

EFEITO DO ENCRUAMENTO SUPERFICIAL DE UMA LIGA Al-Mg NO TORNEAMENTO DE ULTRAPRECISÃO

Danver Messias Bruno

Renato Goulart Jasinevicius

Alessandro Roger Rodrigues

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Av. Trabalhador São Carlense, 400, São Carlos-SP

danverbruno@usp.br, renatogj@sc.usp.br, roger@sc.usp.br

Marcel Henrique Militão Dib

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Rua Doutor Aldo Benedito Pierri, 250, Araraquara-SP

marceldib@ifsp.edu.br

Resumo: Este artigo investiga o efeito do encruamento da peça e das condições de corte no acabamento e na microdureza superficial da peça, bem como nas forças e energia específica de corte de uma liga Al-Mg após o torneamento de ultraprecisão. O avanço foi variado em 5, 10, 15, 20 e 25 $\mu\text{m}/\text{rev}$, mantendo a profundidade de usinagem constante em 10 μm . A profundidade de usinagem foi variada em 20 e 30 μm , mantendo o avanço constante em 10 $\mu\text{m}/\text{rev}$. A rotação foi mantida constante em 1000 rpm, bem como o fluido de corte. O nível de encruamento das peças foi obtido pela redução da espessura das amostras em 50, 70 e 90% via processo de laminação a frio. Os testes de torneamento foram realizados em um torno de ultraprecisão Rank Pneumo ASG 2500, utilizando ferramenta de diamante monocristalino com raio de ponta de 0,774 mm e ângulo de saída neutro. Os resultados indicaram que menores avanços da ferramenta reduziram a rugosidade e revelaram a microestrutura da liga, permitindo identificar os contornos de grão, porém produziram danos na superfície usinada como marcas de avanço irregulares com picos e vales não uniformes. O encruamento intermediário gerou o melhor acabamento da peça devido ao balanço entre amaciamento e endurecimento superficial da peça. Maiores avanços encruaram as faces das peças, mas a profundidade de usinagem não produziu efeito significativo. A dureza das amostras do grupo de controle ("como recebido") foi de 61,5 a 76,6 HV e testes de carga nas medidas de microdureza indicaram a faixa de 100 a 500 g para não ocorrência do efeito de escala. O aumento do encruamento da peça elevou a força passiva, mas não impactou a força de corte e nem a energia específica de corte, que foram influenciadas estatisticamente pelo avanço da ferramenta.

Palavras-chave: Liga Al-Mg; Ferramenta de diamante; Torneamento de ultraprecisão; Microdureza, Rugosidade.

1. INTRODUÇÃO

A usinagem de ultraprecisão é um processo mecânico de remoção de material, no qual uma ferramenta de corte promove a remoção de material da peça, e que pode atingir profundidades de usinagem na escala nano/micrométrica menores que 100 μm . Com essa alta precisão, os acabamentos das peças variam normalmente de 5 a 50 nm (Dornfeld *et al.*, 2006). As produções de geometrias de peças complexas podem ser obtidas com usinagem de alta precisão, tanto de forma como de acabamento nanométrico, e na maioria dos materiais de engenharia essas vantagens tornam-se mais interessantes, como, por exemplo, em aplicações nas áreas biomédica, eletrônica e óptica. A microusinagem refere-se a um processo de usinagem pelo qual as espessuras de corte são de ordem micrométrica e submicrométrica, e as taxas de material removido localmente são muito baixas, sendo particularmente adequada para a fabricação de microestruturas e micropeças. Se a quantidade de material removido for cada vez menor, ocorre a transição para a nanousinagem, que é um importante ramo da nanotecnologia (Corbett *et al.*, 2000).

Um aspecto importante na escala de corte nano/micrométrica é a força de usinagem durante o processo, pois depende das propriedades mecânicas do material da peça e do efeito de escala, que é o aumento hiperproporcional da energia específica de corte com a redução da espessura nominal de corte. Por meio desta força de usinagem ou de suas componentes, são possíveis identificar as energias consumidas durante o processo, que mostram a resistência do material ao corte, a exemplo da tração e da dureza que caracterizam as forças e as resistências durante a deformação plástica do material (Shaw, 2004).

As forças de usinagem podem indicar a dificuldade ou facilidade durante a usinagem de uma peça. Importante destacar que o ângulo de saída ótimo da ferramenta é fundamental para minimizar a força e garantir uma boa usinagem. Forças geradas com ângulos de saída negativos são mais altas do que aquelas geradas nos processos com ângulos de saída positivos, pois a espessura do cavaco aumenta (Sekmen *et al.*, 2005). A usinagem com mais qualidade é atingida com

forças baixas, pois o desgaste na ferramenta é menor, além do menor esforço da máquina-ferramenta e menor aquecimento na zona de corte (Palanisamy *et al.*, 2006).

Medições das componentes da força de usinagem em escala de corte nano/micrométrica são ainda um desafio, devido ao efeito de escala e à sua baixa magnitude, especialmente ao usinar materiais dúcteis, nos quais a elastoelasticidade maior na formação do cavaco maximiza os efeitos de atrito e recuperação elástica na interface cavaco-ferramenta e peça-ferramenta. Além disso, a força de usinagem nestas condições pode ser um indicativo da usinabilidade do material, que pode ter sua plasticidade previamente controlada visando aprimorar o desempenho durante o corte. Assim, peças muito dúcteis tendem a apresentar um baixo índice de usinabilidade. Ligas de alumínio estão nesta gama de materiais que aparentam facilidade na usinagem, mas nem sempre garantem bom desempenho na interação peça-ferramenta-cavaco.

Como é notório, as ligas de alumínio são amplamente empregadas no segmento industrial automotivo e aeroespacial devido à sua elevada resistência específica quando comparada a de outros materiais como o aço, por exemplo (Boronski *et al.*, 2017). Já as ligas de magnésio, devido à sua baixa densidade e módulo elástico, também são amplamente empregadas na indústria eletrônica, automotiva e aeronáutica, e tem despertado muita atenção nos últimos anos (Fronczek *et al.*, 2017). No entanto, as ligas de magnésio apresentam grau de usinabilidade baixo quando comparado ao de alguns aços tradicionais, limitando suas aplicações (Ghali, 2010). As ligas a base de alumínio e magnésio são aplicáveis na indústria naval, automotiva e alimentícia, cujas exigências são resistência mecânica intermediária e resistência à corrosão elevada (Liu *et al.*, 2007), porém estudos sobre seu comportamento na usinagem nano/micrométrica ainda carecem de mais aprofundamentos para melhoria da qualidade dos produtos fabricados.

Isto posto, este artigo quantifica o efeito do encruamento da liga Al-Mg com e sem tratamento térmico de alívio de tensões após o torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante, analisando-se a rugosidade e a microdureza superficial da peça, bem como as forças de corte e passiva, e a energia específica de corte como indicadores indiretos de usinabilidade.

2. METODOLOGIA

Um total de 6 amostras da liga Al-Mg -6061 (0,6% Si, 0,28% Cu, 1,0% Mg, 0,20% Cr) de diâmetro 20 mm foi cortada com 16 mm de altura cada. Após isso, cada par de amostras foi laminado a frio reduzindo a altura em 50%, 70% e 90% visando imprimir níveis distintos de encruamento na superfície dos corpos de prova para posterior torneamento de ultraprecisão. Uma amostra de cada par laminado foi submetida a um aquecimento de 300 °C por 40 minutos, cujo propósito foi aliviar tensões mecânicas decorrentes do processo de laminação (encruamento).

As 6 amostras foram submetidas ao processo de torneamento de ultraprecisão no torno Rank Pneumo ASG 2500, utilizando ferramenta de diamante monocristalino com raio de ponta de 0,774 mm e ângulo de saída neutro. As faces de cada corpo de prova foram setorizadas (anéis circulares) de modo a permitir variar o avanço da ferramenta em 5 níveis (5, 10, 15, 20 e 25 $\mu\text{m}/\text{rev}$), mantendo a profundidade de usinagem constante em 10 μm , e variar a profundidade de usinagem em 2 níveis (20 e 30 μm), mantendo o avanço constante em 10 $\mu\text{m}/\text{rev}$. As demais condições de corte foram mantidas constantes, como a rotação da peça em 1000 rpm e fluido lubrificante Alkalisol 900®. Durante a usinagem, as forças de corte e passiva foram medidas empregando o software LabView v.7.1®, o minidinamômetro Kistler de 3 componentes, modelo 9256C2, o amplificador Kistler 5019B e a placa de aquisição National Instruments NI-USB-6216, adotando frequência de aquisição de 35 kHz. Os sinais de força e a energia específica de corte foram pós-processados utilizando o software ForUpDown®. A Figura 1 ilustra a montagem experimental (à esquerda) e um esquema dos setores faceados (à direita).

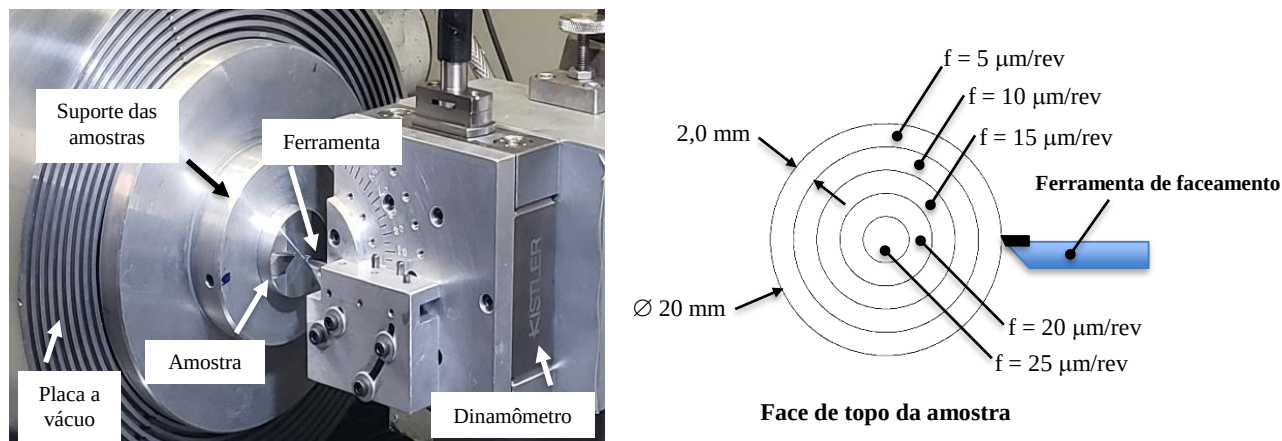


Figura 1. Setup experimental para faceamento setorizado das amostras de Al-Mg com ferramenta de diamante.

Após o faceamento das 6 amostras nas condições de corte supracitadas, as rugosidades médias (Ra e Rq) e máximas (Rz e Rt) foram medidas em cada setor faceado recorrendo-se ao perfilômetro ótico 3D, marca Veeco, modelo Vyko NT1100 e software Vision 4.20. As microdurezas superficiais também foram medidas em cada setor usinado, empregando o microdurômetro Leica Mikrosyteme GmbH - A1170, variando-se as cargas em 5, 10, 25, 50, 100, 200 e 500 g. O software Minitab® v.16 foi utilizado para efetuar Análise de Variância (ANOVA) em todas as variáveis de resposta (microdureza superficial e rugosidade das amostras, força de corte, força passiva e energia específica de corte), considerando um nível de significância de 5% e 3 réplicas de cada fator de controle.

3. RESULTADOS

Este tópico aborda o comportamento das variáveis de resposta considerando validações estatísticas baseadas na ANOVA. Assim, no item 3.1 é discutido o efeito dos fatores de controle de processo (avanço por revolução) e do material da peça (tratamento térmico e porcentagem de redução da espessura no processo de laminação, aqui denominado encruamento) nas rugosidades Ra, Rq, Rz e Rt. Foram escolhidos dois parâmetros de amplitude média e outros dois de amplitude máxima, pois estes dois últimos podem captar picos ou vales não representados pelas médias. Outros parâmetros de rugosidade, como funcionais ou híbridos, serão apresentados em artigos futuros. Uma análise qualitativa das superfícies faceadas visando correlacionar as texturas produzidas com as variáveis de entrada também é conduzida.

O nível de encruamento decorrente do processo de torneamento de ultraprecisão também é avaliado estatisticamente no item 3.2. Neste caso, os fatores de controle são devidos ao processo de torneamento (avanço) e ao processo de medição da microdureza (carga do indentador). Por fim, o item 3.3 apresenta o efeito dos mesmos fatores de controle do item 3.1, porém relacionado às respostas do faceamento, ou seja, forças de corte e passiva, bem como a energia específica de corte.

3.1 Rugosidade da peça

A ANOVA a cerca da influência do avanço, tratamento térmico e nível de encruamento das amostras sobre as rugosidades Ra, Rq, Rz e Rt é mostrado na Tab. 1. Verificando os coeficientes R^2 , nota-se que o modelo estatístico aplicado representa entre 82,20 a 94,81% dos dados medidos.

Tabela 1. ANOVA para as rugosidades da peça Ra, Rq, Rz e Rt.

Fator de Controle	Graus de liberdade	Soma dos quadrados Sequencial	Soma dos quadrados ajustados	Quadrado médio ajustado	Teste-F	Valor-P
Ra ($R^2 = 94,81\%$)						
Avanço	4	10515,1	10515,1	2628,8	508,6	0,000
Tratamento	1	1,6	1,6	1,6	0,3	0,579
Encruamento	2	49,4	49,4	24,7	4,8	0,010
Erro	112	578,9	578,9	5,2		
Total	119	11144,9				
Rq ($R^2 = 94,25\%$)						
Avanço	4	14011,0	14011,0	3502,8	457,1	0,000
Tratamento	1	2,1	2,1	2,1	0,3	0,601
Encruamento	2	54,2	54,2	27,1	3,5	0,032
Erro	112	858,3	858,3	7,7		
Total	119	14925,6				
Rz ($R^2 = 82,20\%$)						
Avanço	4	195358	195358	48840	128,62	0,000
Tratamento	1	3	3	3	0,01	0,935
Encruamento	2	996	996	498	1,31	0,273
Erro	112	42530	42530	380		
Total	119	238887				
Rt ($R^2 = 87,50\%$)						
Avanço	4	202233	202233	50558	193,60	0,000
Tratamento	1	99	99	99	0,38	0,538
Encruamento	2	2407	2407	1204	4,61	0,012
Erro	112	29249	29249	261		
Total	119	233988				

Examinando-se a Tab. 1, verifica-se que todas as rugosidades médias e máximas sofrem influência estatística do avanço da ferramenta e do nível de deformação (encruamento) da peça, exceção para a relação Encruamento e Rz, cuja

probabilidade P foi maior que o nível de significância adotado ($P = 0,273 > \alpha = 0,05$). Esta não significância poder ter ocorrido, uma vez que R_z é uma média de 5 rugosidades máximas parciais dentro do comprimento de amostragem. Dessa forma, esta rugosidade não foi sensível ao encruamento como foi R_t , que é a máxima amplitude pico-vale do perfil.

O tratamento térmico das amostras visando minimizar ou remover o efeito da laminação no acabamento da peça não foi significativo, ou seja, a priori, o aquecimento a 300 °C por 40 minutos não foi suficiente para aliviar as tensões mecânicas internas geradas no processo de laminação. Analisando-se o Teste-F de cada fator, fica evidente que o avanço é o fator de controle que mais afeta a rugosidade da peça, dado seu maior valor (128,62 a 508,6) quando comparado com o dos outros fatores de controle (3,5 a 4,8). Portanto, dependendo do tipo de produto que seja requerido ao tornear peças da liga Al-Mg, o avanço da ferramenta poderá ser determinado para se alcançar acabamentos específicos, por exemplo, insertos ou moldes para lentes ou espelhos com resolução óptica devido à geração de superfícies especulares. Além do avanço, como já dito, a deformação proporcionada pelo processo de laminação afetou estatisticamente o acabamento das peças, sendo o segundo fator de controle mais influente na rugosidade. Portanto, este resultado indica que pré-processamentos por deformação plástica da liga Al-Mg também podem afetar o acabamento das peças.

Uma análise gráfica comportamental da relação entre os fatores de controle e as respostas de rugosidade pode ser obtida por meio da Fig. 2, que traz as curvas apenas dos fatores significativos, com exceção do efeito não significativo do encruamento na rugosidade R_z (Fig. 2c à direita).

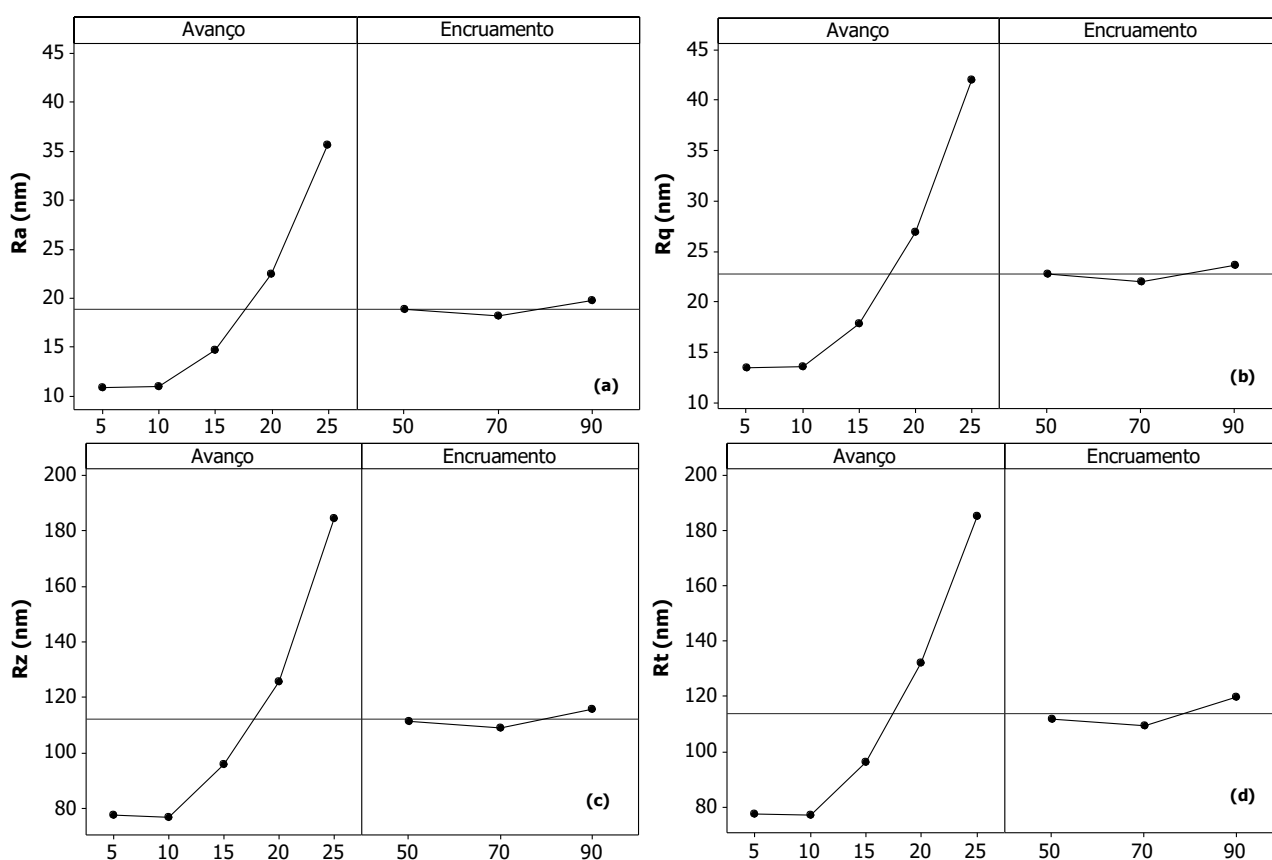


Figura 2. Gráfico de efeitos principais da ANOVA para as rugosidades (a) R_a , (b) R_q , (c) R_z e (d) R_t .

É possível observar que as rugosidades médias R_a e R_q crescem cerca de 3,5x com o aumento do avanço em 5x, porém para R_q os valores nominais de rugosidade são ligeiramente maiores, dado que este parâmetro é mais sensível que o R_a , já que ele é uma média quadrática, enquanto o R_a é uma média aritmética. A rugosidade média variou entre 12 e 43 nm, que representa um intervalo bem reduzido de rugosidade, mesmo sabendo-se que o processo empregado foi torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante. Ao analisar as rugosidades máximas R_z e R_t , nota-se que os valores nominais ficam bem próximos entre si, independentemente do avanço aplicado na usinagem, oscilando na faixa de 80 a 190 nm, aproximadamente. Seu crescimento foi menor que aquele para rugosidades médias, ficando em torno de 2,2 x com o aumento do avanço da ferramenta em 5x.

Ao analisar o comportamento do nível de deformação das amostras antes do processo de torneamento, observa-se que o encruamento apresentou um ponto de mínimo local, ou seja, o melhor acabamento da peça (18 nm R_a , 22 nm R_q , 113 nm R_t) foi alcançado para a deformação intermediária (70%). A rugosidade R_z não necessita ser analisada, pois o efeito do encruamento em R_z não foi significativo pela ANOVA. Embora o gráfico de efeitos principais produzido pela ANOVA

e apresentado na Fig. 2 mostre visualmente pouca variação das rugosidades em função do encruamento das peças, este fator de controle foi significativo na rugosidade. Este resultado entre encruamento e acabamento está relacionado com a dureza gerada na superfície das amostras após o processo de laminação. Para deformações de 50% e 90%, as superfícies das amostras podem ter apresentado um amaciamento e endurecimento, respectivamente, tais que podem ter desfavorecido a formação de cavaco, causando aumento da rugosidade. A deformação de 70% gerou um nível de encruamento na superfície das peças intermediário, que provavelmente permitiu a formação de cavaco mais uniforme, melhorando o acabamento das amostras. Estes efeitos do avanço da ferramenta e da magnitude de deformação das peças sobre a topografia das superfícies torneadas podem ser vistos tridimensionalmente na Fig. 3.

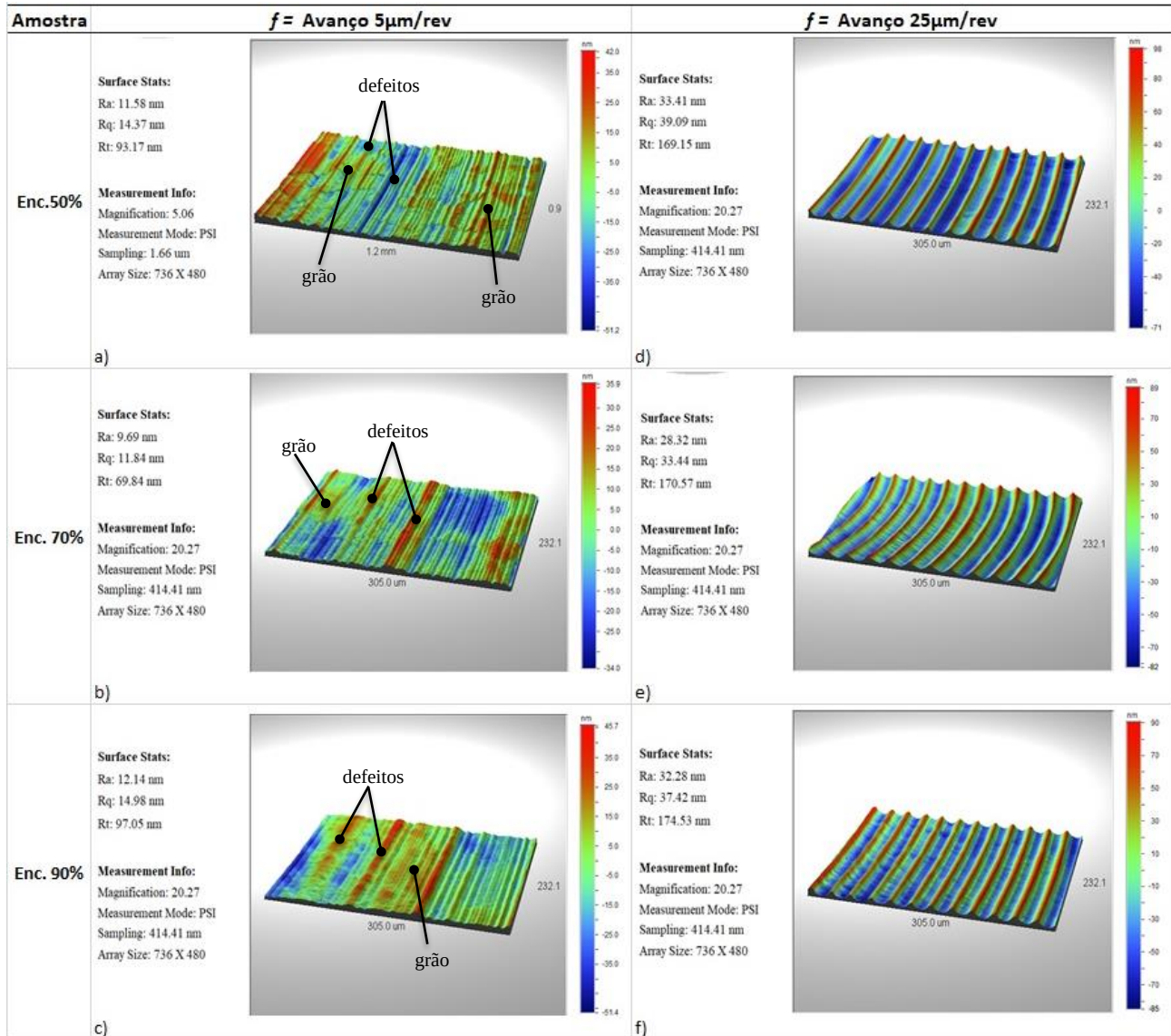


Figura 3. Rugosidade 3D das superfícies torneadas com avanços de 5 e 25 $\mu\text{m/rev}$ e níveis de encruamento de 50%, 70% e 90%, sem tratamento térmico dos corpos de prova.

A Figura 3 mostra as topografias das superfícies torneadas para todos os níveis de deformação e para os extremos da faixa de variação do avanço das amostras usinadas sem tratamento térmico de alívio de tensões, já que o tratamento térmico não foi influente na rugosidade segundo a ANOVA. Além das magnitudes numéricas das rugosidades Ra, Rq e Rt, nota-se pela escala de cores no eixo da altura da rugosidade que a deformação de 70% produziu o melhor acabamento, haja vista a menor oscilação dos padrões de cor azul (vales) e vermelho (picos), especialmente quando se considera o menor avanço da ferramenta. Neste caso, devido à menor amplitude pico-vale, o torneamento de ultraprecisão acabou revelando a microestrutura do material da peça, pois é possível identificar claramente grãos da liga Al-Mg, não somente pelas diferenças nos padrões de cor azul-verde-vermelho ou alturas das asperidades, mas também pelos contornos de grão visíveis (ver indicações nas imagens).

Ao avaliar as imagens das texturas para o maior avanço, constata-se que as superfícies não apresentam diferenças significativas visuais, exceto pelo fato de que o padrão de cor azul está mais proeminente nas peças deformadas a 50% e 90%. Isso significa que os vales estão mais profundos nestas condições de encruamento, que aumentaram tanto as rugosidades médias, quanto as máximas.

Por fim, já é de conhecimento consolidado na usinagem com remoção mecânica de cavaco que a rugosidade aumenta com o aumento do avanço da ferramenta e isto pode ser claramente observado comparando-se as topografias usinadas na Fig. 3. O menor avanço (imagens à esquerda) produziu uma rugosidade menor, porém com alguns defeitos aparentes, dados pela irregularidade das marcas de avanço e oscilações do perfil sem um padrão definido (ver indicações nas imagens). Este comportamento já não ocorre com o maior avanço (imagens à direita), que pode estar relacionado ao mecanismo de formação de cavaco e ao efeito de escala do processo.

3.2 Microdureza da superfície torneada

A Tab. 2 apresenta a ANOVA do efeito do avanço da ferramenta durante o torneamento das amostras e da variação da carga aplicada na medição da microdureza sobre a própria microdureza das superfícies usinadas. É possível constatar que o modelo estatístico representa muito bem os dados medidos pelos altos índices de R^2 (94,27 e 97,77%).

Tabela 2. ANOVA para a microdureza superficial (avanço e carga, profundidade e carga).

Fator de Controle	Graus de liberdade	Soma dos quadrados Sequencial	Soma dos quadrados ajustados	Quadrado médio ajustado	Teste-F	Valor-P
($R^2 = 97,77\%$)						
Avanço	2	151,8	151,8	75,9	8,43	0,001
Carga	6	21197,0	21197,0	3532,8	392,61	0,000
Erro	54	485,9	485,9	9,0		
Total	62	21834,7				
($R^2 = 94,27\%$)						
Profundidade	1	47,3	47,3	47,3	1,82	0,186
Carga	6	14448,2	14448,2	2408,0	92,86	0,000
Erro	34	881,7	881,7	25,9		
Total	41	15377,2				

A Tabela 2 mostra que a carga influi significativamente nos resultados de microdureza, pois as probabilidades (Valor-P = 0,000) foram menores que o nível de significância do modelo estatístico adotado ($\alpha = 0,05 = 5\%$). Este foi o fator que mais afetou a microdureza, dados os elevados valores da distribuição F (Teste-F 92,86 e 392,61). O avanço da ferramenta também apresentou influência estatística sobre a microdureza, pois Valor-P = 0,001 < $\alpha = 0,05$), entretanto, a profundidade de usinagem não promoveu amaciamento ou encruamento significativo na superfície usinada (Valor-P = 0,186 > $\alpha = 0,05$). O comportamento dessas variáveis será discutido a seguir com base nas Fig. 4 (gráfico de efeitos principais da ANOVA) e Fig. 5.

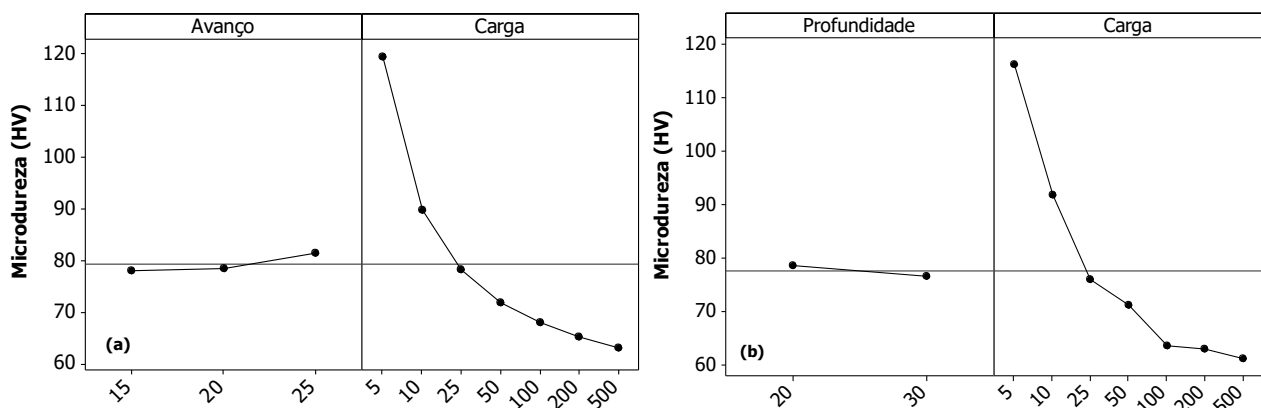


Figura 4. Gráfico de efeitos principais da ANOVA para a microdureza. (a) Avanço ($\mu\text{m}/\text{rev}$) e carga (g) com profundidade de usinagem constante ($10 \mu\text{m}$), (b) profundidade de usinagem (μm) e carga (g) com avanço constante ($10 \mu\text{m}/\text{rev}$).

A Figura 4(a) mostra que o aumento do avanço em 67% encruou a superfície usinada da peça em cerca de 3% em média. Este é um valor médio, pois os três pontos desta curva também contém cada um deles todos os pontos da carga aplicada na medição da microdureza. Apesar de ser um aumento aparentemente pequeno, ele foi significativo sob o prisma estatístico e, por ser um aumento médio, é preciso cautela na análise prática deste nível de encruamento. Isso poderá ser mais bem visto na Fig. 5. Ainda na Fig. 4(a), verifica-se que o aumento da carga aplicada em 100x reduziu a microdureza em, aproximadamente, 48%. Esse comportamento ocorreu, porque a maior carga aumenta o tamanho da endentação, que abrange uma quantidade maior de grãos da microestrutura do material da peça, resultando em um valor médio de dureza naquela região. Quando se diminui a carga aplicada, o tamanho da endentação é reduzido e a dureza aumenta em função da menor ocorrência de contornos de grão e de defeitos microestruturais, que governam os mecanismos de deformação plástica. Esse comportamento também ocorreu ao replicar as medidas apresentadas na Fig. 4(b). Na mesma figura, o aumento da profundidade de usinagem em 50% diminuiu a microdureza na superfície, porém sem significância, já que o Valor-P = 0,186 > $\alpha = 0,05$, conforme já mostrado na Tab. 2.

A Fig. 5 traz todas as medições de microdureza e seus desvios-padrões, considerando todos os parâmetros de corte e comparando com a microdureza de referência (também chamado de grupo de controle), que é aquela obtida na amostra “como recebida” (sem laminação), sem tratamento térmico de alívio de tensões e polida, visando excluir qualquer efeito de encruamento prévio.

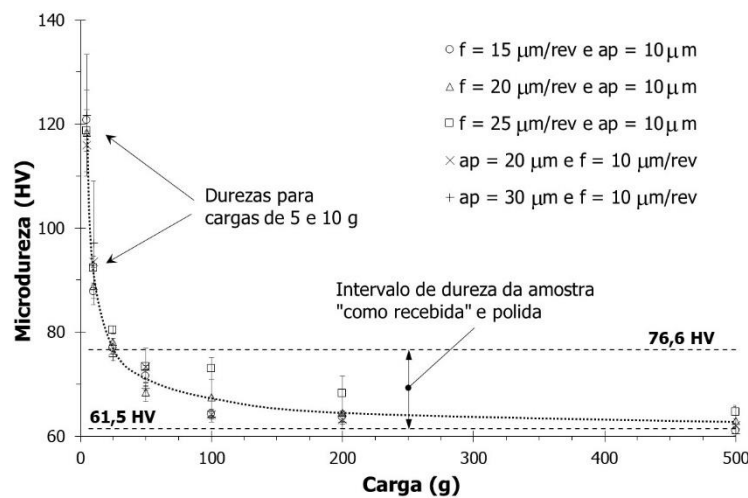


Figura 5. Comportamento da microdureza em função da carga aplicada, variando-se o avanço por revolução e a profundidade de usinagem na amostra “como recebida” e polida (referência), sem tratamento térmico e não laminada.

Observa-se na Fig. 5 que a faixa de dureza do grupo de controle está entre 61,5 e 76,6 HV. Ao medir a microdureza para todas as condições de corte (3 avanços e 2 profundidades de usinagem) e variando-se a carga aplicada do endentador, constata-se que apenas as cargas de 5 e 10 g indicam o efeito de escala indesejado nas medidas de microdureza, já que as amostras são isentas de encruamento. Neste caso, o tamanho reduzido da impressão de endentação produziu durezas maiores, decorrentes da menor probabilidade de se encontrar defeitos que facilitem o processo de deformação plástica e, por consequência, a redução da dureza. Pode ter ocorrido que as endentações tenham sido localizadas dentro de um grão ou tenham abrangido poucos grãos, em comparação a cargas maiores, de modo que o efeito da orientação cristalográfica, ausência ou menor ocorrência de contornos de grão e de defeitos cristalinos tenham amplificado as medidas de microdureza. Portanto, as cargas sugeridas para avaliar eventuais encruamentos das amostras de Al-Mg estão na faixa de 100 a 500 g, a não ser que se busque um alvo específico (único grão) com aplicação de cargas menores para fins de comparação nas mesmas condições (iguais tamanho grão e microconstituente).

3.3 Força de corte, força passiva e energia específica de corte

A análise das componentes da força de usinagem (corte e passiva) e da energia específica de corte é feita neste item. A Tabela 3 mostra os fatores de controle ou variáveis de entrada significativos nas respostas (forças e energia). Diferentemente das Análises de Variância conduzidas nos itens 3.1 (rugosidade) e 3.2 (microdureza), o coeficiente de ajuste do modelo estatístico neste caso foi inferior, variando entre 33,21 e 50,85%. Pode ter ocorrido uma variabilidade maior dos picos de força medidos que repercutiram na menor representividade do modelo estatístico.

De forma análoga à ANOVA para a rugosidade (item 3.1), o tratamento térmico das amostras não influenciou de forma significativa nas forças e energia, uma vez que o Valor-P = 0,174, 0,678 e 0,653 > $\alpha = 0,05$. Como já sugerido, a temperatura de 300 °C por um tempo de encharque de 40 minutos pode não ter sido suficiente para mitigar eventuais

efeitos de encruamento das peças para o torneamento. O encruamento também não se mostrou influente estatisticamente na força de corte e na energia específica de corte (Valor-P = 0,078 e 0,168 > α = 0,05). Neste caso, como a energia específica de corte deriva da força de corte, é razoável supor que esta última não seria significativa. O avanço da ferramenta também não foi significativo na força passiva (Valor-P = 0,592 > α = 0,05). A força passiva tende a depender mais da profundidade de usinagem que propriamente do avanço, que afeta mais a força de avanço, embora ambas forças aumentam com o acréscimo de volume de material removido na forma de cavaco.

Tabela 3. ANOVA para a força passiva (Ft), força de corte (Fc) e energia específica de corte (u).

Fator de Controle	Graus de liberdade	Soma dos quadrados Sequencial	Soma dos quadrados ajustados	Quadrado médio ajustado	Teste-F	Valor-P
Ft ($R^2 = 33,21\%$)						
Avanço	4	7026	7026	1756	0,70	0,592
Tratamento	1	4698	4698	4698	1,88	0,174
Encruamento	2	90198	90198	45099	18,04	0,000
Erro	82	205023	205023	2500		
Total	89	306944				
Fc ($R^2 = 50,85\%$)						
Avanço	4	462702	462702	115675	19,85	0,000
Tratamento	1	1011	1011	1011	0,17	0,678
Encruamento	2	30745	30745	15373	2,64	0,078
Erro	82	477943	477943	5829		
Total	89	972401				
u ($R^2 = 49,22\%$)						
Avanço	4	24,7150	24,7150	6,1788	18,90	0,000
Tratamento	1	0,0664	0,0664	0,0664	0,20	0,653
Encruamento	2	1,2029	1,2029	0,6015	1,84	0,165
Erro	82	26,8076	26,8076	0,3269		
Total	89	52,7920				

Os únicos fatores de controle influentes foram o encruamento na força passiva e o avanço na força de corte e na energia específica de corte, todos com Valor-P = 0,000 < α = 0,05. O comportamento destas variáveis pode ser mais bem descrito e discutido examinando-se a Fig. 6.

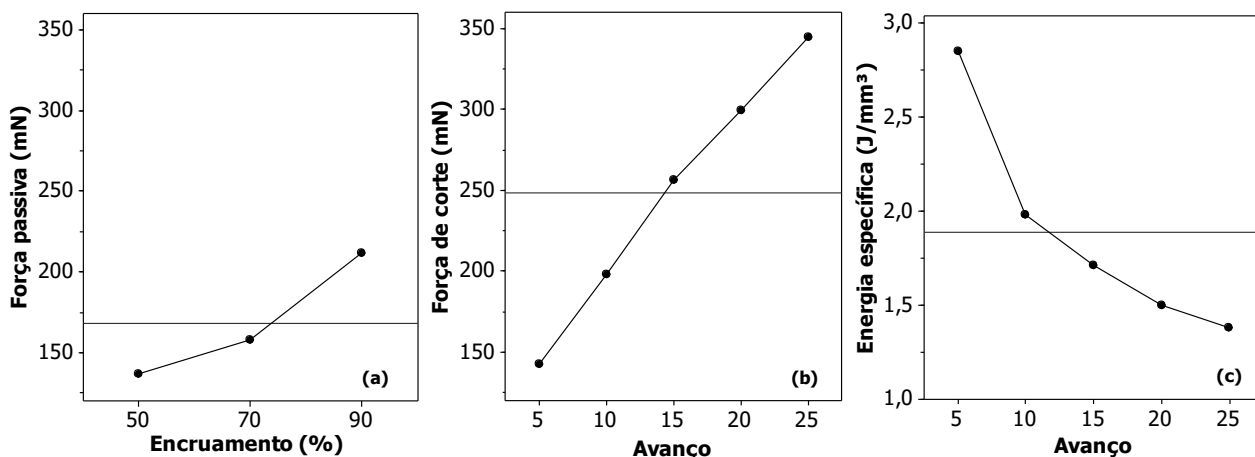


Figura 6. Gráfico de efeitos principais da ANOVA para (a) força passiva (Ft), (b) força de corte (Fc) e (c) energia específica de corte (u) em função do encruamento (%) e do avanço da ferramenta ($\mu\text{m}/\text{rev}$).

A Figura 6(a) mostra que o aumento do nível de encruamento de 50 para 90% aumentou a força passiva em cerca de 55%. O aumento de dureza da peça repercutiu diretamente na força passiva, que é a força de reação ou recuo da ferramenta em relação à peça. Este comportamento pode ser comprovado pela recuperação elástica dos grãos vistos na Fig. (3), especialmente para o avanço de 5 $\mu\text{m}/\text{rev}$. A peça encruada em 90% apresentou grãos mais elevados na superfície usinada em patamares em torno de 25 nm, ao passo que em peças encruadas com 50% e 70%, é possível identificar grãos elevados, aproximadamente, em níveis a 5 nm e 15 nm da superfície torneada, respectivamente. Já a força de corte aumentou 2,4x

quando o avanço da ferramenta cresceu 5x (Fig. 6b), pois houve acréscimo de volume de material removido na forma de cavaco. Na Figura 6(c), observa-se o comportamento clássico da energia específica de corte com o avanço. O crescimento do avanço em 5x reduziu a energia específica em 52%, aproximadamente. Este comportamento é governado pelo efeito de escala, pois a diminuição do avanço aumenta o volume de material não formado como cavaco entre a superfície de folga da ferramenta e a superfície usinada da peça. Este efeito gera deformação elástica sem compromisso de remoção de cavaco, aumentando a energia específica (J/mm^3), mesmo sendo a energia nominal (J) menor.

4. CONCLUSÕES

Este artigo determinou o efeito das condições metalúrgicas das peça (encruamento e tratamento térmico) e condições de corte (avanço e profundidade de usinagem) no acabamento, microdureza, forças (corte e passiva) e energia específica de corte após o torneamento de ultraprecisão da liga Al-Mg com ferramenta de diamante monocristalino. Com base na matriz experimental delineada nesta pesquisa, as seguintes conclusões são elencadas.

- De forma geral, o avanço da ferramenta e o encruamento da peça afetaram estatisticamente a rugosidade da peça, sendo o primeiro mais influente que o segundo. Maiores avanços produziram maiores rugosidades e marcas de avanço bem definidas no perfil. Menores avanços permitiram revelar a microestrutura da liga, evidenciando os contornos de grão e a diferença de altura entre grãos adjacentes, porém geraram danos superficiais, como marcas de avanço irregulares decorrentes da formação não uniforme dos cavacos. O encruamento intermediário gerou acabamentos estatisticamente melhores;
- O aumento do avanço encruou a superfície usinada das amostras do grupo de controle (sem encruamento prévio), porém a profundidade de usinagem não se mostrou significativa. As menores cargas de endentação gerou o efeito de escala, aumentando significativamente a dureza em relação a do *bulk* do material da peça. As cargas sugeridas para avaliação de eventuais encruamentos decorrentes da usinagem de ultraprecisão estão na faixa de 100 a 500 g;
- A força passiva mostrou-se apenas dependente estatisticamente do nível de encruamento da peça, pois elevou-se com a dureza superficial da peça. A força de corte e a energia específica de corte foram governadas pelo avanço da ferramenta e, por sua vez, pelo efeito de escala, já que o avanço é mais influente na força de corte (e energia específica), que propriamente na força passiva, que é sensível à profundidade de usinagem.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, CNPq e FAPESP pelo financiamento da pesquisa e ao Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, pelas medidas de microdureza realizadas nas amostras.

6. REFERÊNCIAS

- Boronski, D., Kotyk, M., Mackowiak, P. e Sniezek, L., 2017. Mechanical properties of explosively welded AA2519-AA1050-Ti6Al4V layered material at ambient and cryogenic conditions. *Materials and Design*, Vol. 133, p. 390-403.
- Corbett, J., McKeown, P.A., Peggs, G.N. e Whatmore, R., 2000. Nanotechnology: International development and emerging products. *CIRP Annals*, Vol. 42, p. 523-567.
- Dornfeld, D., Min, S. e Takeuchi, Y., 2006. Recent advances in mechanical micromachining. *CIRP Annals*, Vol. 55, p. 745-768.
- Fronczek, D.M., Chulist, R., Litynska-Dobrzynska, L., Kac, S., Schell, N. e Kania, Z., 2017. Microstructure and kinetics of intermetallic phase growth of three-layered A1050/AZ31/A1050 clads prepared by explosive welding combined with subsequent annealing. *Materials and Design*. Vol. 130, p. 120-130.
- Ghali, E., 2010. *Corrosion Resistance of Aluminum and Magnesium Alloys: Understanding, Performance, and Testing*. John Wiley & Sons, Inc, New Jersey, 1ª edição.
- Liu, K., Li, X.P., Rahman, M., Neo, K. e Liu, X., 2007. A study of the effect of tool cutting edge radius on ductile cutting of silicon wafers. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 32, Article number 631.
- Palanisamy, P., Saravanan, R., Rajendran, I. e Hanmugasundaram, S., 2006. Prediction of cutting force and temperature rise in the end-milling operation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 220, p. 1577-1587.
- Sekmen, M., Günay, M., Çifitçi, I., Korkut, I. e Seker, U., 2005. The influence of cutting tool rake angle on cutting forces when machining aluminium alloys. *Proceedings of the International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century*. Nagoya, Japan.
- Shaw, M.C., 2004. *Metal cutting principles*. Oxford University Press, New York, 2ª edição.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

EFFECT OF THE SURFACE WORK HARDENING ON Al-Mg ALLOY IN ULTRA PRECISION TURNING

Danver Messias Bruno

Renato Goulart Jasinevicius

Alessandro Roger Rodrigues

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Av. Trabalhador São Carlense, 400, São Carlos-SP
danverbruno@usp.br, renatogj@sc.usp.br, roger@sc.usp.br

Marcel Henrique Militão Dib

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Rua Doutor Aldo Benedito Pierri, 250, Araraquara-SP
marceldib@ifsp.edu.br

Abstract: This paper investigates the effect of the part work hardening and cutting conditions on workpiece surface finishing and micro hardness, as well as on forces and specific cutting energy of the Al-Mg alloy after the ultra precision turning process. Feed per revolution was varied in 5, 10, 15, 20 e 25 $\mu\text{m}/\text{rev}$ with constant 10 μm depth of cut. Depth of cut was also varied in 20 and 30 μm with constant 10 $\mu\text{m}/\text{rev}$ tool feed. The spindle rotation was also kept constant in 1000 rpm as well as cutting fluid. The part work hardening levels were obtained by specimen's thickness reduction in 50, 70, and 90% through cold rolling process. All machining trials were carried out in an ultra precision lathe Rank Pneumo ASG 2500 by using monocrystalline diamond tool with 0.774 mm tip radius and 0° rake angle. The results showed that the lower tool feeds reduced the part roughness and revealed the alloy microstructure by enabling to identify the grain boundaries, but such feeds produced damages on machined surface i.e. irregular feed marks with peaks and valleys non uniform. The intermediate samples' work hardening generated the best finishing due to the balance between workpiece surface softening and hardening. Higher tool feeds hardened the part machined surface, however the depth of cut did not yield significant effect. The hardness of the "as-received" parts (control group) ranged from 61.5 to 76.6 HV, and loading tests aiming at avoiding the size effect indicated the interval between 100 and 500 g. According to the ANOVA, the thrust force increased with part work hardening, but the cutting force and specific cutting force were indifferent, which in turn were influenced statistically by tool feed.

Keywords: Al-Mg alloy; Diamond tool; Ultra precision turning; Micro hardness; Roughness.

RESPONSIBILITY NOTICE

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