

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE FRESAMENTO NA FORMAÇÃO DA REBARBA EM UMA LIGA DE ALUMÍNIO AA6070-T4

Geordano de Moura Valadão, geordanodmv@yahoo.com.br¹

Daniela Luize Perez de Oliveira, engmec.daniela@gmail.com¹

Ricardo Freitas Vergara, ricardo.vergara@riogrande.ifrs.edu.br²

¹Universidade Federal do Rio Grande, Av. Itália km 8 Bairro Carreiros, Rio Grande-RS.

²Instituto Federal do Rio Grande do Sul - Câmpus Rio Grande, Rua Eng. Alfredo Huch, 475, Rio Grande-RS.

Resumo: Nos processos de produção, cada vez mais são exigidas estreitas tolerâncias dimensionais e alto grau de acabamento das superfícies das peças fabricadas. A formação de rebarba é um importante tópico no estudo da usinagem onde se busca reduzir ao máximo os processos pós usinagem, como a rebarbação, que aumentam os custos e não agregam valor ao produto. Ainda não é possível eliminar totalmente a formação da rebarba, entretanto é possível minimizar seu tamanho e facilitar sua remoção através da escolha adequada dos parâmetros de corte. Portanto, é necessário entender o mecanismo de formação da rebarba e a influência dos parâmetros de corte envolvidos. Este trabalho buscou identificar a influência dos parâmetros de fresamento sobre as dimensões da rebarba formada pelo gume principal e pelo gume secundário no fresamento de um rebaixo lateral com uma fresa de topo reto em uma liga de alumínio, apontando estratégias de usinagem mais adequadas para sua diminuição. Velocidade de corte, avanço por dente, profundidade de corte, largura de corte e o sentido de avanço foram os parâmetros investigados. Como resultado, os parâmetros de entrada apresentaram forte influência na formação da rebarba. Os parâmetros que influenciaram a formação da rebarba ao longo do rebaixo pelo gume secundário da fresa não foram os mesmos influentes na formação da rebarba pelo gume principal. No fresamento concordante se formaram menores rebarbas em relação ao fresamento discordante.

Palavras-chave: Formação de Rebarbas, Usinagem de Alumínio, Rebarbação.

1. INTRODUÇÃO

Conforme amplamente mencionando por diversos autores (Aurich et al, 2009; Hashimura et al, 1999; Chern, 1993), o crescente desenvolvimento dos processos produtivos junto com as exigências impostas pelos projetos, fazem com que as empresas que trabalham com fabricação de peças e componentes tenham atenção especial quanto a qualidade das superfícies usinadas. Estreitas tolerâncias dimensionais, qualidade de acabamento da superfície usinada e bordas livres de rebarba tem sido exigido no produto final. Dentre os problemas causados pela formação da rebarba estão os desvios dimensionais, as interferências na montagem de conjuntos mecânicos e perigos no manuseio de uma peça com rebarbas. Ainda, segundo Gillespie (1999), os processos de rebarbação de peças de precisão aumentam custos e não agregam valor ao produto, podendo representar entorno de 30% do valor da peça acabada. Visando reduzir estes custos, a diminuição e o controle das dimensões da rebarba durante a usinagem são tópicos importantes no assunto.

As ligas de alumínio são muito utilizadas nas indústrias do ramo automobilístico e aeroespacial, conforme descrevem Niknam et al. (2014). Estas ligas são consideradas de boa usinabilidade quanto ao desgaste de ferramenta e aos esforços de usinagem. Entretanto, devido à alta deformabilidade do alumínio, a formação de cavaco e de rebarba passam a ser uma preocupação quando se analisa os processos de usinagem destas ligas. O fresamento é um dos processos de usinagem mais estudados quanto ao problema da rebarba, é um importante processo pois possibilita uma alta taxa de remoção de material, um bom acabamento e uma ampla possibilidade de tipos de geometria de superfície. Tem um mecanismo de corte complexo, se comparado com outros processos, como plainamento e torneamento, devido a espessura de cavaco não ser uniforme, por existir excentricidade da ferramenta, pelas diversas interações entre os parâmetros de corte e pela flutuação constante da força de usinagem. Portanto, a formação de rebarba no processo de fresamento é um fenômeno complexo e aleatório, devido a estas características citadas. Diversos autores abordaram o problema da rebarba no fresamento, como por exemplo, Niknam e Songmene (2013) que estudaram as dimensões da rebarba no fresamento de canais em diferentes ligas de alumínio, Olvera e Barrow (1996) que estudaram as dimensões da rebarba no fresamento de um rebaixo lateral em aço de baixo carbono, Lekkala et al. (2011) estudaram as dimensões da rebarba no microfresamento de canais em aços inoxidáveis e ligas de alumínio, Hashimura et al. (1999) e Avila e Dornfeld (2004) estudaram o efeito do ângulo de saída da ferramenta pela borda da peça no fresamento de faceamento e o mecanismo de formação da rebarba.

Existem normas que definem a rebarba como, por exemplo, a ASTM e ISO 13715. Porém autores como Avila e Dornfeld (2004), definem de forma mais objetiva como sendo “uma projeção indesejável formada na borda da peça devido a deformação plástica ocorrida nos processo de fabricação, sejam por conformação ou usinagem”. A Figura (1) mostra representações típicas de rebarbas, onde (a) e (b) são representações de materiais dúcteis com a rebarba projetadas além da borda da peça e (c) a representação é de uma rebarba negativa (termo em inglês “break out”) típica de materiais frágeis.

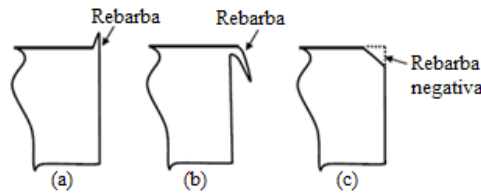


Figura 1. Representações típicas de rebarba apresentado por Gillespie 1999; (a) e (b) materiais dúcteis, (c) materiais frágeis

O mecanismo de formação da rebarba pode ser relacionado com a formação de cavaco. É um fenômeno complexo, pois envolve parâmetros independentes, dificultando o seu entendimento. Entre os parâmetros que influenciam na formação da rebarba estão o tipo de material da peça, o tipo de ferramenta (geometria e material) e seu desgaste, os parâmetros de corte, a instabilidade dinâmica dos processos de usinagem (vibrações) e as flutuação das forças de usinagem. A Figura (2) representa o mecanismo de formação da rebarba num corte ortogonal que foi proposto por Hashimura e Dornfeld (1999), onde (a) mostra a aproximação do gume da ferramenta à borda da peça, assim como o plano de cisalhamento primário durante a formação do cavaco, podendo-se identificar as zonas de deformação plástica e elástica; (b) mostra o surgimento de um ponto de cisalhamento devido a aproximação do gume à borda da peça, é a partir deste ponto que o material irá girar durante a saída do gume pela borda da peça; em (c) há um aumento da deformação plástica na região da borda até que haja uma ligação entre o plano de cisalhamento primário e o ponto de rotação, surgindo assim o chamado plano de cisalhamento negativo; para um material dúctil, como representado em (d), o gume deixa a peça ficando a rebarba remanescente deformada entorno do ponto de rotação; no caso de materiais frágeis, como em (e), propaga-se uma trinca na direção do plano de cisalhamento negativo, formando a chamada rebarba negativa.

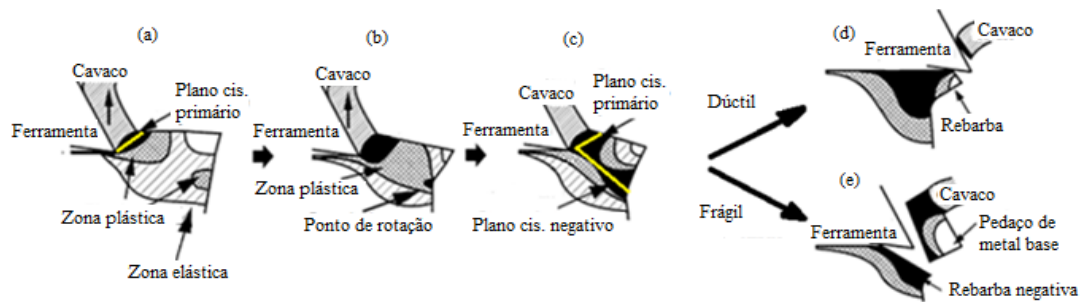


Figura 2. Mecanismo de formação da rebarba em corte ortogonal, por Hashimura e Dornfeld (1999).

Gillespie e Blotter (1976) e Nakayama e Arai (1987), classificaram as rebarbas quanto a localização na borda da peça e quanto ao gume responsável pela formação da mesma, considerando um rebaixo lateral com fresa de topo, conforme Fig. (3)(a), onde as rebarbas nas regiões (1) e (2) são formadas pelo gume principal e as rebarbas nas regiões (3) e (4) são formadas pelos gumes secundários. Kishimoto et al (1981) introduziram os termos de rebarba primária, para identificar tamanhos grandes com formas bem definidas, e rebarba secundária, para identificar rebarbas pequenas e com formas indefinidas que se desenvolvem ao longo da borda da peça. Chern (1993) apresentou uma classificação a partir da morfologia da rebarba durante seu estudo no fresamento de faceamento em ligas de alumínio. Sua classificação apresenta três tipos de rebarbas primárias com formas bem definidas: tipo faca, tipo caracol e tipo onda. Já as rebarbas secundárias sofrem rupturas na sua formação, por isso são pequenas e com formato irregular. Olvera e Barrow (1996) mostraram que há uma transição brusca de rebarba primária para secundária, onde os parâmetros de corte estão diretamente relacionados com esta transição. Estes dois últimos autores ainda acrescentam que, no fresamento de faceamento, a morfologia da rebarba é diretamente relacionada com o ângulo de saída do gume secundário pela borda da peça, conforme Fig. (3)(b).

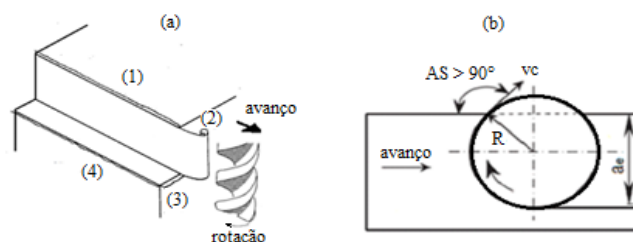


Figura 3. (a) Rebarbas formadas por uma fresa de topo num rebaixo lateral por Gillespie e Blotter (1976); (b) Ângulo de saída (AS) do gume principal num fresamento de faceamento por Chern (1993).

Os trabalhos sobre formação de rebarba na usinagem normalmente têm como objetivo reduzir as dimensões das rebarbas, a fim facilitar os processos de rebarbação e prever o tipo de processo necessário. Nos processos de rebarbação são utilizadas desde ferramentas manuais abrasivos até sistemas automatizados instalados na linha de produção. Os estudos envolvem os fenômenos que ocorrem durante sua formação, a caracterização e classificação, os efeitos das variáveis envolvidas e a escolha adequada dos parâmetros para sua redução ou eliminação. São muitos os fatores que interagem na formação da rebarba, tornando complexo o seu estudo, uma vez que uma simples alteração de regulagem de máquina ou troca de material altera consideravelmente os resultados, conforme analisam Niknam et al. (2014). Devido a estas inúmeras interações, as dimensões da rebarba variam muito numa mesma amostra analisada, ou seja, possuem uma grande dispersão entorno da média, o que torna as análises, muitas vezes, imprecisas ou inconclusivas. Autores como Niknam (2013), Olvera e Barrow (1996), Lekkala et al. (2011) relatam este problema de dispersão das dimensões da rebarba. Neste caso, as análises estatísticas passam a ser ferramentas fundamentais no estudo sobre a influência dos parâmetros de corte, indicando quais são os parâmetros influentes. Niknam (2013) e Lekkala et al. (2011) utilizaram a Análise de Variância para identificar a influência dos parâmetros de corte no fresamento de canais, conseguindo obter conclusões apenas para rebarbas formadas na saída da ferramenta na direção do avanço, nas demais regiões do canal as análises foram inconclusivas.

Portanto, este trabalho foca sua análise nos parâmetros de regulagem de máquina (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) e na interação da ferramenta com a peça (largura e sentido de corte), com o objetivo de identificar a influência destes parâmetros sobre as dimensões da rebarba formada pelo gume principal e pelo gume secundário no fresamento de um rebaixo com uma fresa de topo. A Análise de Variância é utilizada como ferramenta estatística para identificar quais parâmetros são influentes, bem como, quantificar o tamanho da importância destes parâmetros na formação da rebarba.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Materiais e Métodos

Para compreender a formação da rebarba em relação a variação dos diferentes parâmetros de usinagem, foram realizados ensaios que consistiram em fresamento de rebaiços laterais empregando uma fresa inteiraça de topo reto. O número de ensaios necessários foi definido por um planejamento fatorial completo. Os corpos de prova (CPs) foram fabricados da liga de alumínio AA6070T4, sua geometria permitiu que num mesmo CP dois sentidos de corte (concordante e discordante) fossem executados, conforme ilustra a Fig. (4), e suas dimensões foram planejadas de forma a se adequar a capacidade dos microscópios (óptico e MEV). O comprimento do rebaixo foi de 15mm. Os ensaios de fresamento foram realizados num centro de usinagem HaasVF3 com potência de 50kW, rotação máxima do fuso 30.000RPM e precisão de deslocamento dos eixos 0,001mm. Foi utilizada uma fresa de topo reto do tipo inteiraça de metal duro com dois gumes, sem recobrimento e diâmetro de 10mm. A ferramenta foi montada em um adaptador hidráulico, balanceado para altas rotações e com interface ISO à máquina. As rebarbas formadas foram avaliadas por microscopia óptica e visualizados também por microscopia eletrônica de varredura. A forma do CP e a localização das rebarbas analisadas são ilustrados na Fig. (4), onde à esquerda está as indicações das rebarbas formadas e à direita uma imagem do CP com rebaixo já usinado nos dois sentidos.

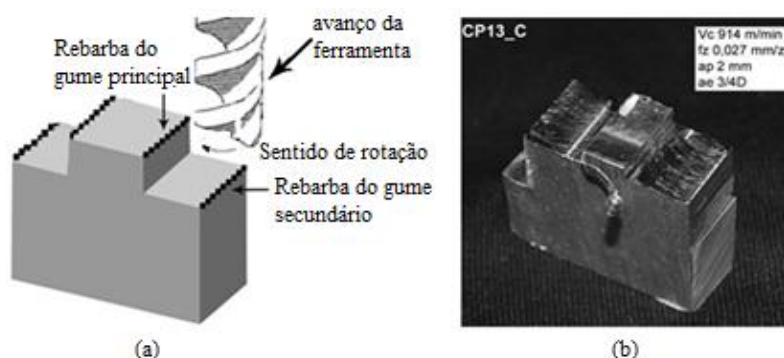


Figura 4. Representação esquemática do CP localizando as rebarbas analisadas e fotografia do CP submetido a fresamento de rebaiços laterais nos sentidos concordante e discordante.

Visando focar no estudo da influência dos parâmetros de usinagem na dimensão da rebarba, o fresamento foi realizado sem utilização de fluido de corte e com geometria da ferramenta de corte constante. As variáveis de entrada (ou fatores) escolhidas foram velocidade de corte (v_c), avanço por gume (f_z), profundidade de corte (a_p) e largura de corte (a_e). Os sentidos de corte concordante e discordante também foram investigados. A Tabela (1) apresenta os níveis escolhidos para cada parâmetro de corte, onde a letra “D” significa diâmetro da fresa.

Tabela 1 - Parâmetros de corte selecionados

Fatores	Níveis	
	1	2
v_c [m/min]	314	942
f_z [mm/z]	0,03	0,1
a_p [mm]	2	5
a_e [mm]	1/4 D (2,5mm)	3/4 D (7,5mm)

A partir da investigação delineada, considerou-se aplicar uma análise estatística multifatorial univariada, onde a análise de variância foi imposta como modelo estatístico. A hipótese nula da investigação foi de que os parâmetros de usinagem (fatores), nos seus diferentes níveis, não influenciariam nas dimensões da rebarba (variável resposta), tão pouco a interação entre os parâmetros influenciaria. Já a hipótese alternativa foi de que haveria influência dos parâmetros de usinagem, ou ainda da interação destes, nas dimensões da rebarba. Assim, um planejamento fatorial completo 2^4 foi aplicado para o planejamento dos ensaios, sendo executado três réplicas de cada ensaio. No total, foram fabricados 48 CPs, sendo que num mesmo corpo de prova foram fresados os sentidos de corte concordante e discordante, somando 96 ensaios.

A utilização da análise de variância tem como pressuposto a independência, a normalidade e a heterocedasticidade das amostragens, segundo Montgomery D. (2001). A independência foi verificada por um teste Durbin-Watson, a normalidade por um teste Shapiro-Wilk e a heterocedasticidade (ou igualdade de variâncias) por um teste F para comparação de variâncias. No conjunto de amostras de cada fator, em que não foi possível cumprir estes pressupostos, utilizou-se de transformação matemática dos dados brutos para uma escala logarítmica (logaritmo natural), permitindo reduzir o efeito da dispersão. O software R foi utilizado para realizar os cálculos estatísticos e geração de tabelas. O intervalo de confiança em todas as análises foi de 95% ($p_{valor} = 0,05$).

Para determinar as dimensões da rebarba foram executadas medições de altura e espessura através de um microscópio óptico Leica modelo DM300 com aumento de até 1000x, equipado com sistema de aquisição de imagens. O caminho da ferramenta foi percorrido sob a objetiva do microscópio com aumento de 50x, permitindo identificar a região de maior formação de rebarba. Uma vez identificada a região de maior rebarba, a região a ser medida, escolheu-se a lente que melhor se adaptou ao tamanho da rebarba e efetuou-se a medição. Executou-se, então, a medição em três pontos desta região selecionada, considerando como medida a média destes três pontos. A medida de altura foi efetuada por diferença de foco entre o material de base do CP e a crista da rebarba, sendo que o microscópio possui um manípulo com colar graduado para o ajuste de foco, com divisão de escala de $1\mu m$. A espessura foi medida na mesma região da medição da altura, porém com auxílio do software de aquisição de imagem do microscópio, onde o software relaciona os pixels da imagem com medição em μm . A Figura (5) representa a forma de observação da rebarba para executar sua medição.

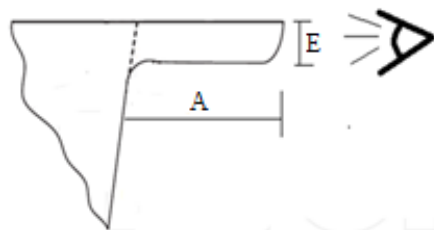


Figura 5. Método de medição de altura (A) e espessura (E) das rebarbas

Adotou-se uma nomenclatura abreviada, afim de simplificar a apresentação dos resultados, para as diferentes dimensões e regiões das rebarbas, como segue:

- Altura da rebarba formada pelo Gume Principal: **AGP_C** (concordante) e **AGP_D** (discordante);
- Espessura da rebarba formada pelo Gume Principal: **EGP_C** (concordante) e **EGP_D** (discordante);
- Altura da rebarba formada pelo Gume Secundário: **AGS_C** (concordante) e **AGS_D** (discordante);
- Espessura da rebarba formada pelo Gume Secundário: **EGS_C** (concordante) e **EGS_D** (discordante).

2.2. Resultados

As formas e tamanhos das rebarbas são muito variadas e influenciadas pelo material da peça, geometria e material da ferramenta, parâmetros de corte e condições da máquina ferramenta. Na análise dos resultados não foram considerados possíveis efeitos derivados das vibrações do sistema. Assumiu-se que estes efeitos não são controláveis e que ocorreram de forma sistemática em todos os ensaios. A geometria e o material da ferramenta de corte foram mantidos constantes para todos os ensaios. Desta forma, o estudo foi focado na influência dos parâmetros de corte para a liga AA6070T4.

Uma análise de variância foi realizada para cada dimensão (altura e espessura) identificando os parâmetros, ou interação destes, mais influentes na formação da rebarba.

2.2.1. Rebarba formada pelo gume secundário

Nos ensaios com fresamento discordante formaram-se dois tipos de rebarba, classificadas como primária e secundária. Em todos os ensaios com $a_e = 3/4D$ (7,5mm), formaram-se rebarbas primárias em forma de onda, já em todos os ensaios com $a_e = 1/4D$ (2,5mm), formaram-se rebarbas secundárias. Esta análise morfológica foi analisada por Chern (1993) em seu estudo de fresamento de faceamento, onde ele atribuiu as características morfológicas ao ângulo de saída (AS) do gume pela borda da peça. O AS é medido entre o vetor velocidade de corte e a borda da peça, a partir do plano da vista superior, conforme a Fig. (3)(b). Para $a_e = 3/4D$ (7,5mm) o AS formou 120° , para $a_e = 1/4D$ (2,5mm) o AS foi de 60° . A Figura (6) apresenta estas diferenças morfológicas obtidas nos testes, onde (a) mostra rebarba primária em forma de onda e (b) rebarba secundária. Portanto, não é possível analisar conjuntamente os dois tipos de rebarbas (primária e secundária), pois elas se formam por mecanismos diferentes e possuem dimensões distintas. Do ponto de vista prático, prefere-se as rebarbas secundárias às primárias, pois são de menor tamanho, de mais fácil remoção e com menor chance de danificar a borda do metal de base durante a rebarbação. Neste caso, considerou-se somente as rebarbas secundárias formadas devido $a_e = 1/4D$ na análise estatística, sob pena de distorção dos resultados em caso de análise conjunta, devido as diferenças de formação entre os dois tipos de rebarba.

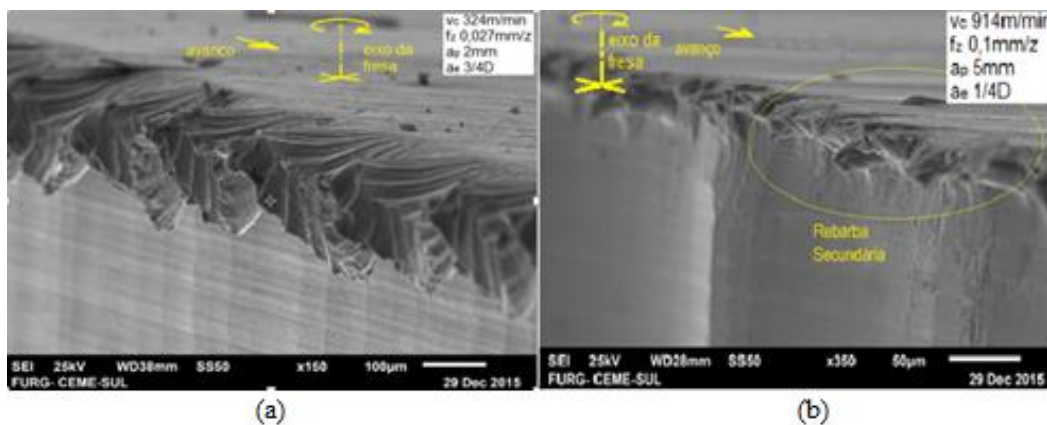


Figura 6. Características morfológicas da rebarba formada pelo gume secundário. (a) Rebarba primária em forma de onda; (b) Rebarba secundária

Nos ensaios com fresamento concordante formaram-se rebarbas do tipo secundária em todos os ensaios. Portanto, na análise estatística considerou-se analisar todos dados, pois não há diferença no tipo de formação da rebarba em nenhuma das combinações dos parâmetros. De maneira geral, as rebarbas formadas no fresamento concordante tiveram, em média, dimensões menores que as rebarbas formadas no fresamento discordante, apesar de uma maior dispersão dos resultados no fresamento concordante. A Figura (7) apresenta esta comparação, mostrando os dados para (a) altura e (b) espessura da rebarba formada pelo gume secundário a partir de um teste *t de student*, constatando-se diferença significativa entre as médias com intervalo de confiança de 95% ($p_{\text{valor}} = 0,05$). Os dados de dimensão no eixo vertical sofreram transformação logarítmica para que se ajustassem aos pressupostos da inferência estatística.

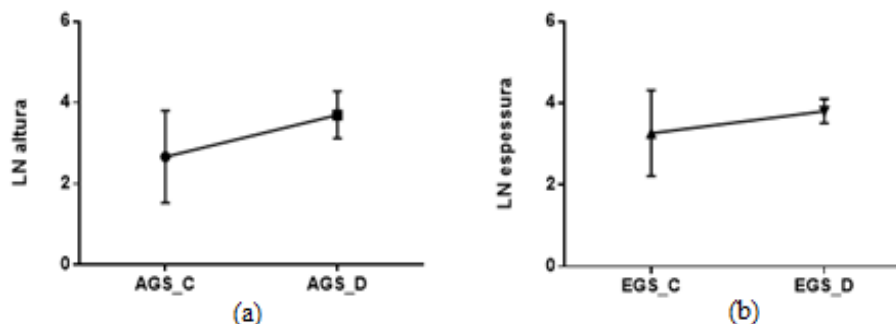


Figura 7. Comparação das dimensões da rebarba formada pelo gume secundário entre fresamento concordante e discordante. (a) altura e (b) espessura, ambas com transformação logarítmica.

A Tabela (2) apresenta os resultados da ANOVA para a altura e espessura da rebarba formada pelo gume secundário nos dois sentidos de corte, considerando como significativo $p_{\text{valor}} < 0,05$. A parte superior da tabela analisa a influência dos parâmetros de fresamento, assim como suas interações, na altura e espessura da rebarba formada pelo gume secundário no fresamento discordante (AGS_D e EGS_D, respectivamente), a parte inferior da tabela analisa o mesmo porém para o fresamento concordante (AGS_C e EGS_C). O chamado “effect size” (η^2) é um indicador estatístico que quantifica (em %) a importância do parâmetro na variável resposta, já que o p_{valor} indica somente se há influência significativa do parâmetro ou não, mas não dá informação do tamanho da influência (Olejnik & Algina 2003). Conforme os dados da Tab.(2), apenas a interação $f_z:a_e$ influenciou de forma significativa na **AGS_C**, o restante dos parâmetros não influenciaram significativamente nas dimensões apresentadas. Na análise do resíduo da ANOVA, observou-se que, em média, 80% das ocorrências no fresamento discordante e 70% das ocorrências no fresamento concordante, não foram explicadas pelo modelo estatístico.

Tabela 2. Resultados de ANOVA para altura e espessura da rebarba formada pelo gume secundário

AGS_D	Df	SS	MS	Fvalor	pvalor	η^2	EGS_D	Df	SS	MS	Fvalor	pvalor	η^2
v_c	1	0,187	0,187	0,536	0,475	3%	v_c	1	0,019	0,019	0,17	0,685	1%
f_z	1	0,231	0,2313	0,663	0,428	3%	f_z	1	0,037	0,037	0,332	0,572	2%
a_p	1	0,126	0,1259	0,361	0,556	2%	a_p	1	0,047	0,047	0,427	0,523	2%
$v_c:f_z$	1	0,028	0,0282	0,081	0,78	0%	$v_c:f_z$	1	0,071	0,071	0,635	0,437	3%
$v_c:a_p$	1	0,009	0,009	0,026	0,875	0%	$v_c:a_p$	1	0,027	0,027	0,247	0,626	1%
$f_z:a_p$	1	0,669	0,669	1,917	0,185	9%	$f_z:a_p$	1	0,091	0,091	0,814	0,38	4%
$v_c:f_z:a_p$	1	0,455	0,4546	1,303	0,27	6%	$v_c:f_z:a_p$	1	0,046	0,046	0,415	0,528	2%
Resíduo	16	5,584	0,349			77%	Resíduo	16	1,795	0,112			84%

AGS_C	Df	SS	MS	Fvalor	pvalor	η^2	EGS_C	Df	SS	MS	Fvalor	pvalor	η^2
v_c	1	0,06	0,064	0,05	0,824	0%	v_c	1	1,98	1,976	1,941	0,173	4%
f_z	1	1,89	1,888	1,468	0,234	3%	f_z	1	0,16	0,164	0,161	0,691	0%
a_p	1	0,21	0,214	0,166	0,686	0%	a_p	1	0,77	0,766	0,752	0,392	2%
a_e	1	0,83	0,825	0,642	0,429	1%	a_e	1	0,01	0,011	0,011	0,917	0%
$v_c:f_z$	1	0,27	0,273	0,213	0,647	0%	$v_c:f_z$	1	0,25	0,246	0,242	0,626	1%
$v_c:a_p$	1	0,8	0,801	0,623	0,435	1%	$v_c:a_p$	1	0,14	0,143	0,14	0,710	0%
$f_z:a_p$	1	0,74	0,736	0,573	0,454	1%	$f_z:a_p$	1	2,42	2,419	2,376	0,133	5%
$v_c:a_e$	1	3,32	3,322	2,584	0,117	6%	$v_c:a_e$	1	3,28	3,279	3,221	0,082	7%
$f_z:a_e$	1	5,34	5,344	4,157	0,049	9%	$f_z:a_e$	1	1,95	1,949	1,915	0,176	4%
$a_p:a_e$	1	1,55	1,547	1,203	0,280	3%	$a_p:a_e$	1	1,2	1,204	1,182	0,285	3%
$v_c:f_z:a_p$	1	0,02	0,021	0,016	0,900	0%	$v_c:f_z:a_p$	1	0,36	0,363	0,356	0,554	1%
$v_c:f_z:a_e$	1	0,18	0,176	0,137	0,714	0%	$v_c:f_z:a_e$	1	0,03	0,03	0,029	0,864	0%
$v_c:a_p:a_e$	1	0,09	0,093	0,072	0,789	0%	$v_c:a_p:a_e$	1	0,12	0,124	0,121	0,729	0%
$f_z:a_p:a_e$	1	0,67	0,667	0,519	0,476	1%	$f_z:a_p:a_e$	1	0,46	0,457	0,448	0,507	1%
$v_c:f_z:a_p:a_e$	1	0,49	0,493	0,383	0,540	1%	$v_c:f_z:a_p:a_e$	1	1,09	1,089	1,07	0,308	2%
Resíduo	32	41,14	1,286			71%	Resíduo	32	32,58	1,018			70%

2.2.2. Rebarba formada pelo gume principal

Em todos os ensaios as rebarbas formadas pelo gume principal foram do tipo secundárias, tanto para o fresamento discordante quanto no concordante, conforme Fig. (8). De maneira geral, as rebarbas formadas no fresamento concordante tiveram, em média, dimensões menores que as rebarbas formadas no fresamento discordante. A Figura (9) apresenta esta comparação, mostrando os dados para (a) altura e (b) espessura da rebarba formada pelo gume principal a partir de um teste *t de student*, constatando-se diferença significativa entre as médias com intervalo de confiança de 95% ($p_{\text{valor}}=0,05$). Os dados de dimensão no eixo vertical sofreram transformação logarítmica para que se ajustassem aos pressupostos da inferência estatística.

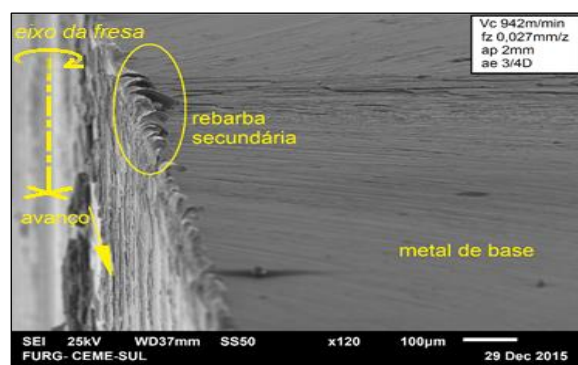


Figura 8. Rebarba típica formada pelo gume principal

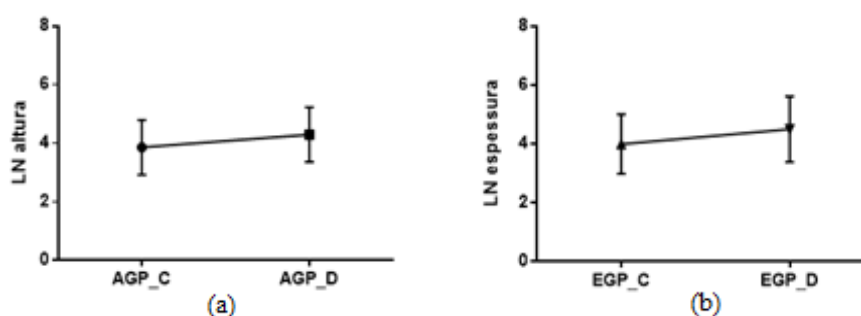


Figura 9. Comparação das dimensões da rebarba formada pelo gume principal entre fresamento concordante e discordante. (a) altura e (b) espessura, ambas com transformação logarítmica

A Tabela (3) apresenta os resultados da ANOVA para a altura e espessura da rebarba formada pelo gume principal nos dois sentidos de corte, considerando como significativo $p_{valor} < 0,05$. A parte superior da tabela analisa a influência dos parâmetros de fresamento, assim como suas interações, na altura e espessura da rebarba formada pelo gume principal no fresamento discordante (AGP_D e EGP_D, respectivamente), a parte inferior da tabela analisa o mesmo porém para o fresamento concordante (AGP_C e EGP_C). O “effect size” (η^2) também é apresentado como indicador estatístico. Conforme os dados da Tab.(3), apenas a v_c influenciou de forma significativa em todas as dimensões da rebarba, tanto para o fresamento concordante quanto discordante, o restante dos parâmetros não influenciaram significativamente. Na análise do resíduo da ANOVA, observou-se que, em média, 65% das ocorrências não foram explicadas pelo modelo estatístico.

Tabela 3. Resultados de ANOVA para altura e espessura da rebarba formada pelo gume principal

AGP_C	Df	SS	MS	F _{valor}	p _{valor}	η^2	EGP_C	Df	SS	MS	F _{valor}	p _{valor}	η^2
v_c	1	6,871	6,871	8,291	0,007	17%	v_c	1	6,635	6,635	6,85	0,013	14%
f_z	1	0,357	0,357	0,431	0,516	1%	f_z	1	0,021	0,021	0,021	0,885	0%
a_p	1	0,412	0,412	0,497	0,486	1%	a_p	1	0,465	0,465	0,48	0,493	1%
a_e	1	0,196	0,196	0,236	0,630	0%	a_e	1	0,982	0,982	1,014	0,321	2%
$v_c:f_z$	1	1,077	1,077	1,299	0,262	3%	$v_c:f_z$	1	0,594	0,594	0,613	0,439	1%
$v_c:a_p$	1	0,939	0,939	1,133	0,295	2%	$v_c:a_p$	1	1,153	1,153	1,191	0,283	2%
$f_z:a_p$	1	0,056	0,056	0,068	0,796	0%	$f_z:a_p$	1	0,08	0,08	0,082	0,775	0%
$v_c:a_e$	1	1,914	1,914	2,309	0,138	5%	$v_c:a_e$	1	4,505	4,505	4,651	0,038	9%
$f_z:a_e$	1	2,102	2,102	2,536	0,121	5%	$f_z:a_e$	1	1,543	1,543	1,594	0,215	3%
$a_p:a_e$	1	0,13	0,13	0,157	0,694	0%	$a_p:a_e$	1	0,44	0,44	0,454	0,505	1%
$v_c:f_z:a_p$	1	0,157	0,157	0,189	0,666	0%	$v_c:f_z:a_p$	1	0,076	0,076	0,078	0,781	0%
$v_c:f_z:a_e$	1	0,064	0,064	0,078	0,782	0%	$v_c:f_z:a_e$	1	0,005	0,005	0,005	0,945	0%
$v_c:a_p:a_e$	1	0,248	0,248	0,299	0,588	1%	$v_c:a_p:a_e$	1	0,258	0,258	0,266	0,609	1%
$f_z:a_p:a_e$	1	0,002	0,002	0,002	0,962	0%	$f_z:a_p:a_e$	1	0,008	0,008	0,009	0,926	0%
$v_c:f_z:a_p:a_e$	1	0,007	0,007	0,008	0,927	0%	$v_c:f_z:a_p:a_e$	1	0,076	0,076	0,078	0,781	0%
Resíduo	32	26,52	0,829			65%	Resíduo	32	30,993	0,969			65%

AGP_D	Df	SS	MS	F _{valor}	p _{valor}	η^2	EGP_D	Df	SS	MS	F _{valor}	p _{valor}	η^2
v_c	1	2,75	2,749	3,395	0,074	7%	v_c	1	7,44	7,437	6,193	0,018	13%
f_z	1	1,662	1,661	2,052	0,161	4%	f_z	1	0,65	0,654	0,545	0,465	1%
a_p	1	0,256	0,256	0,316	0,577	1%	a_p	1	0,08	0,075	0,063	0,804	0%
a_e	1	0,001	0,001	0,002	0,968	0%	a_e	1	2,08	2,085	1,736	0,197	4%
v_c:f_z	1	1,034	1,034	1,277	0,266	3%	v_c:f_z	1	0,6	0,601	0,501	0,484	1%
v_c:a_p	1	0,059	0,059	0,073	0,788	0%	v_c:a_p	1	0,49	0,494	0,411	0,526	1%
f_z:a_p	1	0,564	0,564	0,697	0,410	2%	f_z:a_p	1	0,15	0,155	0,129	0,722	0%
v_c:a_e	1	2,545	2,544	3,142	0,085	7%	v_c:a_e	1	5,08	5,078	4,228	0,048	9%
f_z:a_e	1	0,758	0,757	0,936	0,340	2%	f_z:a_e	1	1,65	1,655	1,378	0,249	3%
a_p:a_e	1	0,401	0,401	0,496	0,486	1%	a_p:a_e	1	1,34	1,337	1,113	0,299	2%
v_c:f_z:a_p	1	0,242	0,241	0,298	0,588	1%	v_c:f_z:a_p	1	0,15	0,155	0,129	0,722	0%
v_c:f_z:a_e	1	0,011	0,011	0,014	0,906	0%	v_c:f_z:a_e	1	0,24	0,243	0,202	0,656	0%
v_c:a_p:a_e	1	0,627	0,626	0,774	0,385	2%	v_c:a_p:a_e	1	0,23	0,225	0,187	0,668	0%
f_z:a_p:a_e	1	0,023	0,022	0,028	0,868	0%	f_z:a_p:a_e	1	0,17	0,172	0,143	0,707	0%
v_c:f_z:a_p:a_e	1	0,144	0,143	0,177	0,676	0%	v_c:f_z:a_p:a_e	1	0	0,003	0,002	0,961	0%
Resíduo	32	25,915	0,809			70%	Resíduo	32	38,43	1,201			65%

2.3. Conclusão

O fresamento concordante formou rebarbas com dimensões menores que o fresamento discordante, isto foi comprovado a partir de um teste *t de student* que comparou as médias dos dois sentidos de corte. Entretanto, no fresamento concordante, verifica-se uma maior dispersão dos valores em torno da média das rebarbas formadas pelo gume secundário.

A rebarba formada pelo gume secundário no fresamento discordante é do tipo primária quando a_e é $3/4D$, formando um ângulo de saída de 120° . Quando a_e é $1/4D$, formando um ângulo de 60° , a rebarba passa a ser secundária. Isto se deve, principalmente, a forma como o gume deixa a borda da peça, ou ainda, devido ao ângulo de saída (AS) do gume pela borda da peça. Para $AS < 90^\circ$, a quina é a última parte do gume a deixar a peça, pois a sequência de saída do gume pela borda da peça é do centro da fresa para a quina. Neste intervalo de corte há uma completa remoção da rebarba deixada pelo gume anterior e um aumento gradual da espessura de material em frente ao gume, da velocidade de corte e da temperatura de corte, desta forma o fator de recalque é menor e a rebarba se quebra mais facilmente. Para $AS > 90^\circ$, a sequência de saída do gume é da quina para o centro da fresa, fazendo com que a porção de material em frente ao gume diminua gradualmente, dependendo do avanço, assim como a velocidade de corte e a temperatura diminuem ao mínimo, não atingindo as condições necessárias para a ruptura da rebarba.

Através da Análise de Variância pode-se concluir que a velocidade de corte (v_c) foi o parâmetro que mais influenciou na redução das dimensões da rebarba formada pelo gume principal. As dimensões da rebarba do tipo secundárias, geradas pelo gume secundário no fresamento discordante, não se mostraram influenciadas pelos parâmetros de corte, o modelo estatístico não foi capaz de identificar o motivo da variabilidade das dimensões. Já para o fresamento concordante a interação entre avanço e largura de corte influenciaram nas dimensões da rebarba.

As tabelas de ANOVA apresentaram um valor de resíduo elevado. Segundo o indicador η^2 , o modelo estatístico não conseguiu explicar, em média, 70% das ocorrências de formação de rebarba. Esta situação pode ter ocorrido pelos seguintes motivos: número de réplicas insuficientes, considerando que houve alta dispersão das dimensões da rebarba para a mesma combinação de parâmetros; fatores não avaliados neste trabalho e que foram considerados sistemáticos na execução dos ensaios como vibrações do sistema, deflexão e instabilidade da ferramenta; método de medição da rebarba sujeito a possíveis erros operacionais.

Para reduzir os valores de resíduo na Análise de Variância e tornar o teste mais robusto e mais conclusivo, segue algumas sugestões para trabalhos futuros: Acrescentar pelo menos mais um nível de parâmetros, afim de identificar o comportamento da rebarba em níveis intermediários ou maiores, assim como abordar aspectos geométricos e de material da ferramenta; Prever um comprimento de percurso da ferramenta maior para excluir da análise os trechos de entrada e saída da ferramenta, estas são regiões de instabilidade que podem distorcer os resultados; Aumentar o número de réplicas, devido à alta variabilidade da rebarba, para que o teste estatístico seja mais robusto e para que se tenha a alternativa de eliminar resultados muito fora da tendência das demais réplicas, causados por fatores desconhecidos e que causam distorções na análise; Substituir o método de medição da rebarba por microscopia óptica para um método que gere imagem 3D através de fontes de luz, como sistemas com laser ou por interferometria.

3. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e a FAPERGS pelo apoio financeiro prestado a pesquisa.

4. REFERÊNCIAS

- Aurich, J.C. & Dornfeld, D., 2009. "Burr - Analysis, Control and Removal", 3rd ed.,
Avila, M.C. & Dornfeld, D.A., 2004. "On The Face Milling Burr Formation Mechanisms And Minimization Strategies At High Tool Engagement".
Chern, G.L., 1993. "Analysis of Burr Formation and Breakout in Metal Cutting", University of California at Berkeley, Berkeley, CA.
Gillespie, L.K., 1999. "Deburring and Edge Finishing Handbook", SME.
Gillespie, L.K. & Blotter, P.T., 1976. "The Formation and Properties of Machining Burrs".
Hashimura, M. & Dornfeld, D., 1999. "Analysis of Burr Formation Mechanism in Orthogonal Cutting".
Hashimura, M., Hassamontr, J. & Dornfeld, D.A., 1999. "Effect of In-Plane Exit Angle and Rake Angles on Burr Height and Thickness in Face Milling Operation".
Kishimoto W, Miyake T, Yamamoto A, Yamanaka K, T.K., 1981. "Study of Burr Formation in Face Milling", Bulletin Japan Society of Precision Engineering, Vol 15, No.1, pp.51–53.
Lekkala, R. et al., 2011. "Characterization and modeling of burr formation in micro-end milling", Precision Engineering, Vol. 35, No. 4, pp.625–637.
Montgomery D., 2001. "Design and Analysis of Experiments", 5th ed.,
Nakayama, K. & Arai, M., 1987. "Burr Formation in Metal Cutting", Vol. 36, pp.33–36.
Niknam, S.A., 2013. "Burrs understanding , modeling and optimization during slot milling of aluminium alloys".
Niknam, S.A. & Songmene, V., 2013. "Factors governing burr formation during high-speed slot milling of wrought aluminum alloys", Journal of Engineering Manufacture, Vol 227, No.8, pp.1165–1179.
Niknam, S.A., Zedan, Y. & Songmene, V., 2014. "Machining Burrs Formation & Deburring of Aluminium Alloys", In V. A. Monteiro, ed. Light Metal Alloys Applications.
Olejnik, S. & Algina, J., 2003. "Generalized Eta and Omega Squared Statistics : Measures of Effect Size for Some Common Research Designs", Vol. 8, No. 4, pp.434–447.
Olvera, O. & Barrow, G., 1996. "An Experimental Study of Burr Formation in Square Shoulder Face Milling", Vol 36, No.9, pp.1005–1020.

5. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

MILLING PARAMETERS INFLUENCE ON BURR FORMATION OF ALUMINIUM ALLOY AA6070-T4

Abstract: *In the manufacturing processes, there is increasing demand to tight dimensional tolerances and high quality surface finish of the parts. Burr formation is an important topic in the study of machining where it seeks to reduce the post machining processes such as deburring, which increase costs and do not add value to the product. Still can not eliminate the burr but is possible minimize its size and facilitate its removal through proper choice of cutting parameters. Therefore, it is necessary to understand the burr formation mechanism and the influence of cutting parameters involved. This work aimed to identify the influence of cutting parameters on the dimensions of burr formed by main cutting edge and secondary cutting edge in square shoulder face milling of aluminum alloy, pointing most suitable machining strategies for its reduction. To this end, tests were performed which consisted of side milling recess with a flat end mill and the tests arranged by a full factorial design. Cutting speed, feed per tooth, cutting depth, cutting width and mode of milling were the cutting parameters investigated. The behavior of the components of the machining force (F_x , F_y and F_z) were also evaluated, seeking to identify their relationship to the burr size. As a result, the cutting parameters have strong influence on the burr formation. The parameters that influenced the burr formation by main cutting edge along the milling were not the same that influenced in the burr formation by secondary cutting edge. Down milling showed lesser burr formation compared to up milling. The components of the machining force had no good relationship with the burr size.*

Key words: *Burr Formation, Machining of Aluminium, Deburring.*

Geordano de Moura Valadão, geordanodmv@yahoo.com.br
Daniela Luize Perez de Oliveira, engmec.daniela@gmail
Ricardo Freitas Vergara, ricardo.vergara@riogrande.ifrs.edu.br