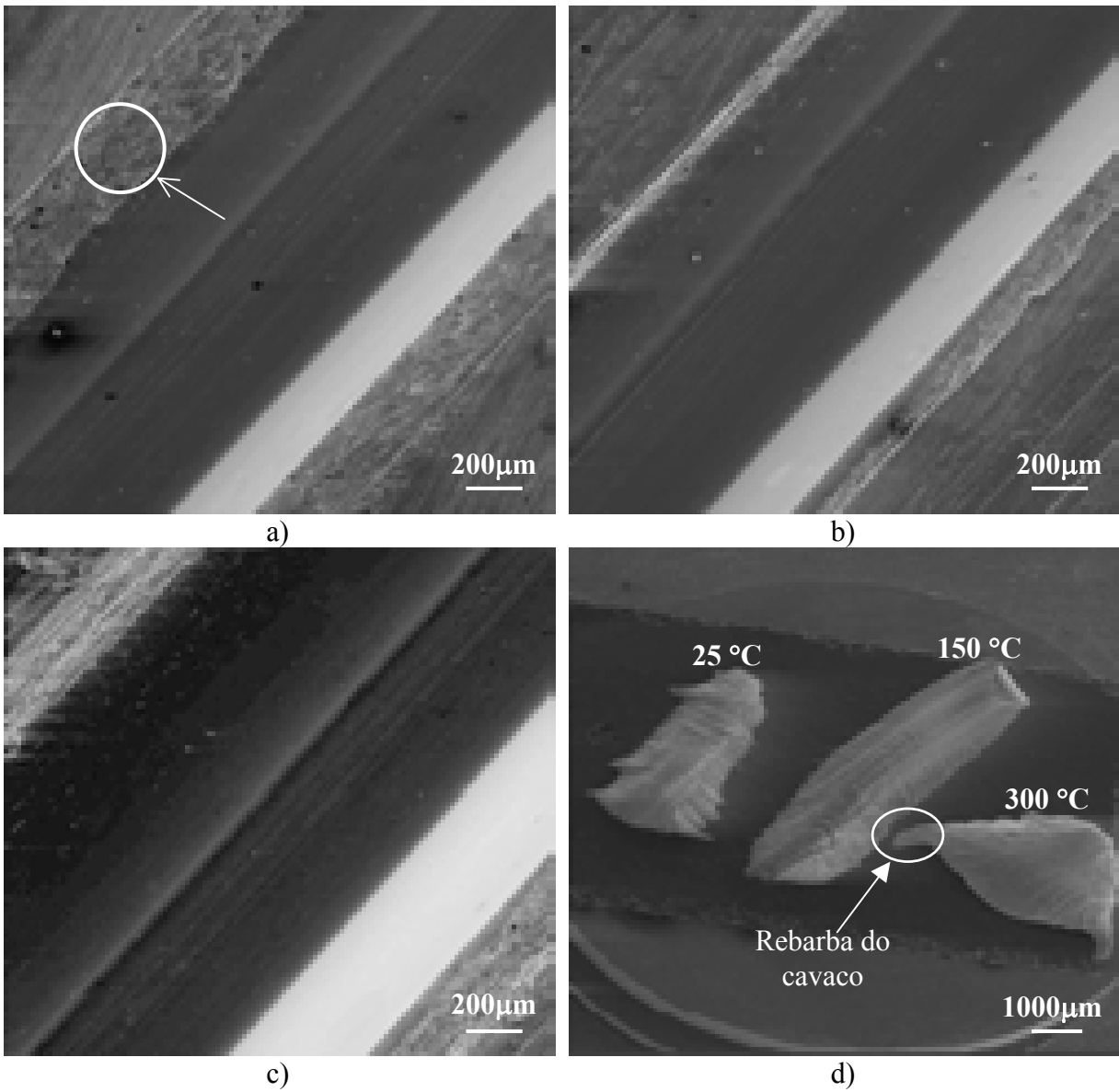


Figura 10. Superfícies das amostras planas de Alumínio não recozido após a realização dos ensaios. a) risco produzido a 25 °C, b) 200 °C ,c) 300 °C e d) cavacos produzidos nestes ensaios, MEV.

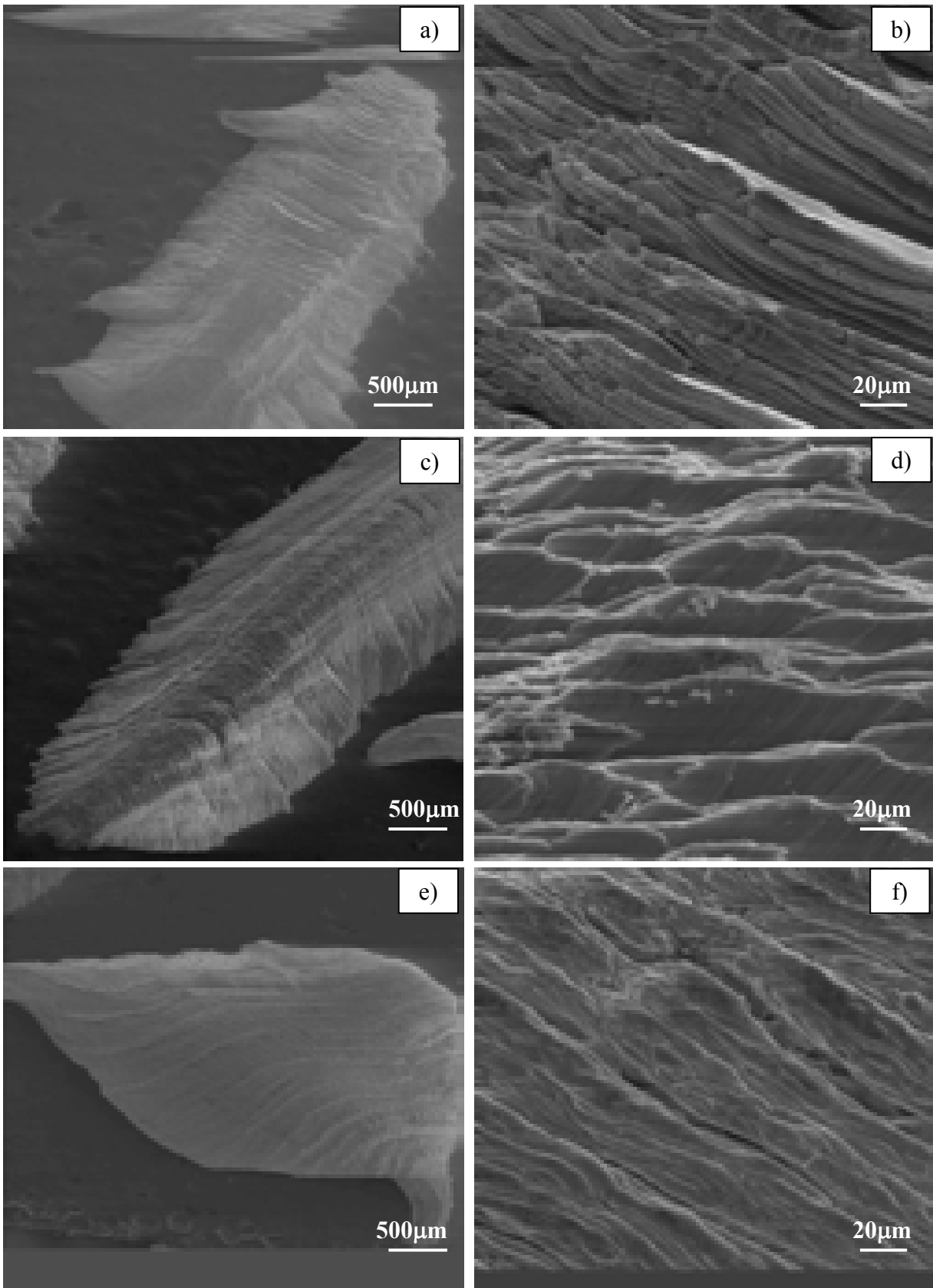


Figura 11. Detalhes dos cavacos do Alumínio não recozido, a) 25 °C, b) 200 °C e c) 300 °C.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASM Handbook, 1990, "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special – Purpose Materials", vol. 2.
- Backer, W.R., Marshall, E.R. and Shaw, M.C., 1952, "The Size Effect in Metal Cutting", Trans. ASME 74, pp. 61-72.
- Bryggman, V. Hogmark, S. and Vingsbo, O., 1979, "Evaluation of Abrasion by Means of controlled Grooving", *Proc. of the IV Int. Abrasion Colloquium*, Grenoble, pp. 5.1-5.14.
- Bryggman, V. Hogmark, S. and Vingsbo, O., 1985, "Mechanisms of Gouging Abrasive Wear of Steel Investigated with the Aid of Pendulum Single Pass Grooving", Proceedings of the International Conference on Wear of Materials, Canadá, pp. 324-331.
- Franco, S.D., 1989, "Contribuição ao estudo do desgaste abrasivo de materiais polifásicos", *M.Sc. Thesis*, Uberlândia.
- Franco, S.D., 1996, "Wechselwirkung zwischen Matrix und Hartphasen beim Warmverschleiß", *Dr.-Ing. Thesis*, Ruhr-Universität Bochum.
- Liang, Y.N., Li, S.Z., Li, D.F. and Li, S., 1996, "Some Development for Single-Pass pendulum Scratching", *Wear* 199, pp. 66-73.
- Liu, J., 1996, "Modellversuche zur Drehbearbeitung metallischer Werkstoffe", *Dr.-Ing. Thesis*, Ruhr-Universität Bochum.
- Ramos Neto, F.F., de Souza, R.J. e Franco, S.D., 2001 "Nova Geometria de Corpos de Prova para a Esclerometria Pendular", *Máquinas e Metais*, São Paulo, n. 428, pp. 158-167.
- Sims, C.T., Stoloff, N.S. and Hagel, W.C., 1987, "Superalloys, High Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power", Vol. II, Sohn Wiley and Sons, New York.
- Soderberg, S., Briggman, V. and Canales, A., 1985, "Influence of Precipitation and Solution Strengthening on Abrasive Wear Resistance", Proceedings of the International Conference on Wear of Materials, Canadá, pp. 645-653.
- Vélez, J.M., Tanaka, D.K., Sinatora, A. and Tschiptschin, A.P., 2001, "Evaluation of Abrasive Wear of Ductile Cast Iron in a Single Pass pendulum Device", *Wear* 251, pp.1315-1319.

INFLUENCE OF THE TEST TEMPERATURE ON THE SPECIFIC SCRATCHING ENERGY OF PURE ALUMINIUM USING THE SINGLE-PASS PENDULUM

Renato Formoso Maracini

Federal University of Uberlândia / Faculty of Mechanical Engineering, *Sta. Mônica, s/n, 38.400-902, Uberlândia-MG*, renatofm@triang.com.br

Alisson Rocha Machado

Federal University of Uberlândia / Faculty of Mechanical Engineering, *Sta. Mônica, s/n, 38.400-902, Uberlândia-MG*, alisson@mecanica.ufu.br

Sinéio Domingues Franco

Federal University of Uberlândia / Faculty of Mechanical Engineering, *Sta. Mônica, s/n, 38.400-902, Uberlândia-MG*, e-mail: ltm-sdfranco@ufu.br

Abstract. *The single-pass pendulum is an important device to evaluate the abrasive wear resistance of different materials. It consists of a sharp indenter mounted at the extremity of a pendulum. The energy dissipated during the scratching action is used to calculate the relative scratch resistance. The aim of the present study was to evaluate the effect of the testing temperature on the specific scratching energy of pure Aluminium. The tests were carried out using flat and curved samples, which result in variable and constant scratching depths of indenter penetration, respectively. The chips and the scratches were analyzed with a scanning electron microscopy. The results showed that the size effect is more evident in samples scratched with a constant indenter penetration depth. Increasing the test temperature, it was observed a reduction of the specific energy. The annealed samples showed no change in the chip form and they were of the piled up type. In as-supplied samples a transition from continuous to piled up chip morphology were observed with increasing temperature.*

Keywords. *Single-Pass Pendulum, Abrasive Wear, Chip Morphology, High Temperature, Aluminium.*