

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO ENTRE A LIGA DE AL 6262-T6 E METAL DURO MICROGRÃO REVESTIDO DE (Ti,Al)N PARA CÁLCULO DA ESPESSURA CRÍTICA EM MICROFRESAMENTO

Bolívar Hernán Landeta Alvarado, bolivarhla@gmail.com¹

Andrés Guillermo Guasca González, agguasca@gmail.com²

Marcelo Araújo Câmara, marcelocamara@demec.ufmg.br³

^{1, 2 e 3} Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Presidente Antônio Carlos, 6627

Resumo. No microfresamento, o coeficiente de atrito (entre o material da ferramenta e o material a usinar) conjuntamente ao raio da aresta de corte determinam a espessura crítica do material não removido. Neste trabalho, metal duro microgrão com revestimento de (Ti,Al)N para a ferramenta e liga de alumínio 6262-T6 para a peça a usinar foram avaliados. Com esses materiais, pretende-se simular no tribômetro os comportamentos de desgaste tanto da ferramenta, representada por um pino de desgaste, quanto da peça de trabalho, neste caso, um disco desta liga de alumínio. Desta forma, foi obtida a medição do coeficiente de atrito sob diferentes forças normais (4N, 5N e 7N) com a mesma velocidade de deslocamento (11 m/min). Com o coeficiente de atrito e o raio da aresta de corte da ferramenta (medido no microscópio eletrônico de varredura), se pode calcular a espessura crítica de corte e o avanço por aresta de corte; para garantir que a remoção de material usinado seja por cisalhamento, evitando seu sulcamento. Os resultados obtidos apresentaram valores do coeficiente de atrito com uma variação pouco expressiva ao trabalhar nas diferentes forças normais, contudo, o maior tamanho dos debrís acontece com a maior carga usada. Esses debrís revelam a severidade do desgaste, enquanto que os sulcos mostram que seu tipo é por adesão.

Palavras-chave: coeficiente de atrito, alumínio, metal duro microgrão.

1. Introdução

No microfresamento, um dos parâmetros importantes é o coeficiente de atrito entre o material da ferramenta e o material a usinar. Com o coeficiente e o raio da aresta de corte da ferramenta, pode-se calcular a profundidade crítica de corte e o avanço por arista de corte. Neste caso, pretende-se encontrar esses dados, que representam os parâmetros necessários para o devido microfresamento de alumínio 6262-T6 com uma ferramenta de metal duro microgrão. Pretende-se ainda desenvolver uma avaliação da precisão dimensional e do acabamento superficial com diferentes trajetórias da ferramenta.

Contudo, o cálculo do coeficiente de atrito está relacionado às forças de corte. Na Tabela 1, estas são mostradas na direção normal e do avanço para uma ferramenta de carboneto de diâmetro 1,6 mm na usinagem de alumínio.

Tabela 1. Forças de corte e parâmetros de usinagem (adaptado de Bao et al. (2000))

Força máxima na direção do avanço (N)	Força máxima na direção Normal (N)	RPM	Vc (m/min)	Avanço (mm/min)	Avanço (mm/arista)	Largura de corte (mm)	Profundidade (mm)
15	23	32.000	159,6	812,8	0,0127	0,508	0,79375
		32.000	159,6	1219,2	0,01905	0,508	0,79375
		50.000	249,4	1270	0,0127	0,508	0,79375
		50.000	249,4	1905	0,01905	0,508	0,79375

Na Tabela 2, são apresentados os resultados da medição das forças na direção do avanço em microfresamento com uma ferramenta de metal duro – microgrão de diâmetro 0,5 mm revestido com (Ti,N)Al e Alumínio 6262T6.

Tabela 2. Força na direção do avanço e parâmetros de usinagem (adaptado de Câmara, 2014)

Força máxima na direção do avanço (N)	RPM	Vc (m/min)	Avanço (mm/min)	Avanço ($\mu\text{m}/\text{aresta}$)	Profundidade (μm)
1,2	40.000	62,8	20	0,250	30
2,1	40.000	62,8	40	0,500	30
1,3	40.000	62,8	20	0,250	50
3,7	40.000	62,8	40	0,500	50

Com as forças encontradas na Tabela 2, determinaram-se os valores do coeficiente de atrito entre os dois materiais de interesse:

Tabela 3. Coeficiente de atrito entre liga Alumínio 6262-T6 e metal duro microgrão revestido com (Ti,N)Al (adaptado de Câmara, 2014)

Força Normal (N)	Vc (m/min)	Coeficiente de atrito μ
2	62,8	$0,57 \pm 0,11$
5	62,8	$0,62 \pm 0,14$

2. MATERIAS E MÉTODOS

Para determinar o coeficiente de atrito, primeiramente, deve-se fazer a preparação do corpo de prova e do pino de desgaste, segundo a norma ASTM G99-05 (2010) e as condições de ensaio. Isso permite o correto desenvolvimento do tribômetro, com o intuito de simular, da melhor forma, as condições reais de corte na usinagem de uma liga de alumínio 6262-T6 com uma ferramenta de metal duro microgrão de diâmetro 1,0 mm.

2.1 Preparação do corpo do prova

De uma barra redonda de alumínio 6262-T6 de diâmetro 78,5 mm, assim, foi obtida uma seção de aproximadamente 15 mm de espessura (Vide Figura 1). Depois, suas duas superfícies circulares foram usinadas com um fresa CNC ROMI modelo Discovery 560, o que deixou essas superfícies nas tolerâncias adequadas ($\pm 0,1$ mm) de planaridade entre elas. Posteriormente, antes de medir a rugosidade das superfícies usinadas com um rugosímetro SURTRONIC 25, realizou-se a respectiva regulagem desse equipamento, por meio de um padrão com rugosidade média ($R_a=0,6 \mu\text{m}$). O padrão e o rugosímetro estão ilustrados nas Figuras 2a e 2b respectivamente.

**Figura 1. Corpo de prova de liga de Alumínio 6262-T6****Figura 2. a) Padrão de calibração, b) Medição da rugosidade**

2.2 Medição do coeficiente de atrito

As montagens do pino de desgaste no tribômetro e do corpo de prova sobre o disco de MICROTTESTS foram realizadas conforme as recomendações desses equipamentos. As forças normais consideradas para os testes foram 4N, 5N e 7N; três testes foram realizados, um para cada uma das forças. Em todos eles, usou-se aproximadamente a mesma

velocidade de deslizamento de 11 m/min, mudando as velocidades de rotação, conforme o valor de cada um dos três diâmetros utilizados (uma para cada força) na superfície circular do corpo de prova. As montagens e o andamento dos testes apresentam-se nas Figuras 3a e 3b respectivamente.

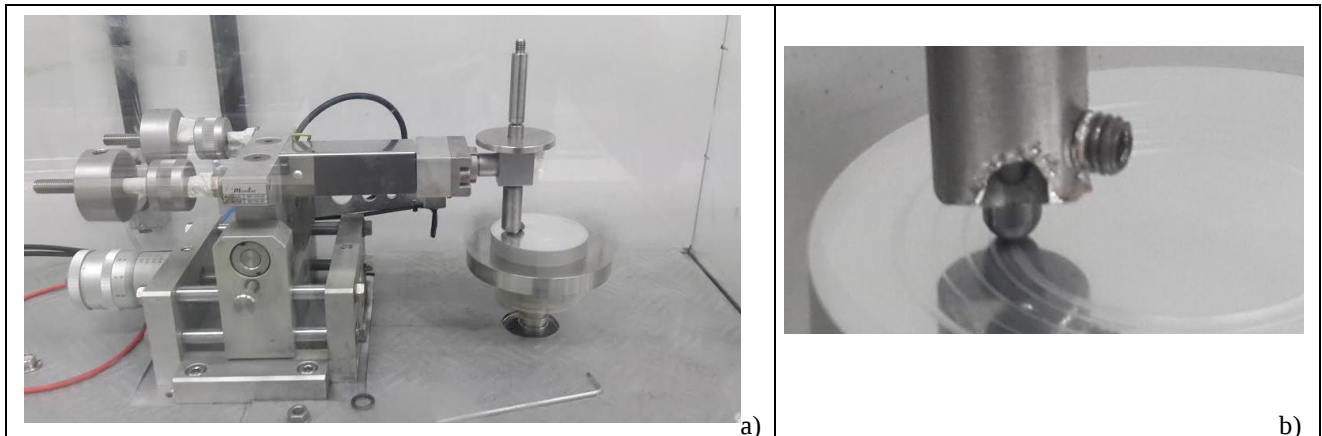


Figura 3. a) Montagem no tribômetro de pino sobre disco MICROTTEST, b) Pino de metal duro microgrão sobre disco de liga de Alumínio 6262-T6

3. RESULTADOS E ANÁLISES

A seguir, obtêm-se os resultados da rugosidade do corpo de prova e os resultados dos testes obtidos com o tribômetro de MICROTTEST.

3.1 Rugosidade do corpo do prova

O resultado da regulação do tribômetro foi de $5,94 \mu\text{m}$, valor aproximado ao $R_a = 6 \mu\text{m}$ do padrão de referência. Com essa semelhança, procedeu-se a medir as rugosidades no corpo de prova. Na seguinte tabela, mostram-se os resultados dessas medições da rugosidade de uma das superfícies circulares. Nela posteriormente foi usado o contato com o pino de desgaste no tribômetro.

Tabela 4. Resultados das medições de rugosidade R_a

	$R_a (\mu\text{m})$
n = 10	0,24
	0,22
	0,14
	0,36
	0,20
	0,20
	0,18
	0,18
	0,42
	0,18
Valor médio	0,23
Desvio Padrão	S = 0,09
Repetitividade	Re = 0,21
Média da Repetitividade	$\bar{Re}$ = 0,06

A rugosidade da superfície ($R_a = (0,23 \pm 0,06) \mu\text{m}$) cumpre a exigência da norma ASTM G99-05 (2010). Por sua vez, essa norma estabelece que o valor de R_a deve ser inferior a $0,8 \mu\text{m}$.

3.2 Coeficiente de atrito

Na Tabela 5, são discriminados os valores da força normal, da velocidade de deslizamento, do diâmetro de desgaste (diâmetro médio produzido pelo giro do corpo de prova em contato com o pino de desgaste), da velocidade de rotação

do corpo de prova, da distância do deslizamento e do filtro usado no software do tribômetro para obtenção da média (AVG) do coeficiente de atrito, também realizada pelo mesmo software.

Tabela 5. Resultados das medições do coeficiente de atrito

Força Normal (N)	Vc (m/min)	Diâmetro de desgaste (mm)	RPM	Distância de deslizamento (m)	Filtro	Coeficiente de atrito médio μ
4	11	50	69	63	40	$0,595 \pm 0,265$
5	11	43	81	74	40	$0,609 \pm 0,049$
7	11	35	100	68	40	$0,588 \pm 0,228$

As figuras 4, 5 e 6 evidenciam o coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento, essas imagens são fornecidas pelo software do tribômetro.

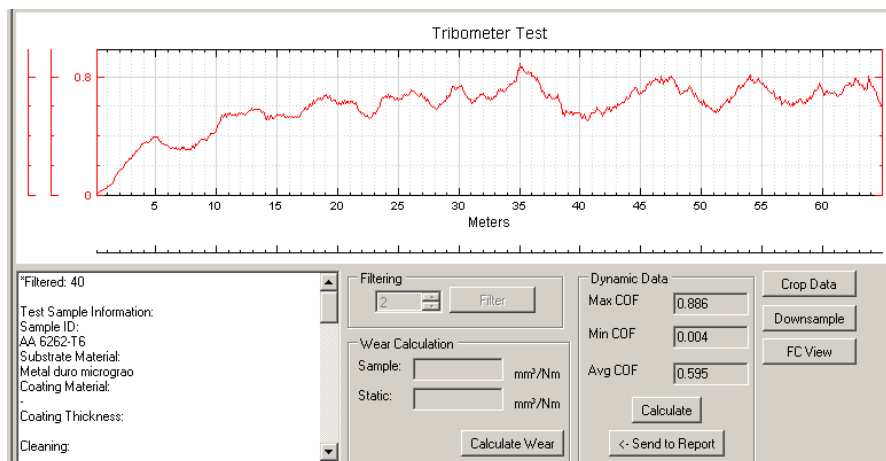


Figura 4. Coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento para a carga normal de 4N

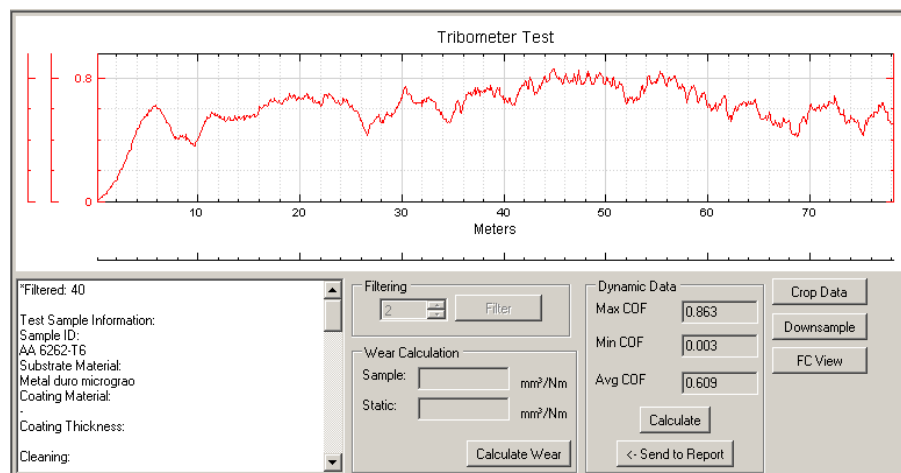


Figura 5. Coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento para carga normal de 5N

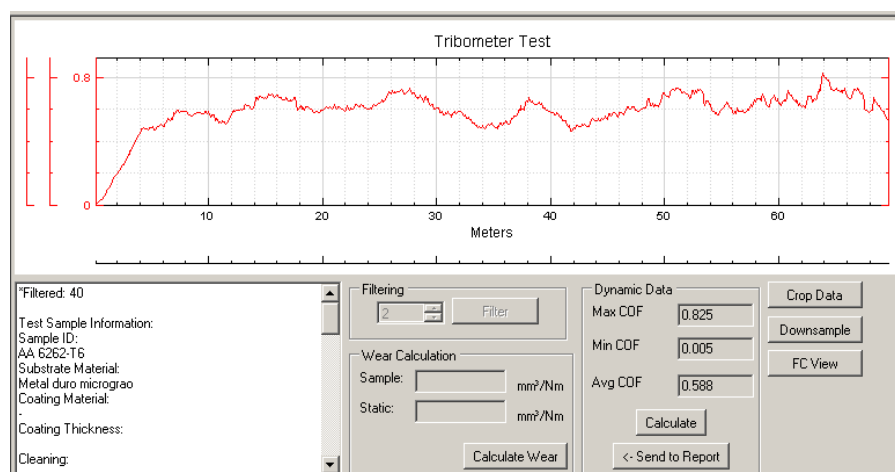


Figura 6. Coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento para carga normal de 7N

As incertezas de medição dos coeficientes do atrito médio da Tabela 5 foram calculadas pela média quadrática dos erros obtidos pelo método dos mínimos quadrados. Dessa forma, para cada uma das cargas normais, da tabela de valores gerada pelo software, os dados da distância de deslizamento e seus respectivos valores de coeficiente de atrito foram parcelados em 5 partes (de 10 até 60 m, com parcelas de 10 m).

Na figura 7, podem-se observar as variações da força tangencial conforme a distancia de deslizamento aumenta. Nela, nota-se que o comportamento é similar para as outras cargas normais. Na faixa dos primeiros metros, o aumento da força de atrito é muito significativo, depois, seu valor diminui até se aproximar aos 60 m de deslizamento, onde começa uma taxa de diminuição maior até o final do deslizamento.

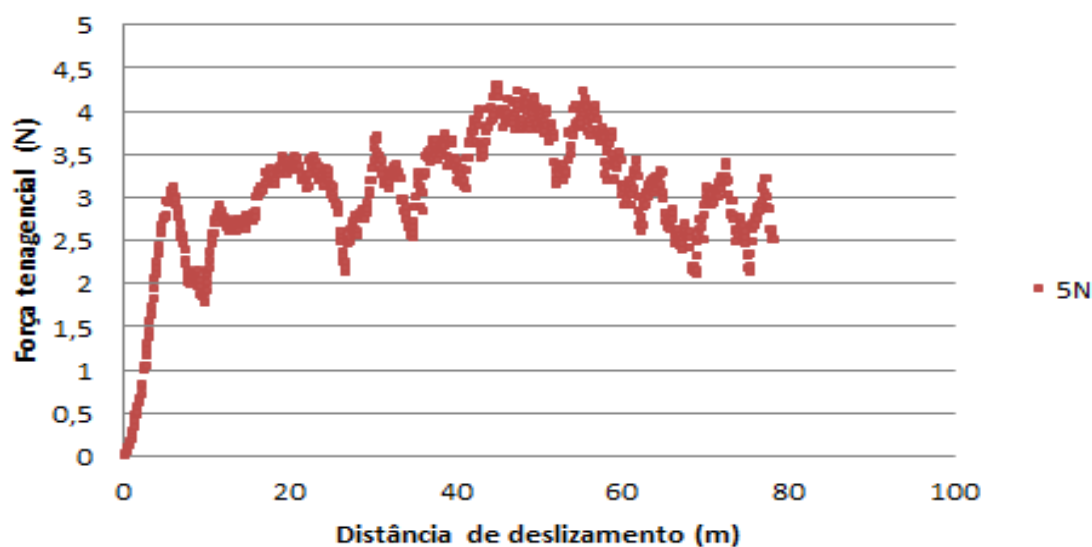


Figura 7 Força de atrito vs Distância de deslizamento para a carga normal de 5N

Na figura 8, por sua vez, indica-se com vermelho a área de contato do pino de metal duro microgrão com material aderido do corpo de prova, após os testes de atrito.

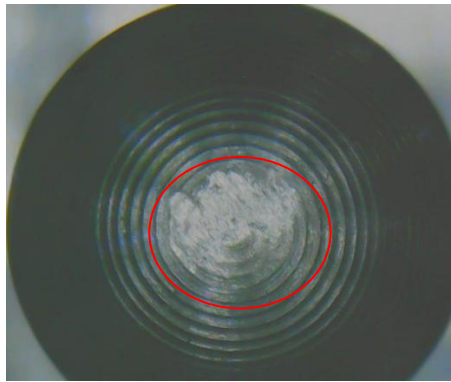


Figura 8. Pino de desgaste de metal duro microgrão depois dos testes

As figuras 9, 10 e 11 ilustram os sulcos realizados pelo pino de desgaste no corpo de prova, nas diferentes cargas normais aplicadas. Pode-se observar o largo do sulco e comparar o tamanho dos debris para cada carga, particularmente, o aumento das dimensões deles com a carga de 7N.

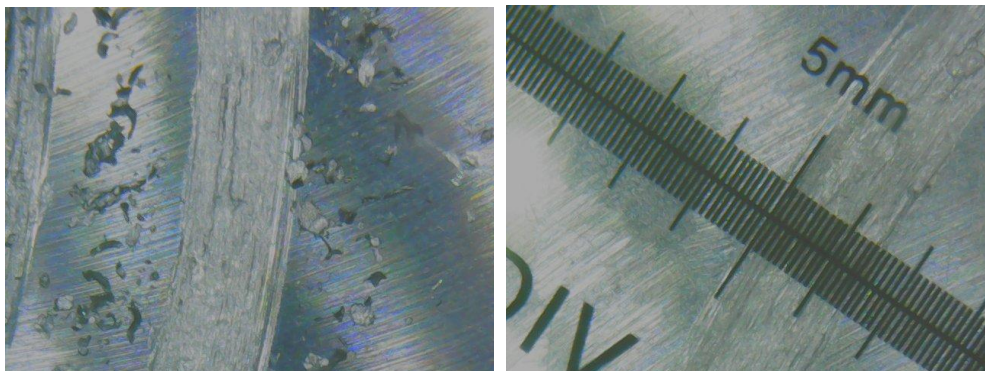


Figura 9. Desgaste no corpo da prova com a carga normal de 4N

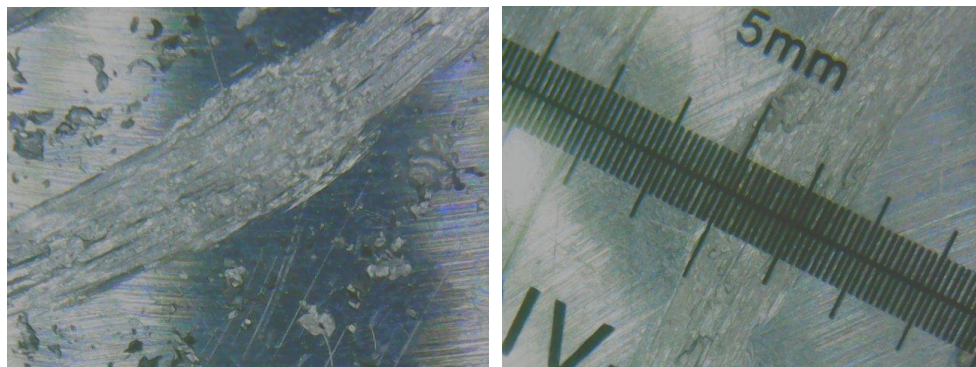


Figura 10. Desgaste no corpo da prova com a carga normal de 5N

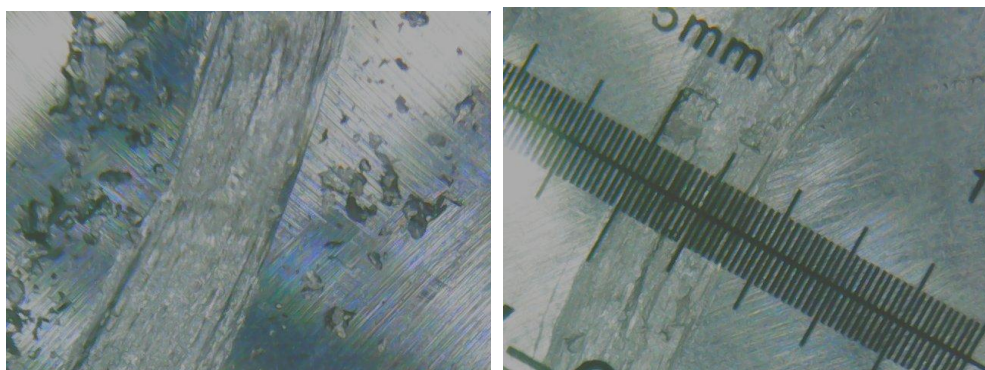


Figura 11. Desgaste no corpo da prova com a carga normal de 7N

Do que foi analisado nos testes e levando em consideração outros trabalhos e teorias de tribologia, pode-se observar que poucos minutos depois da usinagem dos metais, a superfície “limpa” exposta ao ar gera uma camada de óxido de 1-10 nm. Teoricamente, essa camada diminuiria o coeficiente de atrito. No caso do alumínio, a ruptura da camada de óxido acrescenta o coeficiente de atrito de 0,8 a 1,2. Por outro lado, devido à ductilidade do material base do corpo de prova (Alumínio) e a presença de uma débil camada interfacial, o crescimento da junção (teoria de atrito) não se pode desenvolver em forma completa (Hutchings, 1992).

O comportamento inicial da força tangencial em função da distância de deslizamento (vide Figura 7) é similar ao comportamento inicial das curvas de fricção (força *versus* tempo) (Blau, 2009) para o caso de pares de metais não lubrificados, com o subsequente desenvolvimento da camada de debris. O comportamento posterior da Fig. 7, após 10 m, apresenta uma amplitude de estado estável de aproximadamente 45% do valor da força (5 N).

No relacionado ao tipo de desgaste, conforme explica Hutchings, 1992, esse pode ser considerado de tipo severo, pois, segundo esse autor, nesse tipo de desgaste, o tamanho dos debris está compreendido na faixa de 20 a 200 μm . No presente caso, a maioria dos debris ultrapassam esses valores e podem ser observados a simples vista. Ademais, ao analisar as Figuras 9, 10 e 11, os sulcos possuem uma forma de corte plástico com camadas sucessivas de contato de asperezas, similares aos apresentados por Bhushan, 2013.

4. CONCLUSÕES

O comportamento da força tangencial é proporcional à carga normal, e essa carga não apresenta uma relação significativa com as distâncias percorridas. Contudo, o tamanho dos debris estaria diretamente relacionado ao valor da carga, desta forma, o maior tamanho acontece com a maior carga usada, ou seja, 7N.

A largura do sulco praticamente permanece constante em relação à variação das cargas normais. Também, por observação direta, sugere-se que o sulco do material base com a maior carga tem maior profundidade. Contudo, isso deveria ser conferido corretamente com ajuda de um perfilômetro, o que corresponderia para futuras atividades, complementares ao presente trabalho.

Pelo tamanho dos debris (maiores que 200 μm), o tipo de desgaste é severo e, pela forma de corte plástico que os sulcos mostram, o desgaste é adesivo.

Ao considerar os resultados do coeficiente de atrito médio (vide Tabela 5), ele aumenta conforme a carga também aumenta (de 4 N a 5N). Porém, existe uma diminuição após outro aumento da carga (de 5 N a 7 N). Isso está relacionado, principalmente, ao aumento da oxidação do alumínio aderido ao pino de desgaste, assim como à deformação progressiva no sulco da peça de trabalho, que, por sua vez, diminuiria sua dureza.

5. REFERÊNCIAS

- Câmara, M. A. 2014, “Influência do efeito escala sobre a operação de microfresamento”, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, pp. 145.
- Bao, W. Y. e Tansel, I. N., 2000, “Modeling micro-end-milling operations. Part I: analytical cutting force model. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2000”, Vol. 40, pp. 115-118.
- Bhushan B., 2013, “Introduction to tribology”, 2a edição, Wiley, New Delhi, India, pp. 316-319.
- Blau P. J., 2009, “Friction science and technology from concepts to applications”, 2a edição, Boca Raton: CRC Press, EUA, pp. 323-325.
- Hutchings, I. M., 1992. “Tribology: friction and wear of engineering materials”, Londres: CRC Press, pp. 33, 88.
- MICROTEST, S.A. 2010. MICROTEST, S.A. Disponível em: < <http://www.microtest-sa.com/>>. Acesso em: 06 nov. 2015.

6. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DETERMINATION OF FRICTION COEFFICIENT BETWEEN AL ALLOY 6262-T6 AND MICROGRAIN CARBIDE COATED (Ti,Al)N TO CRITICAL THICKNESS CALCULATION IN MICRO MILL

Bolívar Hernán Landeta Alvarado, bolivarhla@gmail.com¹
 Andrés Guillermo Guasca González, agguasca@gmail.com²
 Marcelo Araújo Câmara, marcelocamara@demec.ufmg.br³

^{1, 2 e 3} Universidad Federal de Minas Gerais, Av. Presidente Antônio Carlos, 6627

Abstract. *In micro mill, the friction coefficient (between the tool material and the material to be machined) and the cutting edge radius determine the critical thickness of non-removed material. In this work, carbide micro grain with (Ti, Al)N coating for the tool and 6262-T6 aluminum alloy for the part to be machined were evaluated. With those materials, it is intended to simulate on a tribometer wear behaviors of both: the tool represented as a wear pin; and the work piece, in this case an aluminum disc. It was considered a surface evaluation of the aluminum disc for different trajectories of wear pin. Thus, it was gotten a measure of friction coefficient with three different normal forces (4N, 5N and 7N) using the same displacement speed (0.18 m/s). With the friction coefficient and radius of the tool cutting edge (measured in the scanning electron microscope), it can be calculated the critical thickness of cutting and feed rate per cutting edge; to ensure the removal of machined material is shear, avoiding its plowing. The obtained results showed friction coefficient values with a little significant variation working at different normal forces, however, the debris size comes with the higher load used. Those debris reveal wear severity, while grooves show its type is by adhesion.*

Keywords: *friction coefficient, aluminum, carbide micro grain*