

USINABILIDADE DE LIGA ALUMÍNIO-SILÍCIO EM TORNEAMENTO

Aristides Magri

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica
arimagri@fem.unicamp.br

Daniel Iwao Suyama

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Faculdade de Ciências Aplicadas
disuyama@unicamp.br

Amauri Hassui

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica
ahassui@fem.unicamp.br

Fabio Gatamorta

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, Faculdade de Engenharia
gatamort@unicamp.br

Resumo: As ligas de alumínio, juntamente com aços e ferros fundidos, são os principais metais utilizados em aplicações de engenharia. São caracterizadas pelo baixo peso específico, possibilidade de obtenção de amplas propriedades físicas e mecânicas e aplicações nas quais a estética deve ser levada em consideração. Podem ser classificadas como um material de boa usinabilidade, à exceção das ligas de Alumínio-Silício que promovem desgaste acelerado das ferramentas de metal duro. Este trabalho tem por objetivo avaliar a usinabilidade de ligas Al-Si (com teores de silício abaixo e acima de 10%) submetidas a operação de torneamento, sob o ponto de vista de vida de ferramenta e acabamento superficial. Os resultados indicam que a presença do elemento silício possivelmente apresenta um limite que, se ultrapassado, provoca uma grande redução na vida útil da ferramenta de metal duro. Não entanto, se não provocar alterações no formato da ponta da ferramenta, não afeta significativamente o acabamento superficial.

Palavras-chave: Acabamento Superficial; Desgaste de Ferramentas; Alumínio; Silício; Usinagem

1. INTRODUÇÃO

O alumínio é o segundo elemento metálico mais abundante no planeta e suas mais de 300 ligas traduzem a versatilidade deste material (ROOY, 1990). As propriedades que tornam este material economicamente atrativo a uma grande variedade de aplicações são a aparência (possibilidade de usos com viés estético), baixo peso, facilidade de fabricação, propriedades físicas e mecânicas e resistência à corrosão.

O alumínio tem como principais propriedades mecânicas e características de interesse para o uso em engenharia (NASCIMENTO, 2016):

- Resistência à corrosão: o que o torna muito utilizado em fábricas de produtos químicos para tratamento de ácido nítrico concentrado, indústrias de embalagens, fabricação de painéis e utensílios e são usadas também para fins marítimos e de construção;
- Baixa densidade: motivo pelo qual é utilizado consideravelmente na forma de ligas para componentes aeroespaciais e automotivos e para estruturas de todos os tipos. Para a aplicação em estruturas, a extrema leveza das ligas permite um volume muito maior a ser utilizado para um determinado peso, aumentando a rigidez da mesma. Para componentes onde serão submetidos a altas velocidades, como por exemplo, pistões, o uso de ligas de alumínio leva a um melhor balanceamento, menor atrito, baixas cargas de rolamento e resulta em uma economia considerável de energia requerida para vencer a inércia de partes móveis;
- A condutividade elétrica é cerca de 60% a do cobre, mas peso por peso é um melhor condutor que o cobre e é usado para cabos em geral;
- Elevada condutividade térmica, utilizados para a fabricação de trocadores de calor. Para o caso dos pistões, a alta condutividade térmica permite a utilização de maiores taxas de compressão.

O alumínio e suas ligas fazem parte um grupo dos materiais metálicos mais versáteis, econômicos e atrativos, os quais podem ser aplicados em uma série de segmentos, seu emprego como aplicação de estruturas metálicas, só é inferior a dos aços.

Um dos motivos de sua excelente resistência à corrosão é o seu baixo potencial químico frente aos outros elementos e também pelo fato do alumínio formar uma película apassivadora de óxido de alumínio (ROSATO, 2003).

Segundo Garret, Lin e Dean (2005) têm ocorrido um aumento constante dentro da indústria automobilística da utilização de componentes fabricados em ligas de alumínio em comparação aos aços comumente empregados nessas aplicações, além de também ser possível a aplicação de tratamentos térmicos.

A redução de peso na construção automotiva atualmente tem sido uma exigência com o objetivo de um incremento na eficiência do motor e consequentemente uma redução na emissão de poluentes. Isso tem conduzido a um aumento ainda maior nos interesses pelas chapas fabricadas em ligas de alumínio para a aplicação em carcaças de automóveis (ENGLER e HIRSCH, 2002). Segundo a ABAL (2022), nos Estados Unidos, estudos indicam que o consumo médio de alumínio nos veículos norte-americanos saltará de 156 kg (em 2012) para 250 kg em 2025, representando 16% do total de matérias-primas aplicadas na produção. A indústria automotiva europeia também deverá elevar o uso de alumínio dos atuais 140 kg/veículo para 180 kg/veículo até 2020.

As ligas são classificadas, basicamente, em 7 séries de acordo com a *Aluminum Association* (2022):

- 1xxx - Alumínio comercialmente puro (99% de Al ou superior);
- 2xxx - Ligas com o Cobre como principal elemento de liga;
- 3xxx - Ligas com o Manganês como principal elemento de liga;
- 4xxx - Ligas com o Silício como principal elemento de liga;
- 5xxx - Ligas com o Magnésio como principal elemento de liga;
- 6xxx - Ligas a base de Silício e Magnésio;
- 7xxx - Ligas com o Zinco como principal elemento de liga.

Dentre os principais elementos e impurezas presentes nas ligas de alumínio, este trabalho dá ênfase ao Silício. Após o Ferro (Fe), é o elemento que mais se apresenta como impureza no alumínio comercialmente puro (entre 0,01 e 0,15%). O Silício pode ser adicionado para baixar o ponto de fusão das ligas da série 4xxx, sem afetar a fragilidade, para aplicações em filamentos para soldagem e brasagem, além do uso em aplicações estruturais e automotivas. Já na série 6xxx, o Silício atua juntamente com o Magnésio para formar ligas tratáveis termicamente e com grande resistência à corrosão (ALUMINUM ASSOCIATION, 2022).

Do ponto de vista da usinagem, quando comparado com os demais materiais de engenharia, o alumínio e suas ligas podem ser considerados fáceis de usar devido às propriedades mecânicas relativamente baixas. Devido à condutividade térmica, o calor gerado na usinagem é rapidamente dissipado, velocidades de corte mais elevadas podem ser utilizadas e o desgaste da ferramenta normalmente não é problema (DINIZ, 2013). Para o acabamento superficial, uma combinação adequada de velocidades de corte e profundidade de usinagem pode ter mais influência do que o avanço (parâmetro tradicionalmente reconhecido) (BINDHUSHREE, ARUNADEVI e PRAKASH, 2021).

A presença dos elementos de liga e impurezas causa efeitos significativos na usinabilidade: constituintes não abrasivos são benéficos à usinagem e constituintes insolúveis e abrasivos são maléficos. Constituintes que são insolúveis, porém macios e não abrasivos são benéficos ao favorecer a quebra dos cavacos.

As ligas que possuem elevados teores de Silício, no entanto, são consideradas de baixa usinabilidade. Quando o teor de Si é acima de 10%, as partículas duras e abrasivas causam um rápido desgaste da ferramenta e quando o teor está acima de 5%, o aspecto não será brilhoso como o de outras ligas, mas terá um aspecto levemente acinzentado (ROOY, 1990). Por conta disso, o uso de ferramentas de diamante policristalino (PCD) ou mesmo metal duro recoberto com PCD são boas escolhas para cortes contínuos (LIANG, VOHRA e THOMPSON, 2008).

Assim, a usinagem das ligas de Al-Si ainda se apresenta como um desafio, ainda mais com a crescente aplicação das séries 4xxx e 6xxx na indústria automobilística. Este trabalho tem por objetivo avaliar a usinabilidade de 2 ligas de alumínio: SAE356 e SAE413, analisando desgaste e acabamento superficial.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os corpos de prova foram feitos de alumínio com diferentes participações de Silício em sua composição: SAE356 (7% de Si) e SAE413 (11,5% de Si).

Possuíam formato cilíndrico com diâmetro de 25 mm e comprimento total de 115 mm. Uma vez que a relação L/D é maior que 3,0, os corpos de prova foram fixados entre placa e contra-ponto.

O torno CNC utilizado foi o ROMI, modelo Galaxy 20, com 15 kW de potência no eixo-árvore e capacidade de 4500 RPM, da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

Foi realizado torneamento retilíneo longitudinal com os parâmetros de usinagem apresentados na Tab. 1:

Tabela 1. Condições de usinagem.	
Parâmetro	
Velocidade de corte (v_c) [m/min]	250
Profundidade de usinagem (a_p) [mm]	0,5
Avanço (f) [mm/volta]	0,1

As ferramentas utilizadas tinham código CCGT09T308-FN2 WNN10 (ISO N10) com características e dimensões apresentadas na Fig. 1.

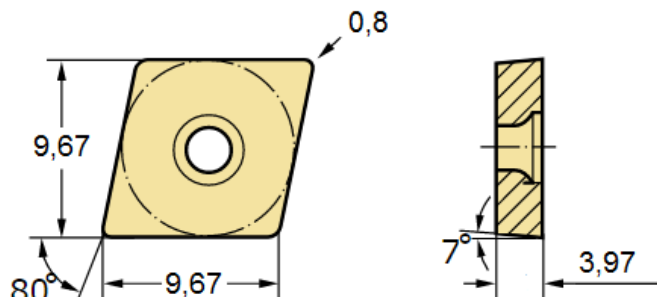


Figura 1. Inserto positivo utilizado no torneamento.

Os inserts foram montados em suporte SCLCR2525M09.

A usinagem era interrompida a cada 3 passes e era retomada até que o desgaste de flanco VB_{Bmax} alcançasse 0,2 mm. Em cada interrupção, eram mensurados desgaste de flanco, rugosidade média (R_a) e a altura máxima do perfil (R_z) em 3 pontos aproximadamente separados em 120°.

Cada condição de usinagem foi repetida ao menos 1 vez e os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para verificação estatística.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Realizadas os testes, a Fig. 2 apresenta a evolução do desgaste de flanco ao longo do tempo.

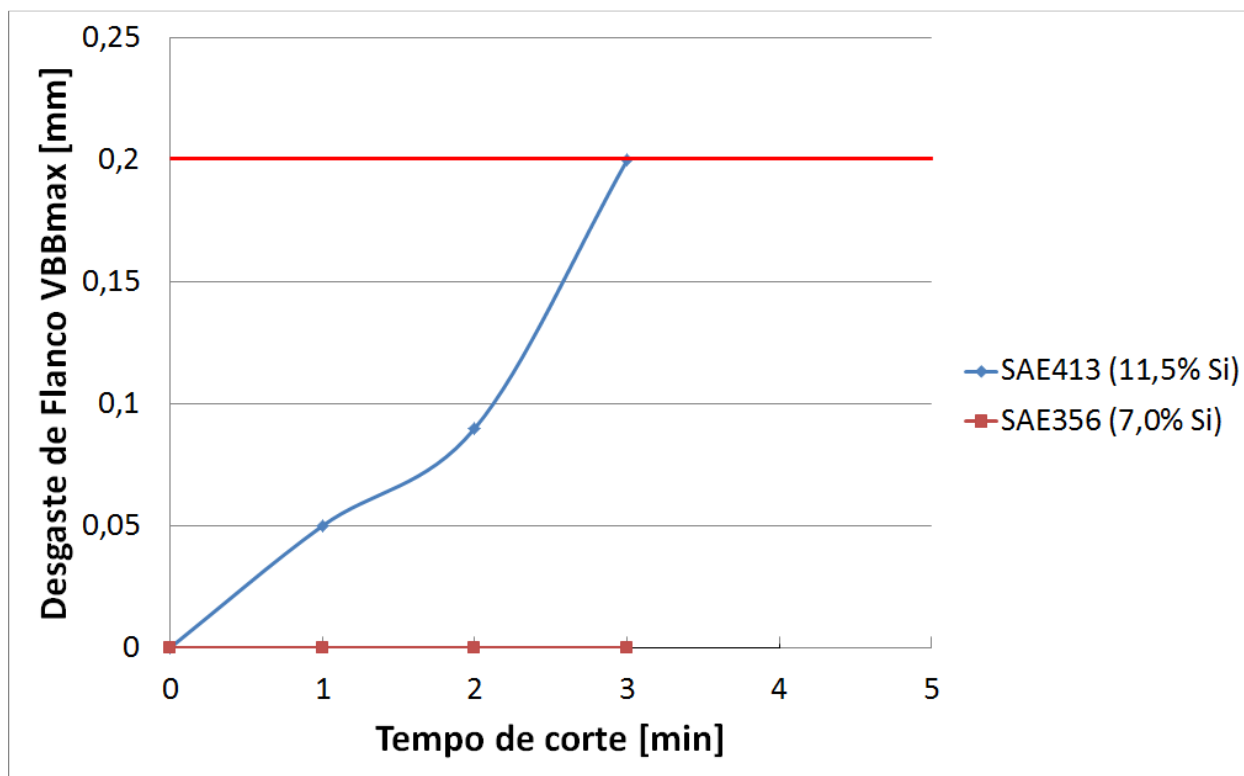


Figura 2. Desgaste de flanco ao longo da vida da ferramenta.

Com base na Fig. 2, é possível observar que a presença de Silício acima de 10% na liga promove desgaste acelerado e reduz drasticamente a vida da ferramenta, possivelmente por conta das partículas abrasivas presentes em sua microestrutura. Considerando as dimensões dos corpos de prova e os parâmetros de usinagem, a vida da ferramenta na

usinagem da liga SAE413 foi de aproximadamente 3 minutos, enquanto que na SAE356 (com teor de Silício abaixo de 10%) não houve desgaste de flanco possível de ser observado em microscópio óptico durante o tempo de corte equivalente.

A Fig. 3 apresenta o comportamento da rugosidade média (Ra) após 1 minuto de corte.

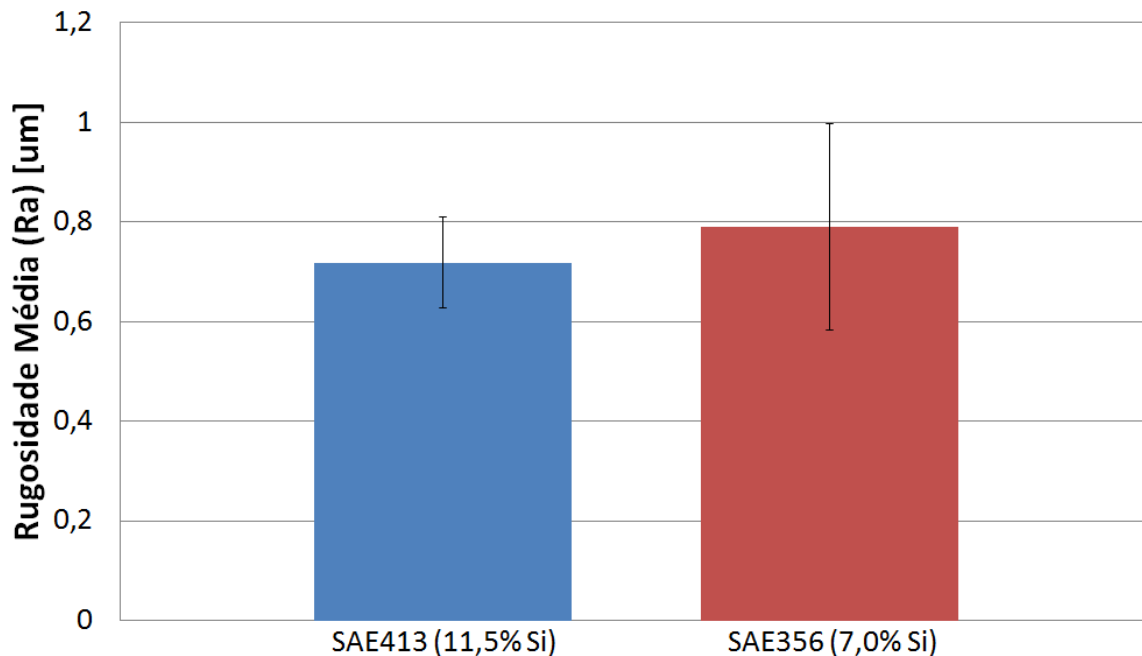


Figura 3. Rugosidade media em início de vida.

Observa-se que a rugosidade média no SAE356 é, em média, ligeiramente maior do que na liga SAE413. Isso se deve ao fato de que a presença do Silício, apesar de promover desgaste abrasivo na ferramenta, deixa o material menos dúctil e a superfície menos sujeita a deformações plásticas e amassamentos (*ploughing*).

A Tab 2 apresenta a análise de variância para a rugosidade média em início de vida (após 1 minuto de corte, aproximadamente).

Tabela 2. ANOVA para Rugosidade média.

Fonte de Variação	SS	df	MS	F	p-valor	F crit
Entre grupos	0,0151	1	0,0151	0,5885	0,4607	4,9646
Dentro dos grupos	0,2570	10	0,0257			
Total	0,2721	11				

Considerando-se um intervalo de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$), é possível afirmar que as médias não podem ser consideradas significativamente diferentes uma vez que o p-valor obtido foi maior do que 0,05. Isso indica que a diferença do teor de Silício nas ligas (principal fator considerado) não afetou a rugosidade média.

O mesmo comportamento é observado na altura máxima de perfil (Rz), apresentado na Fig. 4.

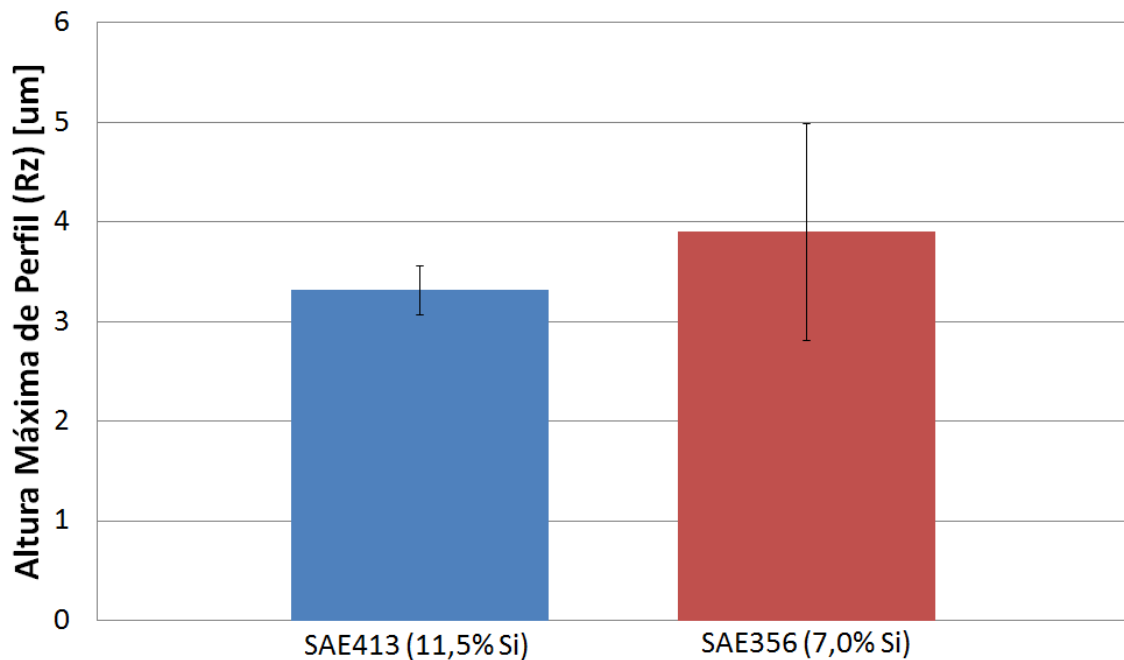


Figura 3. Altura Máxima de Perfil em início de vida.

O comportamento é similar ao da rugosidade média. Novamente, considerando-se somente as médias, a altura máxima de perfil (Rz) é ligeiramente superior na liga SAE356, possivelmente ligado ao menor teor de Silício na composição. A Tab. 3 apresenta a análise de variância para os resultados obtidos.

Tabela 2. ANOVA para Rugosidade média.

Fonte de Variação	SS	df	MS	F	p-valor	F crit
Entre grupos	1,0384	1	1,0384	1,6749	0,2247	4,9646
Dentro dos grupos	6,2000	10	0,6200			
Total	7,2384	11				

Novamente, uma vez que o valor obtido para o p-valor é superior a 0,05, não pode-se afirmar que os valores de Rz obtidos são significativamente diferentes.

Se for considerada a rugosidade máxima teórica, na qual apenas a relação entre a geometria da ferramenta e o avanço, os valores obtidos se encontram entre 2 a 2,5 vezes maior do que os teóricos.

Ainda que a ferramenta na usinagem da liga SAE413 apresentasse ligeiro desgaste (0,05 mm, em média), em ambos os casos (tanto na rugosidade média, quanto na altura máxima de perfil) o desgaste de flanco, mesmo que incipiente, não provocou alteração na ponta da ferramenta ou na dinâmica do corte.

4. CONCLUSÕES

A partir dos testes de torneamento externo das ligas SAE356 (com 7% de Silício) e SAE413 (com 11,5% de Silício) é possível concluir que:

- Ligas de Alumínio com elevado teor de Silício (acima de 10%) promovem desgaste elevado e fim de vida prematuro da ferramenta;
- Desgaste da ferramenta não é um problema na usinagem de Alumínio com teores abaixo de 10% de Silício e permitiria a usinagem com velocidades de corte mais elevadas;
- Em início de vida da ferramenta, não é possível afirmar que as características de diferentes ligas de Alumínio influenciam no acabamento superficial.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à empresa Walter Tools, na pessoa do Eng. Dr. Sander Gabaldo, pela doação das ferramentas utilizadas neste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, <<https://abal.org.br/aplicacoes/automotivo-e-transportes/automoveis/>>. Acesso em: 04/01/2022.
- ALUMINUM ASSOCIATION, < https://www.aluminum.org/sites/default/files/2021-09/AA-Infographic-Alloys-v5_0.jpg>. Acesso em: 04/01/2022.
- BINDHUSHREE, B.S.; ARUNADEVI, M.; PRAKASH, C.P.S. **Experimental investigation of process parameters for turning aluminum using ANOVA**. Materials Today: Proceedings, v. 46, p. 5060-5066, 2021.
- DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2013.
- ENGLER, O.; HIRSCH J. **Texture control by thermomechanical processing of AA6XXX Al-Mg-Si sheet alloys for automotive applications** – a review. Materials Science and Engineering, v. A336, p. 249-262, 2002.
- GARRET, R. P.; LIN J.; DEAN T. A. **An investigation of the effects of solution heat treatment on mechanical properties for AA 6XXX alloys: experimentation and modelling**. International Journal of Plasticity, v. 21, p. 1640-1657, 2005.
- LIANG, Q.; VOHRA, Y.K.; THOMPSON, R. **High speed continuous and interrupted dry turning of A390 Aluminum/Silicon Alloy using nanostructured diamond coated WC-6 wt.% cobalt tool inserts by MPCVD**. Diamond & Related Materials, v. 17, p. 2041-2047, 2008.
- NASCIMENTO, M. R. **AValiação da Integridade Superficial da Liga Al 2011F**. 2016. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.
- ROOY, E. L. Introduction to Aluminum and Aluminum Alloys. In: ZWILSKY, K. M. **ASM Metals Handbook: Properties and Selection - Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**. v. . 9. ed. [S.l.]: ASM International, 1990. p. 17-38.
- ROSATO, A. J. **Estrutura Integral por Soldagem por Atrito, Friction Stir Welding – FSW** – Requisitos Básicos Para o Projeto Estrutural. 2003. Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

MACHINABILITY OF ALUMINUM SILICON ALLOYS IN TURNING

Aristides Magri

University of Campinas - UNICAMP, Faculty of Mechanical Engineering
arimagri@fem.unicamp.br

Daniel Iwao Suyama

University of Campinas - UNICAMP, Faculty of Applied Sciences
disuyama@fem.unicamp.br

Amauri Hassui

University of Campinas - UNICAMP, Faculty of Mechanical Engineering
ahassui@fem.unicamp.br

Fabio Gatamorta

University of Campinas - UNICAMP, Faculty of Mechanical Engineering
gatamort@unicamp.br

Abstract. *The Aluminum alloys, along with steels and cast irons, are the main metals used in engineering applications. They are characterized by low specific weight, possibility of obtaining wide physical and mechanical properties and applications in which aesthetics must be taken into account. They can be classified as a material with good machinability, with the exception of Aluminum-Silicon alloys, which promote accelerated wear of carbide tools. The objective of this work is to evaluate the machinability of Al-Fe and Al-Si alloys (with silicon content above 10%) subjected to turning operations, from the point of view of tool life and surface finish. The results indicate that the presence of silicon (in the indicated content) causes a great reduction in the service life of the carbide tool and does not significantly affect the surface finish.*

Keywords: *surface finish; tool wear; aluminum; silicon; machining.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.