

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec

Geordano de Moura Valadão

**ESTUDO NA FORMAÇÃO DE REBARBAS NA USINAGEM COM
FRESA DE TOPO RETO EM ALUMÍNIO 6070-T4**

Dissertação para Obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Mecânica

Rio Grande, Março de 2016

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec

Geordano de Moura Valadão

**ESTUDO NA FORMAÇÃO DE REBARBAS NA USINAGEM COM
FRESA DE TOPO RETO EM ALUMÍNIO 6070-T4**

Orientador: Prof. Cleiton Rodrigues Teixeira, Dr.

Rio Grande, Março de 2016



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec



Ata nº **04/2016** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos dois dias do mês de março de dois mil e dezesseis, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, às dezesseis horas no CIDEDEC SUL Sala Lagoas – FURG, a que se submeteu o mestrando **Geordano de Moura Valadão**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Simulação e Controle de Processos de Fabricação do PPMec, com o seguinte título: **Estudo na Formação de Rebarbas na Usinagem com Fresa de Topo Reto em Alumínio 6070-T4**, referendada pela Câmara Assessora do Curso, o Prof. Dr.-ing Walter Lindolfo Weingaertner e Rodrigo Panosso Zeilmann, sob a presidência do Professor Cleiton Rodrigues Teixeira. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Cleiton Rodrigues Teixeira: APROVADO
2. Walter Lindolfo Weingaertner: APROVADO
3. Rodrigo Panosso Zeilmann: APROVADO

Foi concedido um prazo de 60 dias, para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1. [Assinatura]
CPF: 343 657 960 20
2. WALTER LINDOLFO WEINGAERTNER [Assinatura]
CPF: 246 457 029 04
3. RODRIGO P ZEILMANN [Assinatura]
CPF: 695897 770 -39

Geordano de Moura Valadão: [Assinatura]

*À minha família que tanto amo e aos
amigos do peito*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Cleiton Rodrigues Teixeira, pela orientação, por sua dedicação, pelo apoio e pela paciência, sem os quais não teria concluído este trabalho.

Ao Prof. Carlos Casanova, pelos ensinamentos e apoio no manuseio de equipamentos e fabricação de dispositivos auxiliares.

A todos os colegas do PPMec/FURG, pela ajuda neste período de estudos e, principalmente, pela grande amizade que formamos, em especial: Daniela Oliveira, Thais Passos, Adilar dos Santos, Tárique Shneider, Edilson Pollnow e Willian Almeida.

Aos professores e técnicos do PPMec/FURG, pelos ensinamentos e apoio nas realizações dos ensaios.

A equipe do CEME-Sul da FURG, pela colaboração nas análises com MEV.

Ao curso de Fabricação Mecânica do IFRS – Campus Rio Grande, pelo apoio e amizade dos colegas professores, pelo aprendizado com os alunos e pela disponibilidade dos laboratórios.

A minha querida companheira Giselle Perazzo, pela ajuda, pela paciência, pelos conselhos, pelo aprendizado e pela presença. Foi de fundamental importância na escrita desta dissertação.

Aos meus pais, por sempre me incentivarem a seguir em frente nos estudos. Sem a dedicação e sacrifício deles não teria chegado ao mestrado.

A FAPERGS, pelo apoio financeiro.

“Ora, esse precioso metal tem a brancura da prata, a indestrutibilidade do ouro, a tenacidade do ferro, a fusibilidade do cobre e a leveza do vidro; trabalha-se facilmente e está muito disseminado na natureza, visto que forma a base da maioria das rochas. É três vezes mais leve que o ferro, e parece ter sido criado expressamente para nos fornecer o material para o nosso projétil!”

(Júlio Verne, "Da Terra à Lua", 1865)

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 com uma fresa de topo em uma liga de alumínio, apontando estratégias de usinagem mais adequadas para sua diminuição. Para isto, foram realizados ensaios que consistiram em fresamento de rebaiços laterais com fresa inteiriça de topo reto, sendo os ensaios arranjados por um planejamento fatorial completo. Velocidade de corte, avanço por dente, profundidade de corte, largura de corte e o sentido de avanço foram os parâmetros investigados. O comportamento das componentes da força de usinagem (F_x , F_y e F_z) também foram avaliados, buscando-se identificar sua relação com as dimensões das rebarbas. 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. As componentes da força de usinagem (F_x , F_y e F_z) não apresentaram relação com as dimensões da rebarba.

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

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.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1. Processo de Fresamento	20
2.2. Mecanismo de Formação do Cavaco.....	23
2.3. Formação das Rebarbas.....	25
2.3.1. Definições.....	25
2.3.2. Mecanismo de Formação da Rebarba.....	26
2.3.3. Classificação da Rebarba.....	28
2.2.4 Efeito dos Parâmetros de Corte na Formação da Rebarba.....	33
2.4. Forças no Fresamento	39
3. MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1. Planejamento Experimental	42
3.2. Corpos de Prova (CPs)	44
3.3. Ensaio de Fresamento	45
3.4. Medição das Rebarbas	52
3.5. Análise da Força de Corte.....	54
3.6. Análise Estatística.....	55
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
4.1. Ensaio de Fresamento Discordante	57
4.1.1. Dimensões da Rebarba formada pelo Gume Principal na Lateral do Rebaixo no Fresamento Discordante	57
4.1.2. Dimensões da Rebarba Formada pelo Gume secundário no Fresamento Discordante.....	67
4.2. Ensaio de Fresamento Concordante	78
4.2.1. Dimensões da Rebarba formada pelo Gume Principal na Lateral do Rebaixo no Fresamento Concordante	78
4.2.2. Dimensões da Rebarba formada pelo Gume Secundário na Lateral do Rebaixo no Fresamento Concordante	86
4.3. Comparativo Entre Fresamento Concordante e Discordante.....	94
4.4. Escolha dos Parâmetros de Corte com Melhor Resultado na Redução das Rebarbas	95

5. CONCLUSÕES.....	98
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
ANEXO I – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO DINAMÔMETRO.....	104
ANEXO II – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO AMPLIFICADOR	105
ANEXO III – PLANO DE ENSAIOS.....	106
ANEXO IV – ANÁLISE QUÍMICA DA LIGA USINADA.....	107
ANEXO V – IMAGENS DOS CPs USINADOS (CORTE CONCORDANTE).....	108
ANEXO VI – IMAGENS DOS CPs USINADOS (CORTE DISCORDANTE).....	111
ANEXO VII – RESULTADOS GERAIS (CORTE DISCORDANTE).....	114
ANEXO VIII – RESULTADOS GERAIS (CORTE CONCORDANTE).....	116
ANEXO IX – CATÁLOGO DA FERRAMENTA DE CORTE.....	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos básicos de fresamento: (a) frontal e (b) periférico ou tangencial. Adaptado de (KÖNIG, 1990)	21
Figura 2 - Tipos de fresas de topo. Retirado de (MACEDO, 2001)	21
Figura 3 - Direções de corte no fresamento de topo. Retirado de (POLLI, 2005)	22
Figura 4 - Plano de cisalhamento durante a formação do cavaco. Adaptado de (DINIZ, 2001).....	23
Figura 5 - Representação da espessura do cavaco no fresamento lateral (a) concordante e (b) discordante	24
Figura 6 – Representações típicas de rebarba. Adaptado de (GILLESPIE, 1999)....	25
Figura 7 - Medição de uma rebarba. Adaptado de (NIKNAM; ZEDAN; SONGMENE, 2014).....	26
Figura 8 - Representação do mecanismo de formação da rebarba em corte ortogonal. Adaptado de (KO; DORNFELD, 1996).....	27
Figura 9 – Ilustração do processo de formação da rebarba em corte ortogonal. Adaptado de (HASHIMURA; DORNFELD, 1999).....	27
Figura 10 - Representação da rebarba (a) tipo Poisson, (b) tipo Roll over e (c) tipo Tear. Adaptado de (Gillespie & Blotter, 1976 a)	29
Figura 11 - Localização das rebarbas. Adaptado de (Gillespie, 1976 b)	30
Figura 12 - Formação de rebarba em alguns processos de usinagem. Adaptado de (NAKAYAMA; ARAI, 1987).....	31
Figura 13 - Transição de rebarba primária para secundária num rebaixo lateral com fresa de topo. Adaptado de (OLVERA; BARROW, 1996).	32
Figura 14 - Morfologia das rebarbas primárias em fresamento de faceamento. Adaptado de (CHERN, 1993).....	33
Figura 15 – Medição do ângulo de saída (AS). Adaptado de (CHERN, 2006).....	33
Figura 16 - Efeito de velocidade de corte na altura da rebarba. (a) Rebarba 1 e 9 adaptado de (OLVERA; BARROW, 1996). (b) Rebarba 1 adaptado de (NIKNAM; SONGMENE, 2013).	34

Figura 17 - Efeito do avanço da altura da rebarba. (a) Rebarba 1 e 9 adaptado de (OLVERA; BARROW, 1996). (b) Rebarba 1 adaptado de (NIKNAM; SONGMENE, 2013).	35
Figura 18 - Efeito do avanço da profundidade de corte na rebarba 1. (a) Adaptado de (OLVERA; BARROW, 1996). (b) Adaptado de (NIKNAM; SONGMENE, 2013).	36
Figura 19 - Formas de rebarbas primárias devido a sequência de saída do gume. Adaptado de (CHERN, 2006; HASHIMURA; HASSAMONTR; DORNFELD, 1999).	37
Figura 20 - Transição de rebarba primária para secundária com diferentes AS. Adaptado de (CHERN, 2006).	38
Figura 21 - Relação geométrica da interface ferramenta/peça.	38
Figura 22 - Componentes da força de usinagem F_x , F_y e F_z e plataforma piezelétrica.	40
Figura 23 - Componentes da força de usinagem nas direções x , y e z . Adaptado de (NIKNAM, 2013).	40
Figura 24 - Representação esquemática, CP submetido a fresamento de rebaiços laterais e localização das rebarbas analisadas	41
Figura 25 - Representação esquemática do corpo de prova (a) antes do fresamento e (b) fresado no sentido concordante e discordante.	43
Figura 26 - Fresa inteiriça de topo reto com dois gumes	46
Figura 27 – (a) Centro de Usinagem Haas VF3 e (b) fresa de metal duro montada em cone hidráulico para altas rotações	46
Figura 28 - Sistema de aquisição e tratamento dos sinais de forças	47
Figura 29 – Peça montada sobre o dinamômetro e indicação dos eixos de referência	49
Figura 30 - Montagem do dinamômetro, da morsa, do CP e do bico de ar comprimido	49
Figura 31 - Rotina de desbaste antes do ensaio	51
Figura 32 - Roteiro de execução para os ensaios de fresamento	51
Figura 33 - Microscópio óptico (Leica, modelo DM300)	52
Figura 34 – Medição de espessura da rebarba formada pelo gume principal no fresamento discordante, com microscópio óptico focado na crista da rebarba	54

Figura 35 - Seleção de intervalo para cálculo das médias de F_{YN} e F_{YP}	55
Figura 36 - Rebarba do tipo primária formada pelo gume principal no fresamento discordante.....	58
Figura 37 – Rebarba do tipo secundária formada pelo gume principal no fresamento discordante.....	59
Figura 38 - Efeito dos parâmetros de corte em AGP_D, com 95% de IC.....	61
Figura 39 - Efeito da interação de $f_z \cdot a_e$ em AP_D, com 95% IC	61
Figura 40 - Gráfico de dispersão e regressão linear F_{zN} x AGP_D, com 95% de IC .	63
Figura 41 - Efeito dos parâmetros de corte em EGP_D, com 95% de IC.....	64
Figura 42 - Efeito da interação $f_z \cdot a_e$ na EGP_D, com 95% de IC.....	65
Figura 43 - Efeito da interação $a_p \cdot a_e$ na EGP_D, com 95% de IC.....	65
Figura 44 - Efeito da interação $f_z \cdot a_p$ na EP_D, com 95% de IC.....	65
Figura 45 - Gráfico de dispersão e regressão linear F_{zN} x ET_D, com 95% de IC	66
Figura 46 - Atuação da ferramenta no fresamento com condições de interação: (a) discordante com $a_e = 1/4D$ e discordante/ concordante (b) com $a_e = 3/4D$	67
Figura 47 - Rebarba formada pelo gume secundário do tipo secundária em corte discordante.....	68
Figura 48 - Rebarba formada pelo gume secundário, do tipo primária e em forma de onda.	69
Figura 49 - Efeito dos parâmetros de corte em AGS_D, com 95% de IC.....	72
Figura 50 - Efeito da interação $f_z \cdot a_p$ em HL_D com 95% de IC.....	72
Figura 51 - Efeito da interação $f_z \cdot a_e$ em AS_D com 95% de IC.....	73
Figura 52 - Efeito da interação $a_p \cdot a_e$ em AS_D com 95% de IC	73
Figura 53 - Gráfico de dispersão e regressão linear F_{YN} x AS_D, com 95% de IC....	74
Figura 54 - Efeito dos parâmetros de corte em EGS_D, com 95% de IC.....	76
Figura 55 - Efeito da interação $f_z \cdot a_p$ em EGS_D com 95% de IC.....	76
Figura 56 - Gráfico de dispersão e regressão linear F_{zN} x EGS_D, com 95% de IC .	77

Figura 57 - Sentido de corte concordante	78
Figura 58 - Rebarba formada pelo gume principal em corte concordante.....	79
Figura 59 - Efeito dos parâmetros de corte em AGP_C, com 95% de IC.....	81
Figura 60 - Efeito da interação $f_z \cdot a_p$ em AGP_C com 95% de IC.....	81
Figura 61 - Efeito da interação $v_c \cdot f_z$ em AGP_C com 95% de IC	82
Figura 62 - Gráfico de dispersão e regressão linear F_{zN} x AGP_C, com 95% de IC .	83
Figura 63 - Efeito dos parâmetros de corte na EGP_C, com 95% de IC.....	84
Figura 64 - Efeito da interação $f_z \cdot a_e$ em EGP_C com 95% de IC.....	85
Figura 65 - Gráfico de dispersão e regressão linear F_{zN} x EGP_C, com 95% de IC .	86
Figura 66 - Rebarba formada pelo gume secundário em fresamento concordante...	87
Figura 67 - Efeito dos parâmetros de corte na AGS_C, com 95% de IC.....	88
Figura 68 - Efeito da interação $f_z \cdot a_e$ em HL_C com 95% de IC.....	89
Figura 69 - Gráfico de dispersão e regressão linear F_{xP} x AGS_C, com 95% de IC .	90
Figura 70 - Efeito dos parâmetros de corte na EGS_C, com 95% de IC.....	91
Figura 71 - Efeito da interação $f_z \cdot a_e$ em EGS_C com 95% de IC.....	92
Figura 72 - Efeito da interação $f_z \cdot v_c$ em EGS_C com 95% de IC	92
Figura 73 - Gráfico de dispersão e regressão linear F_{zP} x EGS_C, com 95% de IC .	93
Figura 74 - Dimensões médias das rebarbas nos sentidos de corte concordante e discordante.....	94
Figura 75 - Imagem dos CPs com melhor resultado em redução de rebarbas	97
Figura 76 – Resultado da instabilidade do corte no fresamento concordante e discordante.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de corte selecionados	43
Tabela 2 - Composição química da liga de alumínio ensaiada comparada ao padrão ASTM para a liga AA6070T4. Adaptado de ASTM International Handbook Vol.2.....	44
Tabela 3 - Medidas de dureza da liga de alumínio testada	45
Tabela 4 - Dados de ANOVA para <i>AGP_D</i>	60
Tabela 5 - Análise de regressão linear das componentes de força com <i>AGP_D</i>	62
Tabela 6 - Dados de ANOVA para <i>EGP_D</i>	64
Tabela 7 – Análise de regressão linear das componentes de força com <i>EGP_D</i>	66
Tabela 8 - Dados de ANOVA para <i>AGS_D</i>	71
Tabela 9 - Análise de regressão linear das componentes de força com <i>AGS_D</i>	74
Tabela 10 - Dados de ANOVA para <i>EGS_D</i>	75
Tabela 11 - Análise de regressão linear das componentes de força com <i>EGS_D</i>	77
Tabela 12 - Dados de ANOVA para <i>AGP_C</i>	80
Tabela 13 - Análise de regressão linear das componentes de força com <i>AGP_C</i>	82
Tabela 14 - Dados de ANOVA para <i>EGP_C</i>	84
Tabela 15 - Análise de regressão linear das componentes de força com <i>EGP_C</i>	85
Tabela 16 - Dados de ANOVA para <i>AGS_C</i>	88
Tabela 17 - Análise de regressão linear das componentes de força com <i>AGS_C</i>	89
Tabela 18 - Dados de ANOVA para <i>EGS_C</i>	91
Tabela 19 - Análise de regressão linear das componentes de força com <i>EGS_C</i>	93
Tabela 20 – Escolha dos parâmetros de corte com melhor resultado em redução das dimensões da rebarba.....	95
Tabela 21 - Seleção dos parâmetros de corte.....	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a_e Largura de corte [mm]

a_p Profundidade de corte [mm]

f_z Avanço por dente [mm/z]

h_{max} Espessura máxima do cavaco [mm]

v_c Velocidade de corte [m/min]

AGP_C Altura da rebarba formada pelo gume principal no fresamento concordante [μm]

AGP_D Altura da rebarba formada pelo gume principal no fresamento discordante [μm]

AGS_C Altura da rebarba formada pelo gume secundário no fresamento concordante [μm]

AGS_D Altura da rebarba formada pelo gume secundário no fresamento discordante [μm]

AS Ângulo de saída da aresta de corte [$^\circ$]

CP Corpo de prova

D Diâmetro da fresa [mm]

EGP_C Espessura da rebarba formada pelo gume principal no fresamento concordante [μm]

EGP_D Espessura da rebarba formada pelo gume principal no fresamento discordante [μm]

EGS_C Espessura da rebarba formada pelo gume secundário no fresamento concordante [μm]

EGS_D Espessura da rebarba formada pelo gume secundário no fresamento discordante [μm]

F_x Força de corte na direção x [N]

F_y Força de corte na direção y [N]

F_z Força de corte na direção z [N]

F_{xP} Valores positivos da força de corte na direção x [N]

F_{xN} Valores negativos da força de corte na direção x [N]

F_{yP} Valores positivos da força de corte na direção y [N]

F_{yN} Valores negativos da força de corte na direção y [N]

F_{zP} Valores positivos da força de corte na direção z [N]

F_{zN} Valores negativos da força de corte na direção z [N]

γ Ângulo da superfície de saída da ferramenta [°]

ϕ Ângulo de cisalhamento principal [°]

ϕ' Ângulo de cisalhamento negativo [°]

ϕ'_0 Ângulo de cisalhamento negativo inicial [°]

φ Arco de contato da aresta de corte com a peça [°]

1. INTRODUÇÃO

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. Precisão dimensional com estreitas tolerâncias, qualidade de acabamento da superfície usinada e bordas livres de rebarba tem sido exigido no produto final. Indústrias do ramo automobilístico e aeroespacial, por exemplo, buscam alta qualidade dos produtos de acordo com as especificações de projeto e com menor custo possível. Para se enquadrar nestes requisitos, os processos de usinagem precisam ser bem entendidos e seus parâmetros otimizados.

As ligas de alumínio tem importante participação na produção de peças e componentes nos setores automobilístico e aeroespacial, são consideradas de fácil usinabilidade quando o desgaste de ferramenta e os esforços de usinagem são analisados. 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. Rebarbas são projeções remanescentes de material além da borda da peça devido a deformação plástica ocorrida na usinagem. Seu surgimento pode gerar desvios dimensionais e problemas de montagem em conjuntos mecânicos.

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, parâmetros de corte, instabilidade dinâmica dos processos de usinagem (vibrações) e flutuação das forças de usinagem.

Os estudos sobre a formação de rebarbas envolvem os fenômenos que ocorrem durante sua formação, sua caracterização e classificação, os efeitos das variáveis envolvidas e a escolha adequada dos parâmetros para sua redução ou eliminação. Os trabalhos sobre o assunto muitas vezes têm como objetivo reduzir as dimensões das rebarbas, a fim facilitar os processos de rebarbação e prever o tipo de processo necessário para a rebarbação. Nos processos de rebarbação são utilizadas desde ferramentas manuais abrasivas até sistemas automatizados instalados na linha

de produção, sendo considerados custos que não agregam valor ao produto. Estudos mostram que os custos com rebarbação e acabamento na fabricação de componentes de precisão constituem em média 30% do custo total da peça.

O fresamento é um importante processo de usinagem que 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.

O presente trabalho tem como objetivo estudar a formação da rebarba utilizando um processo de fresamento de topo reto em uma liga de alumínio. Através do fresamento de um rebaixo lateral, é analisada a influência dos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e largura de corte) na formação das rebarbas em diferentes regiões do rebaixo. Além da influência dos parâmetros de corte, buscou-se apontar qual combinação de parâmetros de corte que apresenta melhor resultado quanto a redução das dimensões das rebarbas.

Foi analisado o comportamento das componentes da força de usinagem F_x , F_y e F_z , buscando relacionar seu comportamento com as dimensões das rebarbas geradas durante o fresamento.

Este trabalho apresenta no Capítulo 2 o embasamento teórico básico onde o trabalho foi fundamentado, bem como subsídios teóricos necessários ao leitor. No Capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada para a realização dos ensaios. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos dos ensaios e as discussões relacionando estes resultados com a teoria. No Capítulo 5 são feitas as conclusões finais. Finalmente, no Capítulo 6, são sugeridos temas para realização de trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Processo de Fresamento

O fresamento é uma operação de usinagem destinada a remoção de material caracterizada pelo movimento relativo entre a peça e uma ferramenta multicortante (ou múltiplos gumes) chamada fresa. O movimento de avanço é definido como sendo o movimento relativo entre a peça e a fresa, podendo ser executado tanto pela peça, como também pela fresa (depende da concepção da máquina ferramenta). O movimento de corte é propiciado pela fresa que gira em torno de seu eixo. A velocidade de corte é função do diâmetro da fresa e da rotação (DINIZ, 2001; STEMMER, 1995). Em decorrência da rotação da fresa e do movimento de avanço a ação de cada gume é intermitente, estando cada um cortando num percurso menor que a metade da circunferência da fresa. Os gumes são submetidos a impactos periódicos toda vez que o gume entra na peça. Devido ao movimento relativo entre a trajetória do gume e a trajetória de avanço, a espessura da remoção de material (cavaco) varia constantemente (KÖNIG, 1990; TRENT; WRIGHT, 2000).

As operações de fresamento são realizadas em diferentes tipos de máquinas-ferramenta, elas se classificam conforme a posição do seu eixo árvore em relação à mesa onde a peça é fixada. Podem ser do tipo horizontal com eixo-árvore paralelo à mesa, do tipo vertical com eixo-árvore perpendicular à mesa e universal que pode ser adaptada aos outros dois tipos. A grande variedade de máquinas, bem como de ferramentas disponíveis, fazem com que o fresamento seja uma operação que permite obter altas taxas de remoção de material e seja versátil, no que se refere as possibilidades de geometrias que podem ser geradas (DINIZ, 2001).

Distinguem-se dois tipos básicos de fresamento: o *fresamento frontal* que é destinado a obtenção de superfície plana perpendicular ao eixo de rotação da máquina, conforme **Figura 1 (a)**, e o *fresamento periférico (ou tangencial)* destinada à obtenção de superfícies paralelas ao eixo da ferramenta, conforme **Figura 1 (b)** (FERRARESI, 1995).

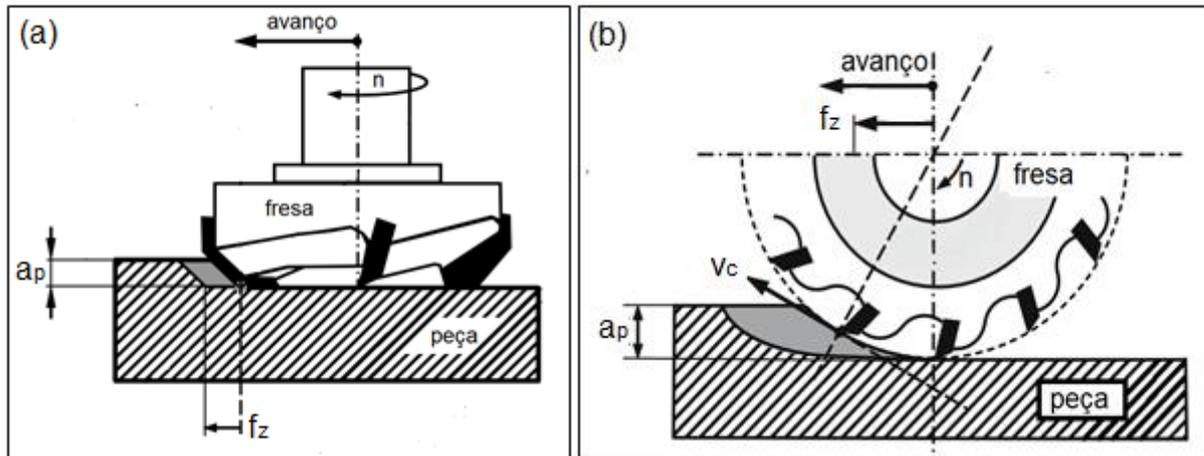


Figura 1 - Tipos básicos de fresamento: (a) frontal e (b) periférico ou tangencial. Adaptado de (KÖNIG, 1990)

O fresamento de topo é um tipo de fresamento frontal que utiliza uma ferramenta chamada fresa de topo. São usadas para facear, ranhurar, executar cavidades, rebaixos, matrizes, gravações, rasgos de todos os tipos e tamanhos e fresar contornos. As fresas de topo do tipo inteiriças possuem gumes na parte frontal, chamado gume secundário, e na parte lateral ou periférica, chamado gume principal. Possui uma vasta variedade de tamanhos e formas padronizadas, possuem dois, três, quatro ou mais canais, o topo pode ser reto, semiesférico ou toroidal. Também podem ser fabricadas para pastilhas intercambiáveis (STEMMER, 1995). A **Figura 2** mostra alguns tipos existentes.

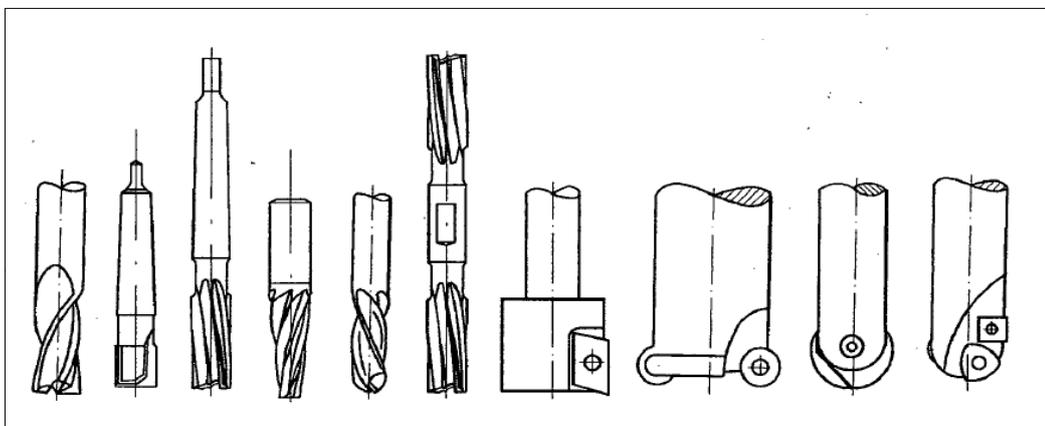


Figura 2 - Tipos de fresas de topo. Retirado de (MACEDO, 2001)

De acordo com o sentido de corte o fresamento de topo pode ser concordante ou discordante. No fresamento concordante (termo em inglês “*down milling*”), os movimentos de corte e de avanço tem, em média, o mesmo sentido, iniciando-se o corte com a espessura máxima e terminando com espessura teoricamente igual a zero. No fresamento discordante (termo em inglês “*up milling*”), os movimentos de corte e avanço tem, em média, sentidos opostos, iniciando-se o corte com espessura mínima teoricamente igual a zero e terminando com espessura máxima. Nos casos em que houver interação da ferramenta com a peça maior que metade do diâmetro da ferramenta ($1/2D$), o corte é chamado combinado, havendo simultaneamente corte concordante e discordante (DINIZ, 2001; FERRARESI, 1995; STEMMER, 1995). A **Figura 3** representa as três direções de corte.

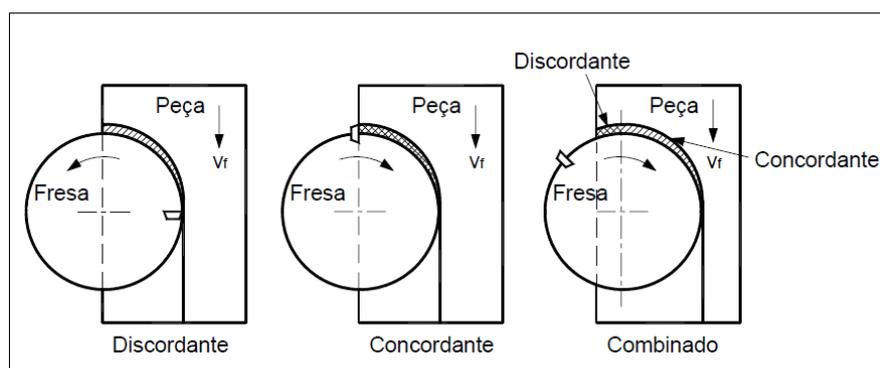


Figura 3 - Direções de corte no fresamento de topo. Retirado de (POLLI, 2005)

Como característica do corte discordante, na entrada do gume o material da peça é deformado elásticamente e plasticamente por compressão, até atingir uma espessura mínima em que inicia a remoção do material. O resultado é um desgaste abrasivo mais acentuado do gume na entrada da peça, devido a um atrito excessivo numa superfície que pode ter sido encruada pela passagem do gume anterior. Além disto pode haver adesão de cavaco na face da ferramenta, devido as altas compressões, gerando o chamado gume postiço que prejudica o acabamento da superfície usinada e até mesmo quebrar a ferramenta (DINIZ, 2001).

Como vantagens do fresamento concordante em relação ao discordante podemos citar o menor desgaste da ferramenta de corte, melhor qualidade da superfície

usinada, menor força e potência de avanço (STEMMER, 1995). Porém, em casos em que o material tem superfície endurecida, iniciar o corte com espessura máxima pode gerar desgaste por lascamentos da ferramenta.

2.2. Mecanismo de Formação do Cavaco

O corte do material e, conseqüentemente, a formação de cavaco envolve o cisalhamento deste material ao longo de um plano chamado plano de cisalhamento (zona primária de cisalhamento). A partir da representação de um corte ortogonal, o qual a superfície de corte é paralela ao movimento de corte, a **Figura 4** mostra o ângulo formado entre o plano de cisalhamento e a direção de corte, chamado ângulo de cisalhamento (ϕ). Quanto maior a deformação do cavaco sendo formado, menor o ângulo de cisalhamento e maior serão os esforços gerados durante o corte. Esta influência é marcante nos materiais dúcteis que possuem alta deformabilidade (DINIZ, 2001).

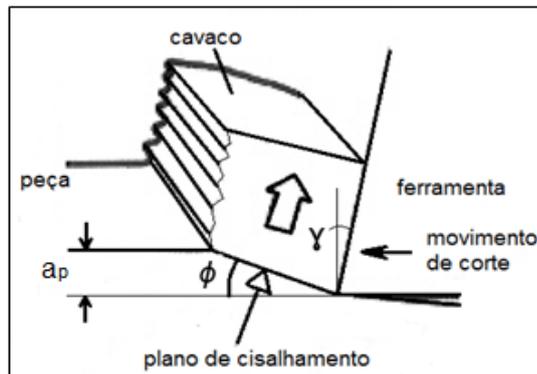


Figura 4 - Plano de cisalhamento durante a formação do cavaco. Adaptado de (DINIZ, 2001).

De uma maneira geral a formação do cavaco se processa da seguinte forma (FERRARESI, 1995):

- a) Devido a penetração da ferramenta na peça, antes de haver ruptura, o material começa a ser recalcado na face da ferramenta, superfície que possui ângulo γ com a normal à superfície de corte.

- b) O material recalçado começa a sofrer deformação plástica progressiva até as tensões de cisalhamento se tornarem grandes o suficientes, iniciando um deslizamento entre o material recalçado e a peça. Este deslizamento se realiza segundo os planos de cisalhamento cristalinos do material recalçado. Durante a usinagem estes planos que são formados instantaneamente irão definir uma região entre a peça e o cavaco, chamada *região de cisalhamento* ou *zona de cisalhamento primária*. Para fins matemáticos esta região é assimilada a um plano, dito *plano de cisalhamento* definido por um ângulo ϕ com a direção de corte
- c) Continuando a penetração da ferramenta na peça, ocorre a ruptura na região de cisalhamento. Para materiais dúcteis esta ruptura se desenvolve próximo ao gume gerando um cavaco contínuo. Para materiais frágeis a ruptura se propaga para longe do gume gerando um cavaco cisalhado.
- d) Seguindo o movimento de corte da ferramenta, o material cisalhado (cavaco) escorregará pela face da ferramenta que apresenta um ângulo γ com a normal à direção de corte Este fenômeno de formação do cavaco seguirá ocorrendo de forma periódica.

O cavaco gerado pelo fresamento de topo tem formato de vírgula, com espessura de corte variando de um valor mínimo (teoricamente igual à zero) a um valor máximo (corte discordante) ou de um valor máximo até um mínimo (corte concordante), conforme **Figura 5**. Sua espessura máxima pode ser estimada pela equação $h_{max} = f_z x \text{sen}\phi$, onde ϕ é o arco de contato entre o gume e a peça, variando de zero à 90°.

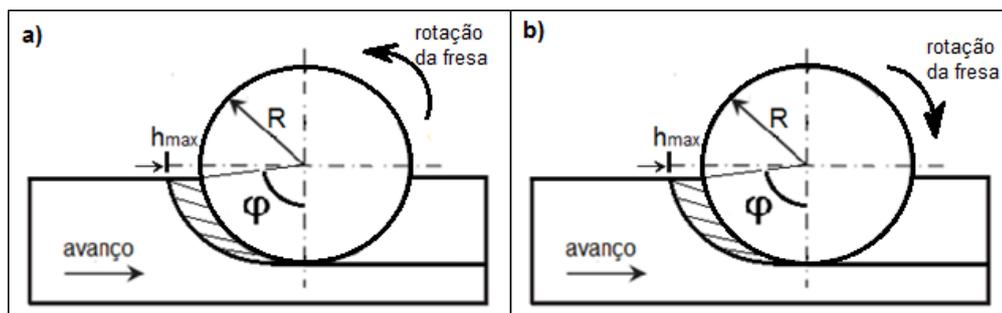


Figura 5 - Representação da espessura do cavaco no fresamento lateral (a) concordante e (b) discordante

2.3. Formação das Rebarbas

2.3.1. Definições

Existem muitos autores e normas que definem a rebarba, a norma (ISO 13750, 2000) define rebarba como restante de material encontrado fora da forma geométrica nominal externa, deixado como resíduo de usinagem ou de outro processo de fabricação. Segundo (ASTME, 1959) as rebarbas são projeções indesejadas do material da peça formada na frente da aresta de corte devido à deformação plástica durante a usinagem. (OLVERA; BARROW, 1996) definiram como sendo uma projeção indesejada de material para além da borda da peça devido a deformação plástica ocorrida durante a usinagem. Já (AVILA; DORNFELD, 2004) definiram rebarba de forma mais completa e muito utilizada 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 6** mostra representações típicas de rebarbas projetadas além da borda da peça, a terceira representação é de uma rebarba negativa (termo em inglês “*break out*”) típica de materiais frágeis.

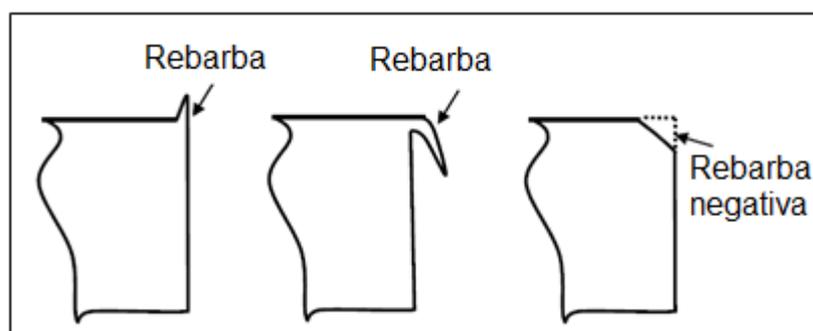


Figura 6 – Representações típicas de rebarba. Adaptado de (GILLESPIE, 1999).

Conforme a revisão apresentada por (AURICH; DORNFELD, 2009), uma forma de descrever a rebarba é através de um termo chamado *tamanho da rebarba* (“*burr value*”), onde os parâmetros de rebarba são analisados através de uma seção transversal como mostra a **Figura 7**. Porém, para chegar no tamanho da rebarba (g) são necessários adquirir muitos valores sendo alguns de difícil medição, além do tempo consumido para o trabalho. Do ponto de vista da rebarbação o valor g não é

eficiente na seleção do melhor método, por isto de todos os parâmetros a altura (b_h) e a espessura (b_t) da rebarba são mais usadas na determinação da dificuldade em removê-las.

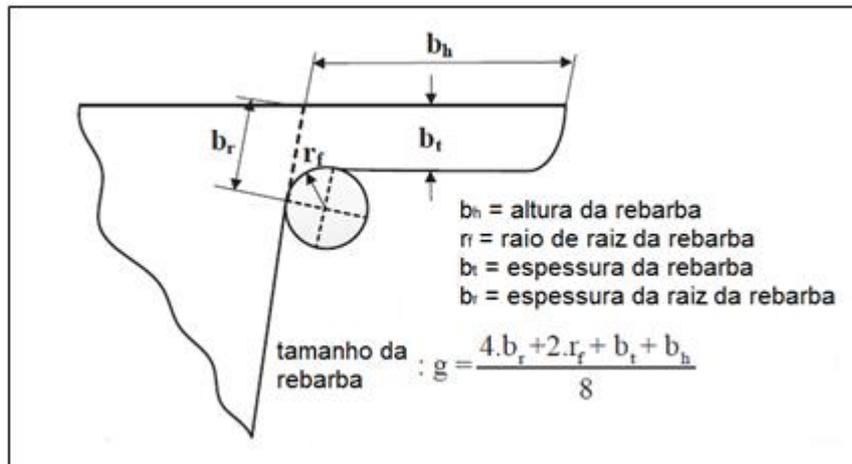


Figura 7 - Medição de uma rebarba. Adaptado de (NIKNAM; ZEDAN; SONGMENE, 2014).

2.3.2. Mecanismo de Formação da Rebarba

O fenômeno de formação da rebarba é similar ao da formação do cavaco. Através da análise do corte ortogonal é possível visualizar como se desenvolve a formação dos dois fenômenos ao mesmo tempo, sendo que este mecanismo pode ser utilizado para análise no fresamento de topo. (KO; DORNFELD, 1996) propuseram um modelo de um mecanismo de formação da rebarba conforme a **Figura 8**. O ponto **A** é o início do processo de formação da rebarba surgindo o ângulo negativo de cisalhamento inicial (ϕ'_0) medido da reta **AB**. Neste momento é cessada a formação de cavaco havendo somente deformação plástica da superfície da peça em frente ao gume. Na medida em que a ferramenta se desloca até o ponto **A'**, o ângulo de cisalhamento negativo gira até sua posição final (ϕ') pivotado num ponto fixo **B**, chamado ponto de pivotamento. (HASHIMURA; DORNFELD, 1999) apresentam de forma ilustrativa o processo de formação da rebarba dividido em etapas, conforme **Figura 9**.

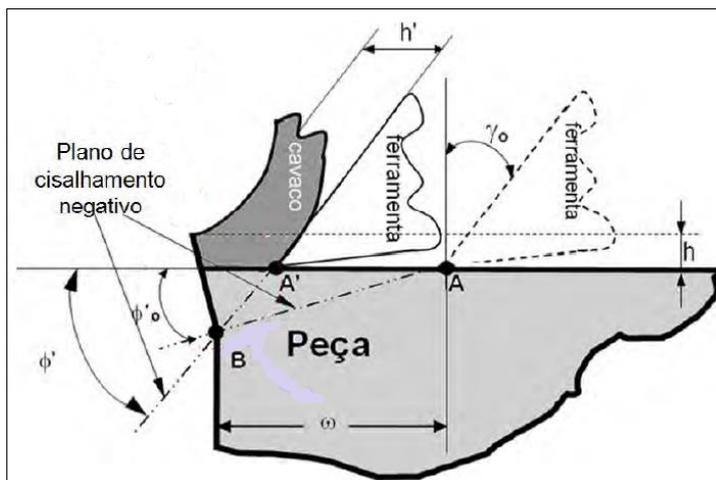


Figura 8 - Representação do mecanismo de formação da rebarba em corte ortogonal. Adaptado de (KO; DORNFELD, 1996).

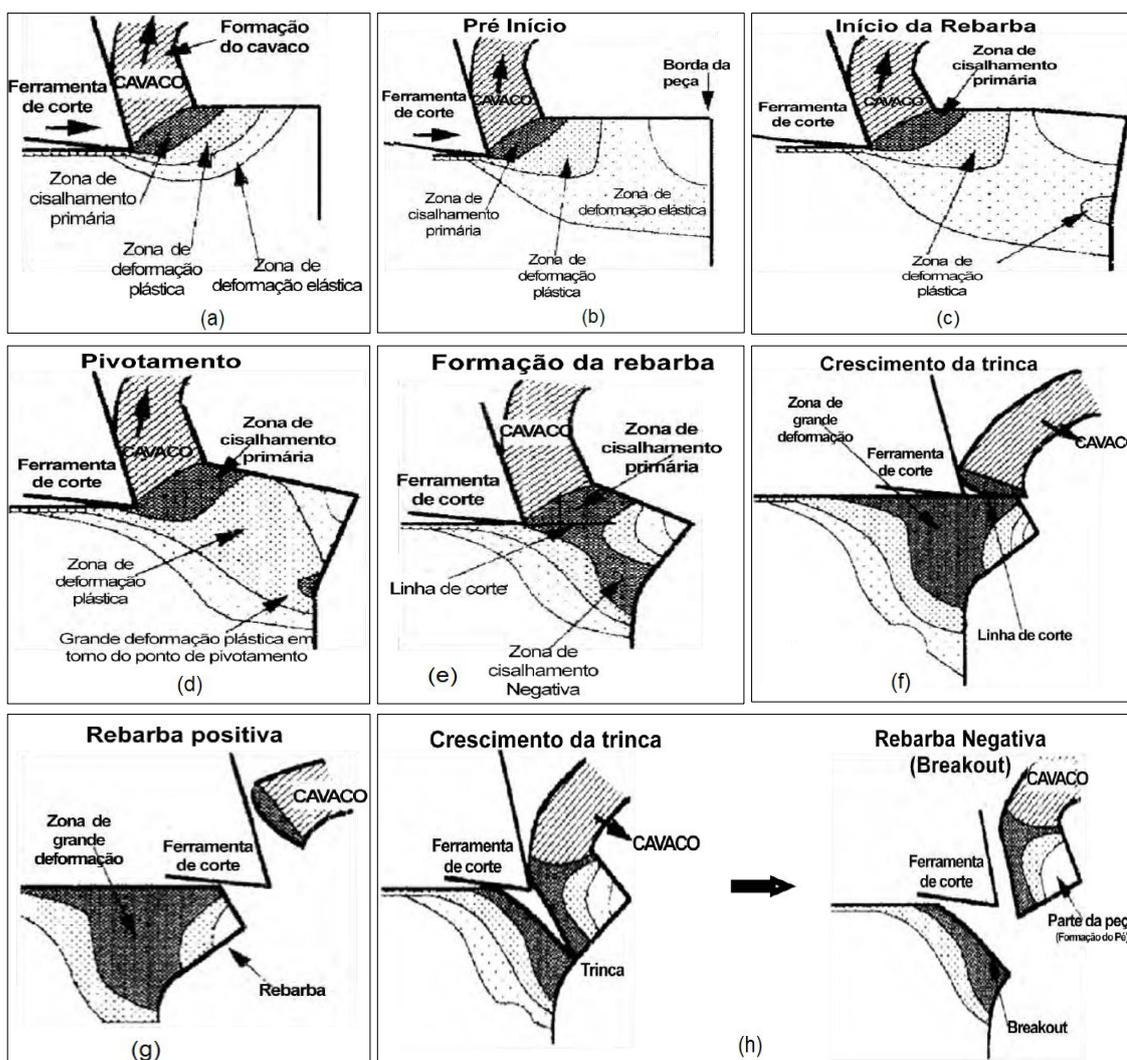


Figura 9 – Ilustração do processo de formação da rebarba em corte ortogonal. Adaptado de (HASHIMURA; DORNFELD, 1999).

- (a) – Nesta primeira etapa não se tem formação de rebarba, ainda há material suficiente na frente da ferramenta resistindo à deformação. O cavaco se forma de maneira contínua se for material dúctil, ou quebradiça se for material duro.
- (b) – O Pré-início da rebarba começa quando a ferramenta atinge o ponto **A** (**Figura 8**), a partir daí a região elástica, que se forma à frente da região plástica originada da zona de cisalhamento primária, atinge a borda de saída da peça. Então, a zona de deformação elástica começa a abranger a borda da peça.
- (c) – É dado o início da formação de rebarba, onde o campo plástico, formado à frente da zona de cisalhamento primária, é aumentado e há uma inclinação da borda da peça. Nesse momento já não há material suficiente à frente da ferramenta para resistir as deformações.
- (d) – Surge o ponto de pivotamento (ponto **B** da **Figura 8**), iniciando-se uma inclinação da borda da peça em trono deste ponto. Começa uma redução das forças de corte, devido as deformações plásticas ocorridas.
- (e) – Surge a zona de cisalhamento negativa. Devido as deformações plásticas serem muito intensas, a zona de cisalhamento primária se une ao ponto de pivotamento.
- (f) – Começa a surgir a trinca que separa o cavaco da rebarba. Em materiais dúcteis essa trinca forma-se no plano de cisalhamento primário.
- (g) – A propagação da trinca se completa e o cavaco é separado da peça. A deformação da rebarba continua até a ferramenta deixar de tocar a peça.
- (h) – No caso de materiais frágeis, a trinca se desenvolve no plano de cisalhamento negativo no sentido do ponto de pivotamento. Assim, todo o material que se encontra sobre o plano de cisalhamento é destacado da peça, esse descolamento é chamado de "*break out*". Este tipo de borda formada é chamada de rebarba negativa.

2.3.3. Classificação da Rebarba

Os tipos de rebarba que se formam nos processos de usinagem são descritos por diversos autores, mas (GILLESPIE; BLOTTER, 1976) estão entre os primeiros a

descrever os diferentes tipos de rebarba e seu mecanismo de formação, seu trabalho ainda é muito utilizado para classifica-las. Três tipos básicos de rebarba foram identificados por eles: tipo *Poisson*, tipo *Roll over* e tipo *Tear*. A rebarba tipo *Poisson* mostrada na **Figura 10(a)** é resultado da protuberância lateral causada pela compressão do material pela ferramenta (representada pelo cilindro) até que a deformação plástica ocorra, neste caso quanto maior a elasticidade ou ductilidade do material maior será sua deformação e, conseqüentemente, maior a formação de rebarba. A rebarba tipo *Roll over* mostrada na **Figura 10(b)** é essencialmente um cavaco que vai sendo empurrado para frente do caminho da ferramenta ao invés de ser cisalhado. A rebarba tipo *Tear* mostrada na **Figura 10(c)** é resultado de processos que geram um arrancamento do material da peça ao invés de cisalhamento.

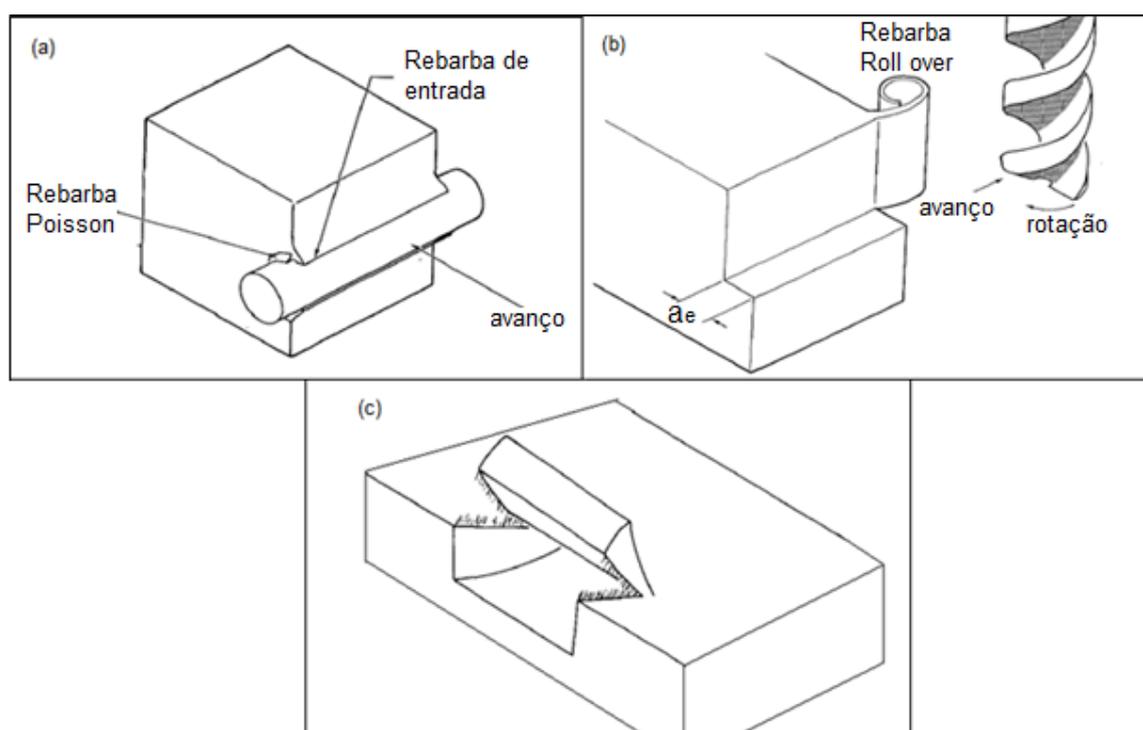


Figura 10 - Representação da rebarba (a) tipo Poisson, (b) tipo Roll over e (c) tipo Tear. Adaptado de (Gillespie & Blotter, 1976 a)

(Gillespie, 1976 b) ainda classificou as rebarbas quanto a localização na borda da peça num rebaixo com fresa de topo, conforme **Figura 11**. Onde a rebarba (1) é do tipo *Poisson* e é formada pelo gume principal, as rebarbas (3) e (9) são do tipo *Roll*

over e formadas pelos gumes principal e secundário, respectivamente, e a rebarba (5) é uma variação entre *Poisson* e *Roll over* sendo formada pelo gume secundário.

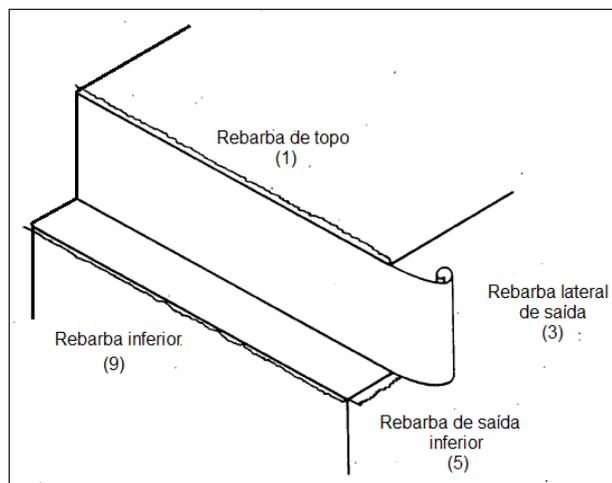


Figura 11 - Localização das rebarbas. Adaptado de (Gillespie, 1976 b)

Segundo (NAKAYAMA; ARAI, 1987), do ponto de vista prático e tecnológico, as rebarbas são mais convenientemente classificadas pelo gume diretamente responsável por sua formação e também pelo modo e direção da formação. A **Figura 12** mostra as regiões de formações de rebarba em alguns processos de usinagem, bem como o gume responsável pela formação da rebarba. Analisando especificamente o fresamento de canais, nota-se que a rebarba na borda superior do canal é formada pela compressão do gume secundário, gerando deformação plástica do material que flui lateralmente pela borda (C-S). Já a rebarba da borda inferior na saída da ferramenta é formada pelo gume principal, gerando deformação plástica do material que flui para frente na direção de deslocamento do gume. Agora, analisando o fresamento de faceamento com corte ortogonal, nota-se que, assim como no fresamento de canais, a formação de rebarba por deformação plástica com fluxo lateral, porém formado pelo gume principal (M-S).

(WANG; ZHANG, 2004), aplicando um processo de fresamento de topo, ainda classificaram a rebarba de faceamento em dois tipos: rebarbas formadas devido a direção de avanço e devido a direção de corte.

(KISHIMOTO W, MIYAKE T, YAMAMOTO A, YAMANAKA K, 1981) estudaram a rebarba tipo *Roll over* produzida na saída do gume principal de uma fresa de topo num processo de fresamento frontal. Eles introduziram os termos de rebarba *primária*, para identificar formações grandes, e rebarba *secundária*, para identificar formações pequenas que se desenvolvem ao longo da borda da peça. (OLVERA; BARROW, 1996) mostraram que há uma transição brusca de rebarba primária para secundária com o aumento da profundidade de corte, reduzindo a altura (H) da rebarba. Essa transição é mostrada na **Figura 13**, onde o gráfico mostra a altura da rebarba formada pelo gume secundário em um rebaixo lateral com fresa de topo.

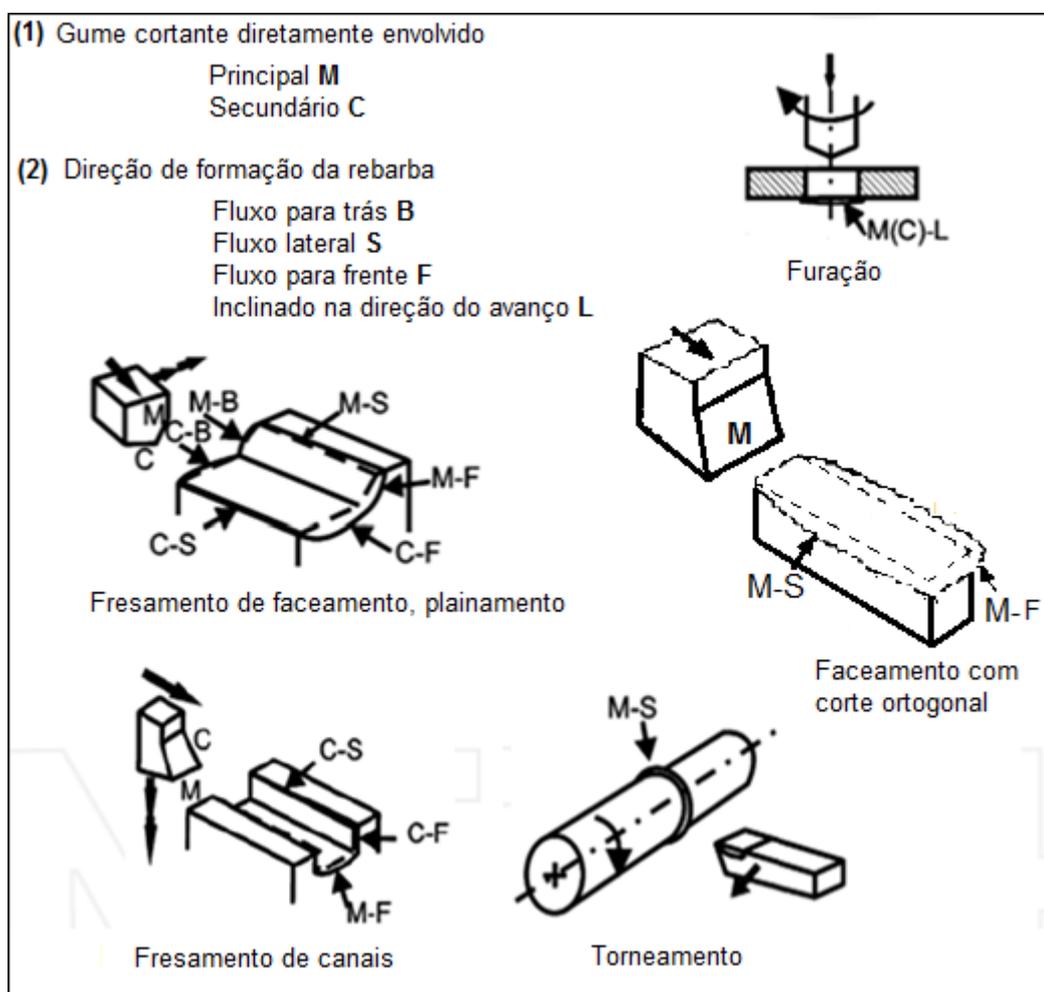


Figura 12 - Formação de rebarba em alguns processos de usinagem. Adaptado de (NAKAYAMA; ARAI, 1987).

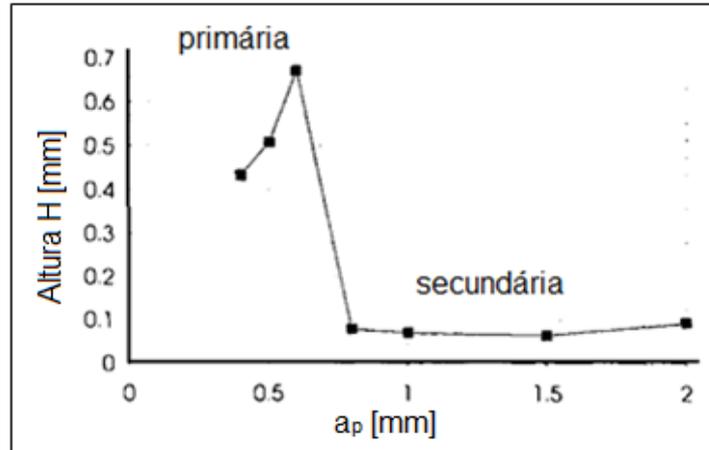


Figura 13 - Transição de rebarba primária para secundária num rebaba lateral com fresa de topo. Adaptado de (OLVERA; BARROW, 1996).

(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: tipo faca, tipo caracol e tipo onda. A **Figura 14** mostra a representação dos três tipos de morfologia da rebarba. (CHERN, 2006) em seu estudo em ligas de alumínio, verificou que o parâmetro mais influente na morfologia das rebarbas primárias formadas no fresamento de faceamento é o ângulo em que o gume sai da peça, chamado ângulo de saída da peça (AS). O AS é formado pela direção de corte e pela borda da peça na saída do gume. A **Figura 15** mostra como é medido o ângulo de saída, onde para $AS > 90^\circ$, o eixo da ferramenta estará sobre a superfície usinada, para $AS = 90^\circ$, o eixo da ferramenta estará sobre a borda da superfície usinada e, para $AS < 90^\circ$, o eixo da ferramenta estará fora da superfície usinada. (HASHIMURA; HASSAMONTR; DORNFELD, 1999) analisaram a influência da geometria da ferramenta de corte na formação da rebarba, mostrando que a sequência de saída do gume pela borda da peça é fator determinante na forma da rebarba. Portanto, o AS do gume pela borda da peça é dependente do engajamento da ferramenta (a_e) e da geometria da ferramenta.

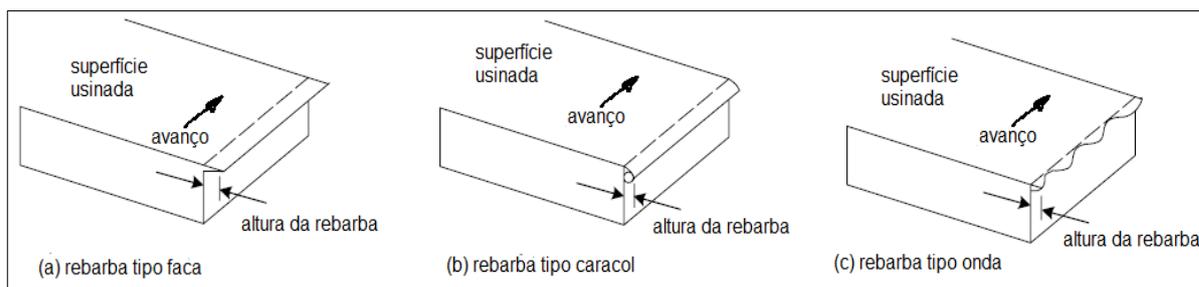


Figura 14 - Morfologia das rebarbas primárias em fresamento de faceamento. Adaptado de (CHERN, 1993).

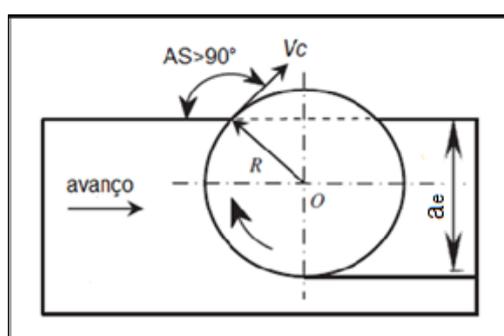


Figura 15 – Medição do ângulo de saída (AS). Adaptado de (CHERN, 2006).

2.2.4 Efeito dos Parâmetros de Corte na Formação da Rebarba

Os parâmetros de corte são muito estudados pois estão diretamente relacionados com a formação da rebarba. Entre os fatores influentes podemos citar: material da peça (geometria, dimensões e propriedades mecânicas), parâmetros de regulagem de máquina (velocidade de corte, avanço, profundidade de corte), ferramenta de corte (geometria e material), máquina-ferramenta (capacidade de rotação, estabilidade dinâmica), estratégias de usinagem (caminho da ferramenta, refrigeração). São muitos os efeitos de interação entre os parâmetros citados, tornando complexo o estudo da formação de rebarba, uma vez que uma simples alteração de regulagem de máquina ou troca de material altera consideravelmente formação da rebarba (NIKNAM; ZEDAN; SONGMENE, 2014). 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).

Velocidade de corte (v_c): Quando a velocidade de corte é aumentada o atrito entre cavaco e ferramenta diminui, conseqüentemente há um acréscimo no ângulo de cisalhamento primário e redução da espessura do cavaco, o que significa que a deformação plástica associada a formação do cavaco (grau de recalque) é reduzida. Isto refletirá no tamanho da rebarba (OLVERA; BARROW, 1996). O autor apresenta na **Figura 16(a)** um resultado de redução da altura das rebarbas 1 e 9 (ver **Figura 11**) devido ao aumento da velocidade de corte num fresamento de topo, o material estudado foi um aço AISI 1040. A mesma tendência não foi encontrada por (NIKNAM; SONGMENE, 2013) na usinagem de canais em diferentes ligas de alumínio onde utilizou velocidades de corte elevadas, conforme **Figura 16b)**. Na verdade, tanto o primeiro quanto o segundo não encontraram variações significativas na formação da rebarba.

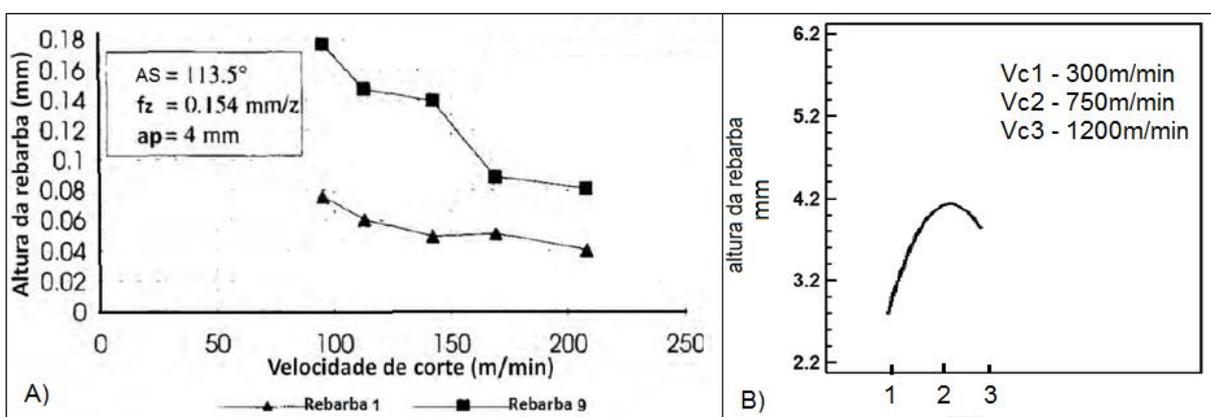


Figura 16 - Efeito de velocidade de corte na altura da rebarba. (a) Rebarba 1 e 9 adaptado de (OLVERA; BARROW, 1996). (b) Rebarba 1 adaptado de (NIKNAM; SONGMENE, 2013).

Avanço (f_z): o avanço influencia de forma diferente em cada tipo de atuação da ferramenta. Analisando as rebarbas que se formam devido a entrada do gume na peça, o avanço tem forte influência na formação da rebarba. Isto se deve, segundo (OLVERA; BARROW, 1996), ao chamado efeito de aragem (*ploughing*). Quando o gume está entrando na peça e ainda sem cisalhamento, o material começa a ser deformado plasticamente e empurrado para baixo do gume, quanto maior for esta deformação maior será a formação de rebarba. Se o avanço for baixo, a ferramenta leva mais tempo para começar a cisalhar o material, aumentando a formação de rebarba. Se o avanço for alto, o cisalhamento ocorre mais rapidamente, reduzindo o

efeito “*ploughing*”. Neste caso a rebarba tende a diminuir. No caso em que a rebarba é formada devido a saída do gume da peça, o efeito “*ploughing*” não existe, pois o corte estará se dando de forma contínua, ocorrendo o inverso do que ocorre na entrada do gume. A rebarba neste caso tende a aumentar com o aumento do avanço, pois maior serão os atritos com a ferramenta, os esforços desenvolvidos e a temperatura de corte. (OLVERA; BARROW, 1996) e (NIKNAM; SONGMENE, 2013) encontraram comportamentos coerentes com a teoria do efeito “*ploughing*”, o primeiro ainda confirmou também o efeito do avanço na rebarba formada pela saída do gume. A **Figura 17** compara os resultados dos dois autores.

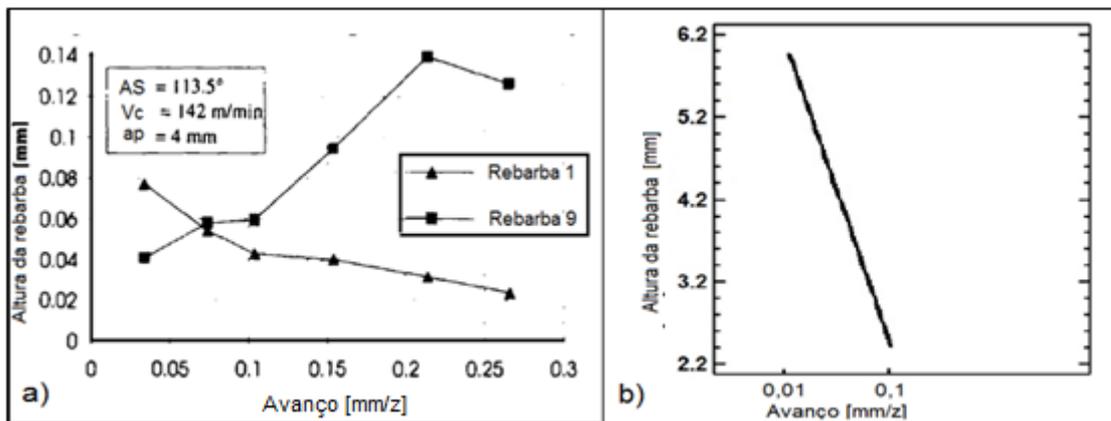


Figura 17 - Efeito do avanço da altura da rebarba. (a) Rebarba 1 e 9 adaptado de (OLVERA; BARROW, 1996). (b) Rebarba 1 adaptado de (NIKNAM; SONGMENE, 2013).

Profundidade de corte (a_p): considerando a formação da rebarba 1 (formada pelo gume principal, como mostrado na figura 11), quando a_p aumenta, a quantidade de material a ser deslocado pelo gume também aumenta proporcionalmente, o que restringe a possibilidade do material fluir na direção do gume, resultando num fluxo lateral de material e perpendicular ao gume, que é justamente a rebarba de *Poisson* (OLVERA; BARROW, 1996). A **Figura 18(a)** ajuda a entender este mecanismo mostrando a tendência de aumento da altura da rebarba num aço AISI 1040 na medida em que a_p aumenta. Porém este aumento, muitas vezes, não é tão significativo, como mostra a **Figura 18(b)** que é resultado de fresamento em ligas de alumínio estudado por (NIKNAM; SONGMENE, 2013). O processo de formação da rebarba 9 é distinto da rebarba 1, seu mecanismo de formação é do tipo *Roll over* e suas dimensões são

significativamente afetadas por a_p . Para pequenas profundidades de corte formam-se rebarbas de tamanho grande ao longo da borda da peça, seu tamanho tem aproximadamente o valor de a_p e aumenta proporcionalmente com o aumento deste parâmetro. Estas rebarbas são chamadas rebarbas primárias. Quando a_p é aumentado até atingir um valor crítico, as dimensões da rebarba caem repentinamente passando a ter tamanhos pequenos e a profundidade de corte já não tem mais influência significativa o tamanho da rebarba. São chamadas rebarbas secundárias (CHERN, 2006; OLVERA; BARROW, 1996). Este assunto já tinha sido introduzido anteriormente e a **Figura 13** apresenta o comportamento que foi descrito.

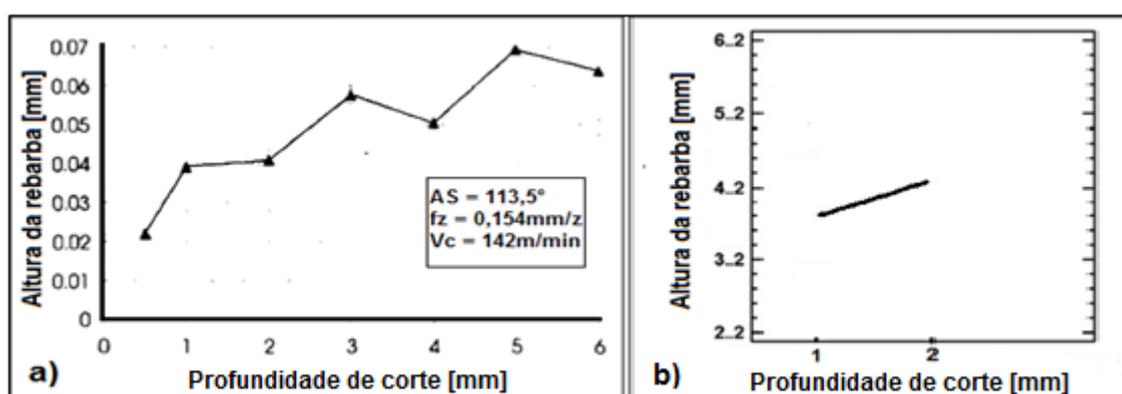


Figura 18 - Efeito do avanço da profundidade de corte na rebarba 1. (a) Adaptado de (OLVERA; BARROW, 1996). (b) Adaptado de (NIKNAM; SONGMENE, 2013)

Largura de corte (a_e): segundo (CHERN, 2006) o tipo de rebarba formada é altamente dependente da largura de corte, ou ângulo de saída (AS – figura 15) como se refere autor. Nos seus experimentos em diferentes ligas de alumínio, cinco tipos de rebarba foram encontrados: tipo faca, tipo caracol, tipo onda, tipo secundária e tipo *edge breakout*. As três primeiras são rebarbas primárias, de tamanhos grandes em relação as rebarbas secundárias. A última ocorre em avanços muito elevados, que não são aplicáveis a ligas de alumínio pois prejudicam a rugosidade. A rebarba tipo caracol forma-se com $AS < 60^\circ$, a rebarba tipo faca ocorre com $AS > 120^\circ$ e a rebarba tipo onda forma-se com $60^\circ < AS < 120^\circ$. Estas formações ocorrem devido uma rebarba tipo *Roll over* deixada pelo gume na borda *A-B*, conforme **Figura 19**. Então a força devido ao avanço do próximo gume dobrará esta rebarba na direção *B-C* e deixará uma nova rebarba *A-B* que será dobrada pelo próximo, ocorrendo este mecanismo

sistematicamente na direção do avanço. As mudanças de direção na saída do gume, também chamado “*sequência de saída do gume*” nos pontos A, B e C, mostrado na figura 19, fazem com que as rebarbas assumam formações distintas, ou seja, são variações de forma da rebarba primária. Através de mudanças nos parâmetros de corte, principalmente a_p , é possível reduzir suas dimensões tornando-as rebarbas secundárias. A **Figura 20** mostra profundidades de corte críticas, onde ocorre a transição de rebarba primária para secundária, para diferentes ângulos de saída e os respectivos formatos. Observa-se que para $AS=60^\circ$ o a_p crítico é menor que para $AS=120^\circ$, sendo que para $AS=150^\circ$ não houve transição para rebarba secundária.

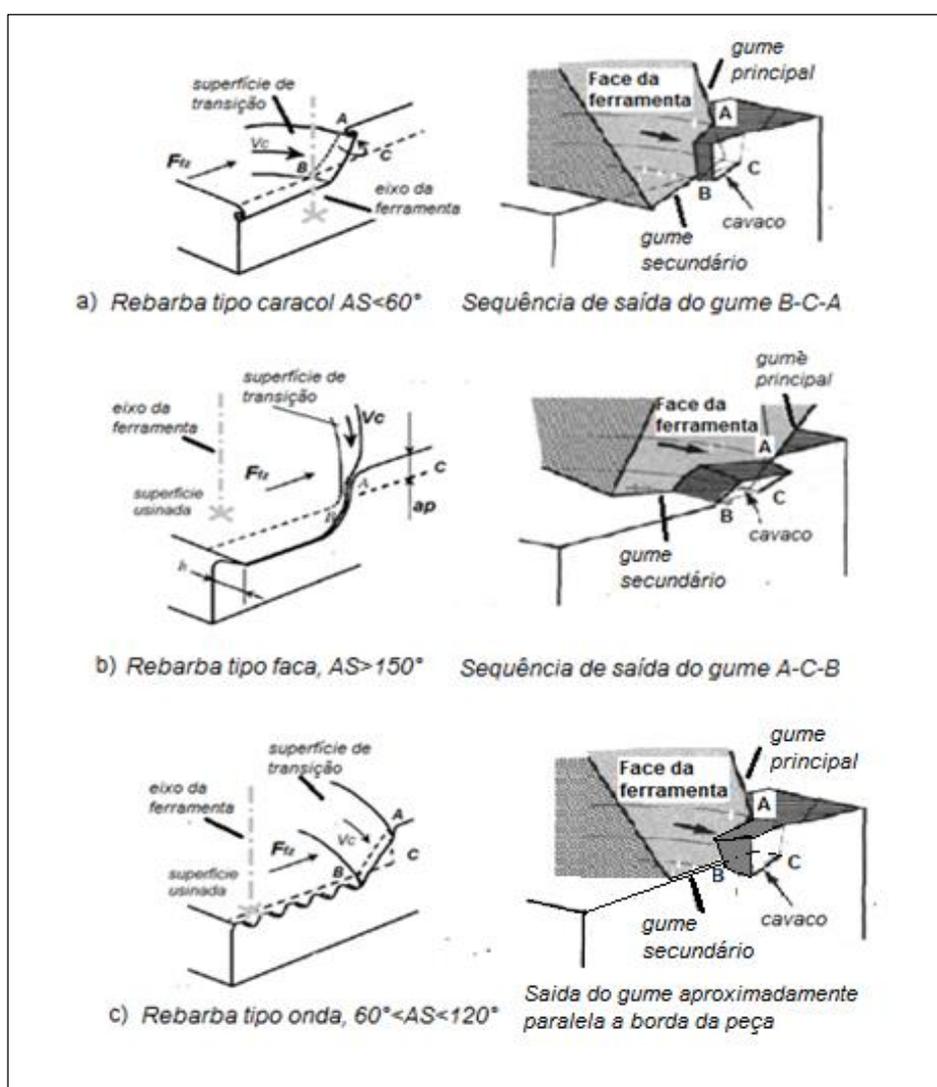


Figura 19 - Formas de rebarbas primárias devido a sequência de saída do gume. Adaptado de (CHERN, 2006; HASHIMURA; HASSAMONTR; DORNFELD, 1999).

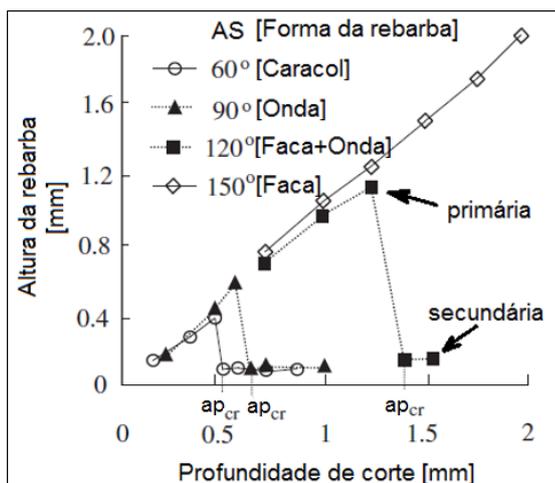


Figura 20 - Transição de rebarba primária para secundária com diferentes AS. Adaptado de (CHERN, 2006).

Conforme discutido na figura 19, a sequência de saída do gume secundário na borda da peça tem forte influência na formação da rebarba, sendo assim, a sequência com que o gume sai da peça não está somente relacionado com o engajamento da ferramenta a_e , mas também com a geometria de afiação da fresa (HASHIMURA; HASSAMONTR; DORNFELD, 1999). A **Figura 21** mostra a relação geométrica entre a ferramenta e a peça, onde β é o ângulo de saída radial e α é o ângulo de saída axial, onde se conclui que para um mesmo a_e , o gume poderá sair na borda da peça com diferentes sequências ABC, dependendo de sua afiação, principalmente dos ângulos β e α . Segundo (OLVERA; BARROW, 1996), o AS não pode ser determinado somente por a_e , mas também deve levar em conta o ângulo de saída radial.

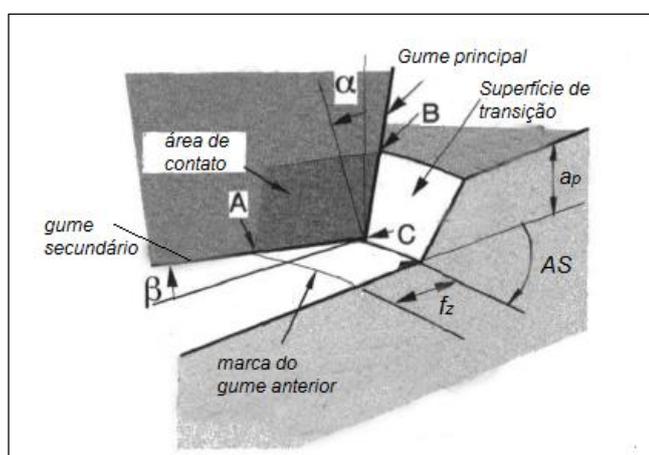


Figura 21 - Relação geométrica da interface ferramenta/peça.

2.4. Forças no Fresamento

Para gerar remoção de cavaco num processo de usinagem a ferramenta de corte deve empregar uma força sobre a peça. A reação da peça sobre a ferramenta é chamada força de usinagem. Porém, a direção e sentido desta força não é conhecida, sendo necessário conhecer suas componentes F_x , F_y e F_z . O conhecimento destas componentes da força de usinagem tem importância para projetos de elementos de máquinas, sistemas de fixação de ferramentas e peças, no planejamento de usinagem, na escolha dos parâmetros de corte, no conhecimento dos fenômenos do processo, na qualidade dimensional e da qualidade da superfície usinada, entre outros. (DINIZ, 2001; TRENT; WRIGHT, 2000).

A **Figura 22** apresenta um sistema de eixos de coordenadas, onde a força de usinagem está decomposta nas direções dos eixos cartesianos (x , y e z) para o processo de fresamento de topo. O sistema de eixos representado na figura 21 está definido pela rotação da fresa (eixo z), pela direção do avanço (eixo x) e pelo engajamento a_e (eixo Y). A componente F_x é a componente da força de fresamento na direção do movimento de avanço da ferramenta, a componente F_y é a componente da força de fresamento na direção do movimento de corte da fresa e a componente F_z é a componente da força de fresamento na direção do eixo da ferramenta.

A medição das componentes da força de usinagem foi facilitada pelo emprego de dinamômetros piezelétricos que são rígidos e apresentam uma sensibilidade adequada para os processos de usinagem. A peça a ser usinada pode ser fixada sobre a base do dinamômetro, de forma que os movimentos da fresa coincidam com os eixo do dinamômetro, como esquematizado na figura 21. Anteriormente os dinamômetros mais utilizados eram baseados em medições de deflexão elástica da ferramenta por extensômetros (*strain-gages*) (TRENT; WRIGHT, 2000). O ANEXO I apresenta a plataforma piezelétrica de medição de força que foi utilizada neste trabalho.

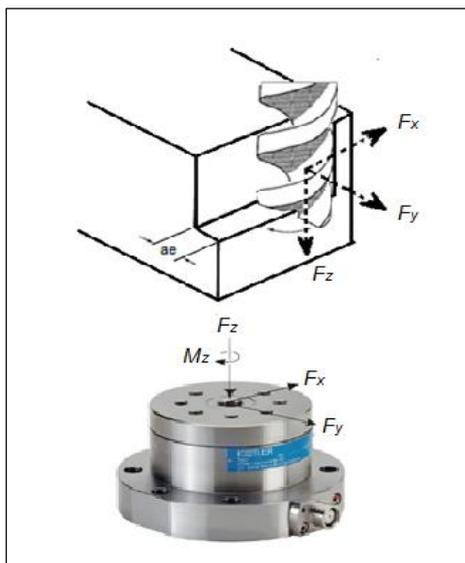


Figura 22 - Componentes da força de usinagem F_x , F_y e F_z e plataforma piezoeletrica.

As componentes da força de usinagem no fresamento tem um comportamento cíclico e são dependentes soma das componentes individuais momentâneas ao longo da passagem dos gumes ativos sobre a largura de engajamento a_e . A **Figura 23** mostra um comportamento típico das componentes de força de fresamento durante um processo de fresamento de canais com uma fresa de um único gume, devido ao movimento rotativo da fresa é possível notar que as forças variam entre valores positivos e negativos, de acordo com a posição do gume em relação a orientação do sistema de referência e a espessura de corte neste instante.

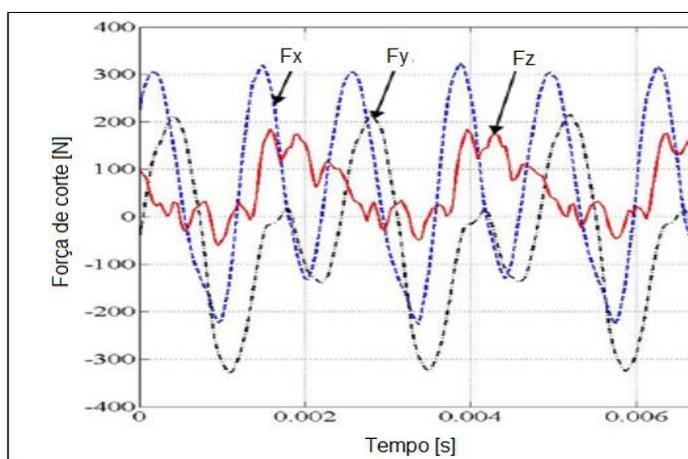


Figura 23 - Componentes da força de usinagem nas direções x , y e z . Adaptado de (NIKNAM, 2013).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para compreender a formação da rebarba em relação a variação dos diferentes parâmetros de usinagem (ou fatores de entrada) foram realizados ensaios que consistiram em fresamento de rebaiços laterais empregando uma fresa inteiriça 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, por este material apresentar uma formação de rebarbas acentuada no processo de fresamento. As dimensões dos corpos de prova foram adequados aos dispositivos de fixação empregado nos ensaios. Durante os ensaios de fresamento foram realizadas aquisições de sinais de força. 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 são ilustrados na **Figura 24**. A rebarba adjacente ao topo da fresa, formada pelo gume secundário da fresa na lateral do corpo de prova será chamada de rebarba lateral formada pelo gume secundário. A rebarba adjacente ao gume principal ao longo do comprimento do rebaiço fresado é denominada de rebarba lateral formada pelo gume principal. As rebarbas de saída (longitudinais - no sentido do avanço) do gume secundário e do gume principal não são avaliadas neste trabalho.

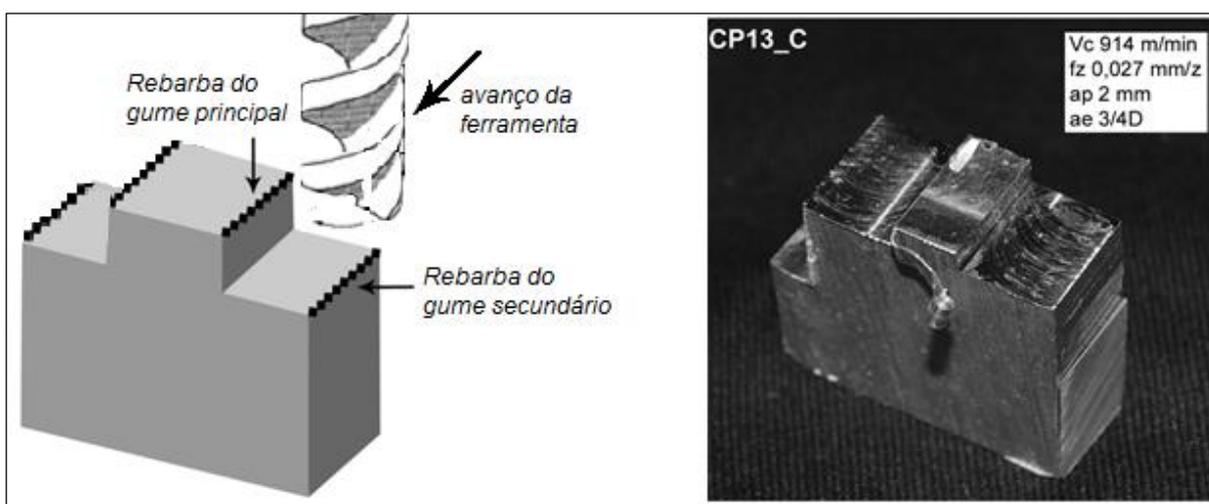


Figura 24 - Representação esquemática, CP submetido a fresamento de rebaiços laterais e localização das rebarbas analisadas

3.1. Planejamento Experimental

Um planejamento fatorial 2^k foi escolhido para elaborar o planejamento e delineamento experimental. O planejamento fatorial 2^k é utilizado quando muitos fatores precisam ser investigados com o menor número possível de ensaios (MONTGOMERY D., 2001). As etapas e rotinas da execução dos testes seguiram os seguintes passos: 1) Estudo e entendimento do problema; 2) Escolha das variáveis de entrada e seus respectivos níveis; 3) Escolhas das variáveis respostas; 4) Escolha do modelo estatístico para análise dos resultados; 5) Realização de pré-testes para análise prévia dos resultados, das rotinas e permitir realizar correções necessárias; 6) Execução dos testes; 7) Organização dos dados e análises; 8) Conclusões.

Visando focar no estudo da influência dos parâmetros de corte na formação da rebarba, o fresamento foi realizado sem utilização de fluido de corte e com geometria da ferramenta de corte constante. As variáveis de entrada escolhidas foram velocidade de corte (v_c), avanço por gume (f_z), profundidade de corte (a_p) e largura de corte (a_e). Optou-se por utilizar as quatro variáveis com objetivo de avaliar o maior número de parâmetros possível e identificar a influência de cada um na formação da rebarba. Os sentidos de corte concordante e discordante também foram investigados.

Para evitar um número muito grande de ensaios, foram selecionados dois níveis de cada parâmetro. Para v_c considerou-se variá-la de níveis aplicados em máquinas convencionais até níveis aplicados em máquinas de alta velocidade. Para f_z utilizou-se níveis recomendados pelo fabricante da ferramenta e um nível acima deste. Para a_p buscou-se utilizar níveis em que fosse induzido desenvolvimento de forças de corte relativamente altas, para que os resultados de força ficassem bem acima dos níveis de ruídos contidos no sistema de aquisição. Para a_e utilizou-se um nível menor e outro maior que $1/2D$, visando principalmente analisar a influência da interação da ferramenta com a peça na formação da rebarba. Trabalhos anteriores mostraram que em avanços abaixo do recomendado pelo fabricante da ferramenta e baixas profundidades de corte formavam rebarbas finas, altas e largas, as quais chamaremos de rebarbas primárias. Este tipo de rebarba não é interessante do ponto de vista da medição de rebarba, pois por serem muito grandes e irregulares podem induzir a conclusões equivocadas. Autores como (CHERN, 2006) e (OLVERA;

BARROW, 1996) também apresentaram resultados em que baixas taxas de remoção formavam rebarbas primárias. A **Tabela 1** mostra os parâmetros de corte escolhidos para serem utilizados nos ensaios. Com o objetivo de analisar as diferenças na formação da rebarba, mesmo corpo de prova é executada uma operação de fresamento concordante e uma discordante, mantendo a mesma combinação dos demais parâmetros.

Tabela 1 - Parâmetros de corte selecionados

Fator	Nível	
	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	3/4 D

Assim, um planejamento fatorial completo 2^4 foi selecionado neste estudo, e foram executadas 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, conforme **Figura 25**, somando 96 ensaios. A sequência completa dos ensaios está no ANEXO III – PLANO DE ENSAIOS.

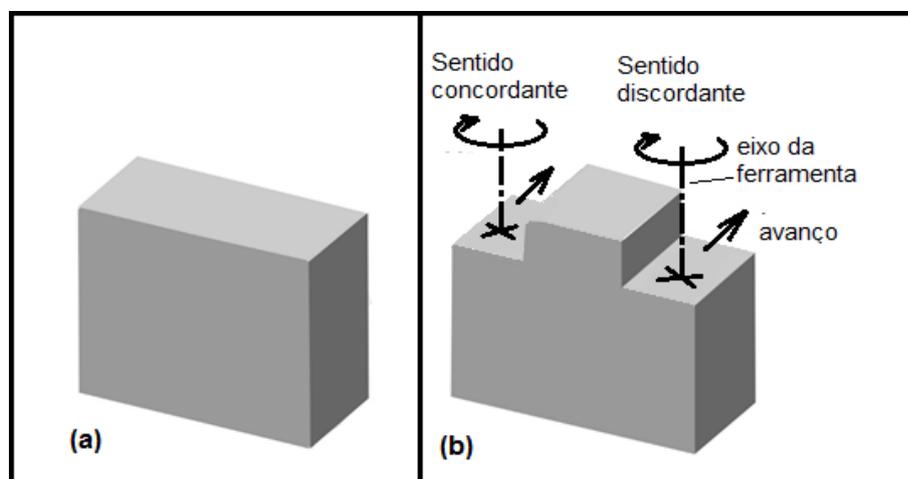


Figura 25 - Representação esquemática do corpo de prova (a) antes do fresamento e (b) fresado no sentido concordante e discordante.

3.2. Corpos de Prova (CPs)

Os CPs utilizados nos ensaios de fresamento foram fabricados em liga de alumínio AA6070 T4. Esta liga tem como principais elementos de liga o silício (Si) e o magnésio (Mg). Como não havia garantias da qualidade da liga, fez-se uma análise de sua composição química e comparou-se os resultados obtidos com composições químicas estabelecidas por norma, conforme mostrado na **Tabela 2**. A composição química da amostra disponível foi obtida por espectrometria em três amostras de material selecionados de forma aleatória, sendo que em cada amostra foram realizadas duas medidas em pontos diferentes. O espectrômetro utilizado foi da marca OXFORD INSTRUMENTS modelo FOUNDRY-MASTERS Pro. O resultado completo da espectrometria está apresentado no ANEXO IV – ANÁLISE QUÍMICA DA LIGA USINADA.

Tabela 2 - Composição química da liga de alumínio ensaiada comparada ao padrão ASTM para a liga AA6070T4. Adaptado de ASTM International Handbook Vol.2

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
AA6070 – T4 Aluminium Association	1,0 – 1,70	0,5	0,15 – 0,40	0,4 – 1,0	0,5 – 1,2	0,1	0,25
Liga de alumínio ensaiada	1,05	0,16	0,08	0,44	0,4	-	-

Para complementar a caracterização da liga usinada foi realizado ensaio de microdureza com parâmetros de medição HV 0,2 e 14s de endentação (**Tabela 3**). Para o ensaio foram escolhidas três amostras aleatórias de material e executadas três medições em pontos diferentes em cada amostra.

Apesar de os resultados mostrarem que os elementos secundários estarem abaixo do especificado em norma, os elementos principais (Si e Mg) estão dentro da faixa estabelecida em norma. Com estes resultados de composição química pode-se concluir que o material ensaiado trata-se de uma liga de alumínio trabalhada com composição próxima da liga AA6070. Os valores de dureza não permitem concluir que as amostras tenham sido submetidas a um tratamento de solubilização e envelhecimento natural (T4). Ligas com esta composição e sem o tratamento térmico

tem valores de dureza com a metade dos valores verificados nas amostras ensaiadas (ASM HANDBOOK, 2001).

Tabela 3 - Medidas de dureza da liga de alumínio testada

CP	Amostra	Dureza HV
1	1	102
	2	105
	3	103
2	4	109
	5	107
	6	107
3	7	109
	8	105
	9	103
	Média	105,6
	Desv. pad.	2,6

Os corpos de prova foram usinados nas dimensões: largura 20mm; altura 21mm; comprimento de aproximadamente 11mm.

3.3. Ensaio de Fresamento

Os ensaios de fresamento foram realizados num centro de usinagem 5 eixos HaasVF3 com potência de 50kW, rotação máxima do fuso 30.000RPM e precisão de deslocamento dos eixos 0,001mm. A potência instalada e a precisão de deslocamento dos eixos diminuem os efeitos da instabilidade dinâmica e erros dimensionais no fresamento. Foi utilizada uma fresa de topo reto do tipo inteiriça de metal duro com dois gumes, tendo as seguintes dimensões: diâmetro de 10mm, ângulo de hélice à direita de 30°, ângulo de saída passivo ao gume secundário 5,5°, ângulo de saída

ortogonal ao gume principal 9° , quina com chanfro de 45° e comprimento de 0,2mm, ângulo de direção do gume secundário (concavidade) de 1° à 2° . A **Figura 26** mostra uma imagem da fresa utilizada no trabalho, no ANEXO IX contém sua especificação completa. A ferramenta foi montada em um adaptador hidráulico, balanceado para rotações de até 40.000RPM e com interface ISO à máquina (SANDVIK COROMANT, 2010), conforme **Figura 27**. Foi verificado o batimento no corpo da fresa montada na máquina, empregando um relógio comparador fixado na estrutura do eixo árvore. A excentricidade medida de 0,012mm é típica para este tipo de montagem e fixação na máquina ferramenta (ARMAREGO; DESHPANDE, 1989).

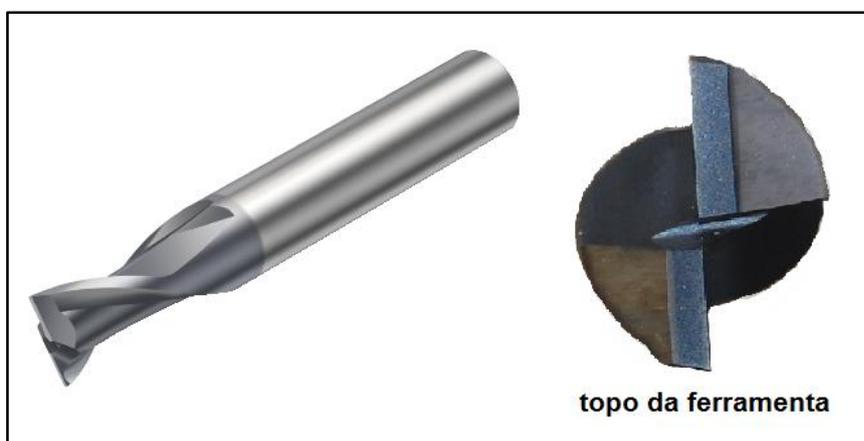


Figura 26 - Fresa inteira de topo reto com dois gumes

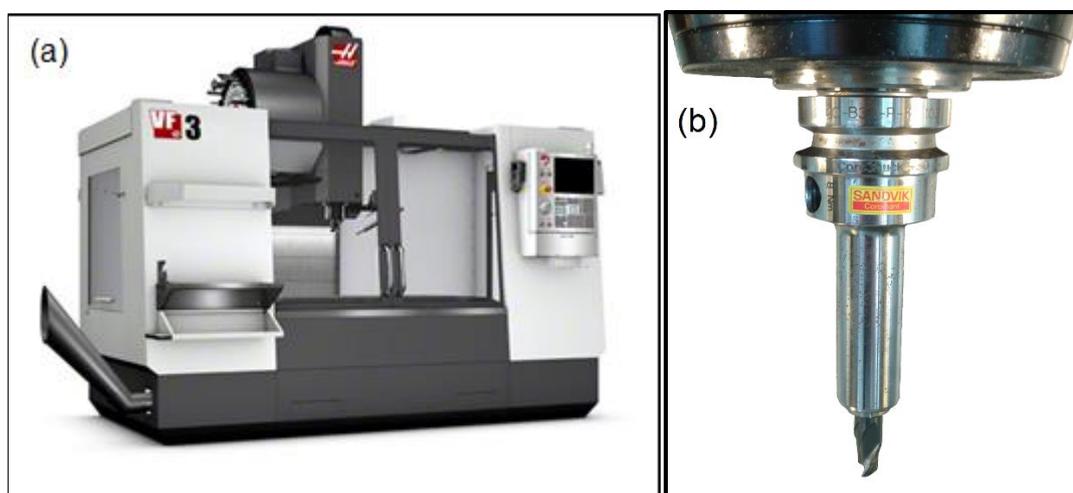


Figura 27 – (a) Centro de Usinagem Haas VF3 e (b) fresa de metal duro montada em cone hidráulico para altas rotações

O sistema de aquisição dos sinais de força que está representado de forma esquemática na **Figura 28** é composto por: um dinamômetro piezelétrico (ou célula de carga); um amplificador de sinais; placa de conversão de sinais analógicos para digitais; microcomputador equipado com programa de aquisição de sinais. A configuração e os ajustes do sistema foram os mesmos para todos os testes.

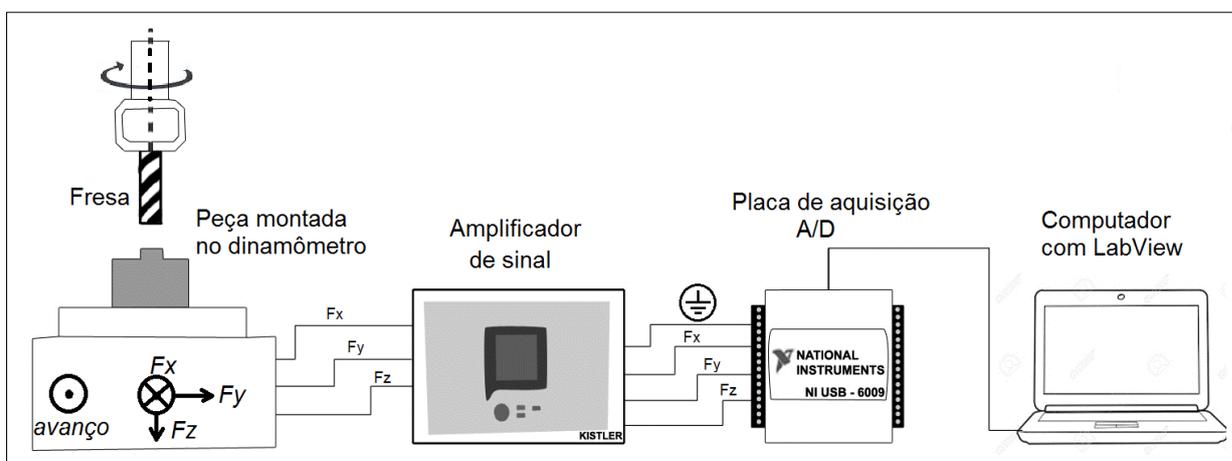


Figura 28 - Sistema de aquisição e tratamento dos sinais de forças

Foram utilizados três canais de força do dinamômetro (F_x , F_y e F_z). Cada canal possui uma sensibilidade adequada que precisa ser regulada conforme os níveis de força esperados no processo, ou seja, há uma sensibilidade adequada para uma faixa de valores de força desenvolvida durante o fresamento, a ser ajustada no amplificador em [pC/N] com base no certificado de calibração do dinamômetro (ANEXO I – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO DINAMÔMETRO).

A faixa de escala de força no amplificador foi regulada baseada na expectativa de forças desenvolvidas em cada canal, de forma que a faixa não ficasse nem muito pequena, podendo ultrapassar o limite máximo e ocasionar perda de dados, nem muito grande, de forma que as forças ultrapassassem pelo menos 30% da faixa. Assim, a regulação das faixas de escala foi escolhida baseada nos resultados de forças obtidos nos pré-testes, como segue:

- $F_x \longrightarrow 500\text{N};$
- $F_y \longrightarrow 1000\text{N};$
- $F_z \longrightarrow 1000\text{N}.$

A placa de aquisição A/D da NATIONAL INSTRUMENTS modelo NI USB-6009 com capacidade total de aquisição de 48kHz, foi configurada através do software LabView, instalado no microcomputador, para adquirir 16kHz por canal. Esta capacidade de aquisição foi escolhida para que fosse possível analisar as componentes da força de fresamento de forma mais detalhada possível considerando as limitações da placa. Nesta configuração foi possível adquirir 16 medições por ciclo de passada de dente (fresa com $Z=2$), na maior velocidade de corte.

O dinamômetro foi montado de forma que seus eixos coordenados coincidissem com os eixos da máquina. Este alinhamento foi verificado com auxílio de um relógio comparador, preso ao cabeçote do eixo árvore do centro de usinagem, deslizando o apalpador pelo deslocamento do eixo de coordenada respectivo da máquina ferramenta pela face plana de referência do dinamômetro. A **Figura 29** mostra o esquema de montagem da peça sobre o dinamômetro e como foram dispostos os eixos de referência para medição de forças em relação ao deslocamento da ferramenta: a força F_x possui direção do avanço, a força F_z a direção do eixo da ferramenta e a F_y é perpendicular às duas anteriores. O CP foi fixado através de uma morsa aparafusada sobre o dinamômetro, conforme a **Figura 30**. Um bico de ar comprimido foi instalado para auxiliar a expulsão do cavaco e evitar sua adesão à parede do rebaixo, principalmente para o fresamento discordante, visto que nos pré-testes ocorreram aderências apenas para o fresamento discordante.

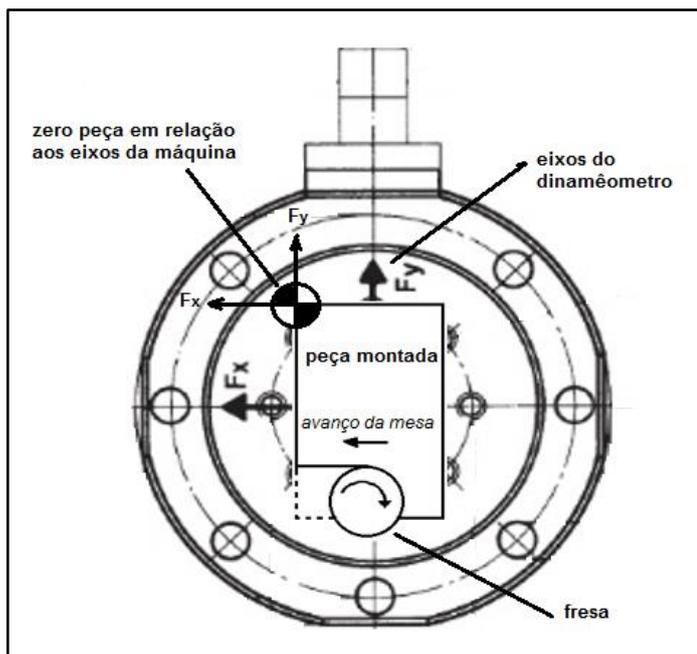


Figura 29 – Peça montada sobre o dinamômetro e indicação dos eixos de referência

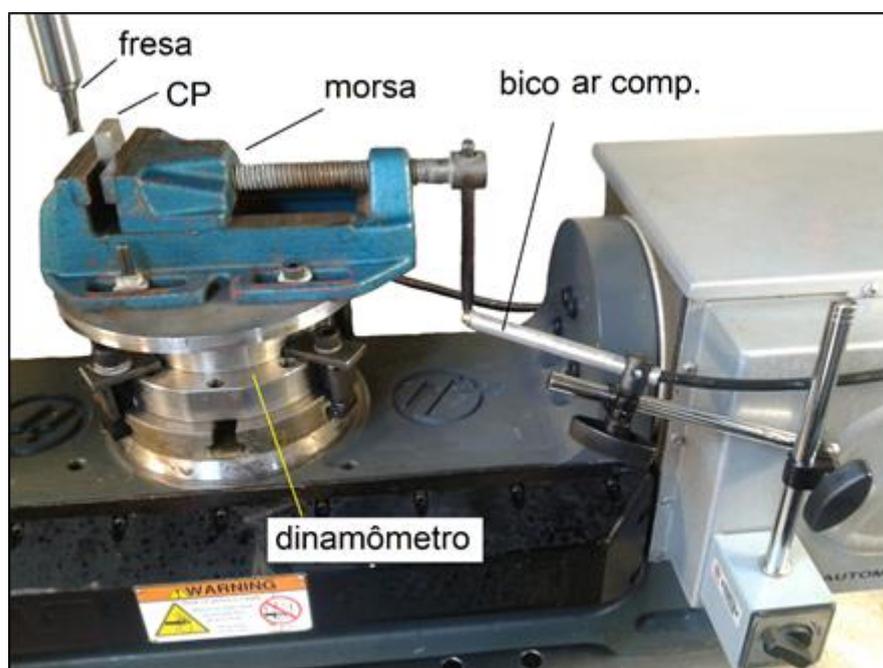


Figura 30 - Montagem do dinamômetro, da morsa, do CP e do bico de ar comprimido

Depois de montado todo o sistema de aquisição, foi feita uma verificação se o mesmo estava funcionando corretamente. Colocando uma massa padrão conhecida sobre a base do dinamômetro piezoelétrico, foi verificado se o valor de leitura no amplificador estava de acordo com o peso da massa, que corresponde ao canal do

eixo z . Para os eixos x e y , que estão no plano paralelo a base do dinamômetro piezoelétrico, foi utilizado um dinamômetro manual de mola. Verificou-se, então, que os valores indicados no sistema de aquisição correspondiam aos carregamentos de forças aplicados no dinamômetro de mola nas direções x e y . Desta forma, foi possível verificar que todos os canais de aquisição estavam funcionando corretamente, que a escolha da sensibilidade estava adequada nos amplificadores de carga e que o software LabVIEW estava funcionando normalmente.

Como já mencionado, os CPs precisaram passar por uma rotina de desbaste antes do ensaio de formação de rebarbas. Esta rotina de desbaste é executada com o corpo de provas montado, ajustando as dimensões para as dimensões desejadas e garantindo o paralelismo das faces e coincidência com o sistema de coordenadas da máquina ferramenta, para que a_e e a_p fossem constantes na trajetória da ferramenta durante o ensaio de fresamento. A **Figura 31** representa o caminho da ferramenta na rotina de desbaste, em vermelho as faces do CP que deveriam se desbastadas para garantir que a_p e a_e fossem constantes. As rotinas de desbaste foram executadas com ferramenta própria para o isto, não sendo usada a mesma ferramenta nos ensaios de formação de rebarba.

Feitas todas as verificações os ensaios de formação de rebarbas foram executados. O fluxograma da **Figura 32** resume a sequência de execução do ensaio. Com ajuda do roteiro apresentado no fluxograma e da programação CNC os ensaios puderam ser realizados de forma rápida e sistemática, o que colaborou também para a boa repetitividade dos resultados. A tempo gasto para executar uma rotina completa do fluxograma foi de, aproximadamente, 10min. Outra importante função do fluxograma foi tê-lo em mãos durante os ensaios, pois manter a sequência exata do roteiro era fundamental na execução do ensaio, sendo que um acionamento fora de sequência do amplificador ou LabVIEW, por exemplo, seria comprometedor para o resultado do ensaio.

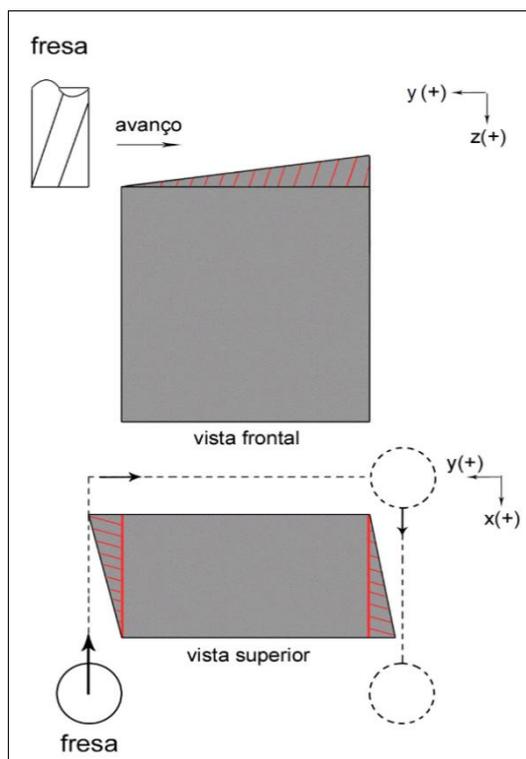


Figura 31 - Rotina de desbaste antes do ensaio

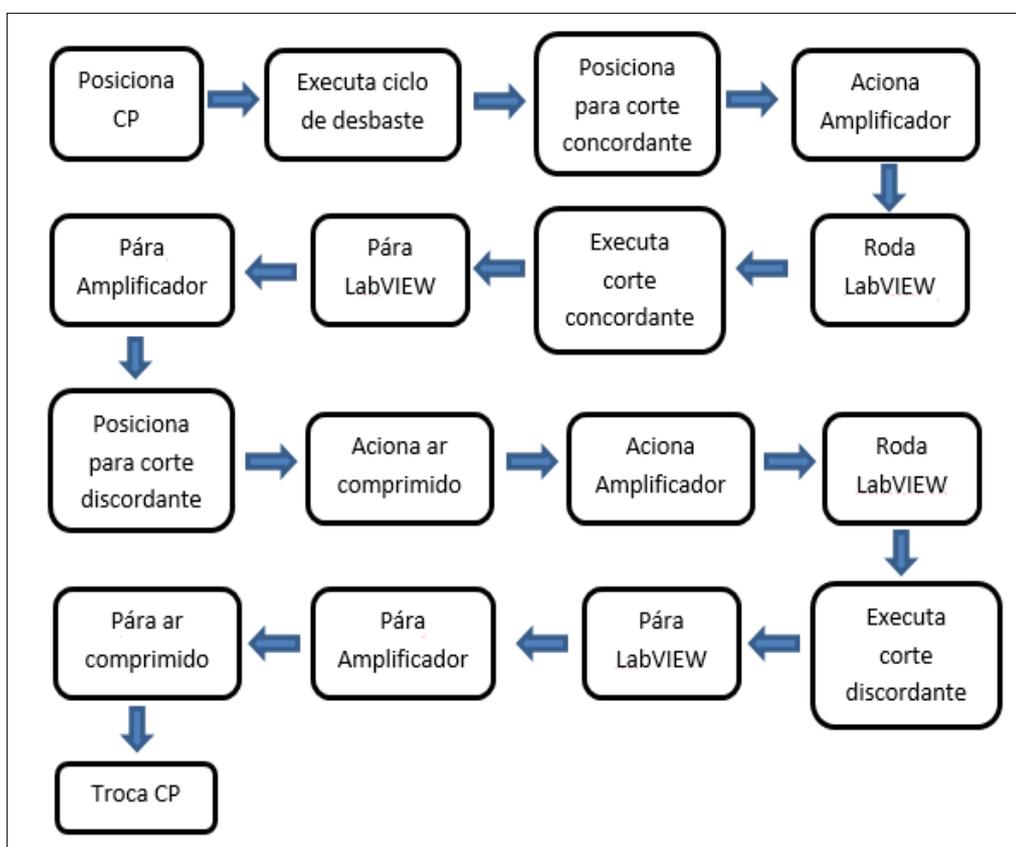


Figura 32 - Roteiro de execução para os ensaios de fresamento

3.4. Medição das Rebarbas

Depois dos ensaios de fresamento os CPs foram avaliados por microscopia óptica, **Figura 33**, onde foram executadas as medições de altura e espessura das rebarbas nas laterais do rebaixo. O microscópio tem aumento de até 1000x e é equipado com sistema de aquisição de imagem. A medição da altura da rebarba foi feita pela focagem da superfície de referência e deslocamento da objetiva até que a crista da rebarba estivesse focada, permitindo assim que se realizasse as medições. As regiões da entrada e da saída da ferramenta de aproximadamente 2 mm no rebaixo foram desconsideradas, por se tratarem de regiões onde o corte ainda não apresenta estabilidade. O restante do percurso foi percorrido, sob a objetiva de um microscópio, para observar a rebarba com um 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 da altura da rebarba.



Figura 33 - Microscópio óptico (Leica, modelo DM300)

A medida de altura foi efetuada por diferença de foco entre o material de base do CP e a crista da rebarba, como critério a altura foi considerada como sendo o maior valor encontrado na região medida sendo o foco da imagem obtido através do olho do

observador. O microscópio possui um manípulo com colar graduado para o ajuste de foco, com divisão de escala de $1\mu\text{m}$, o que permitiu realizar a medição com uma resolução de $1\mu\text{m}$. O valor da divisão de escala foi verificado com auxílio de um relógio comparador, sendo o apalpador posicionado na lente objetiva e movimentando o manípulo com colar graduado, verificando o deslocamento da mesa do microscópio.

A espessura foi medida na mesma região da medição da altura, porém com auxílio do software de aquisição de imagem do microscópio. A imagem era adquirida com o aumento adequado e executada a calibração, relacionando a resolução da imagem que é dada em pixels com unidade de medida μm . Então traçou-se uma linha de referência e executou-se três medidas, onde a média foi considerada como o valor de espessura da rebarba. A **Figura 34** apresenta um exemplo de medição de rebarba formada pelo gume principal em fresamento discordante, onde é mostrada a região da borda do rebaixo que foi escolhida para medir a altura e a espessura, neste caso a figura mostra uma medição de espessura onde o foco está na crista da rebarba. Os resultados gerais das medições estão no ANEXO VII – RESULTADOS GERAIS.

Adotou-se uma nomenclatura abreviada para as diferentes dimensões e regiões das rebarbas:

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

Ainda foram produzidas imagens através de fotografia e microscopia eletrônica de varredura (MEV), com objetivo de análises ilustrativas das formas de rebarba obtidas nos ensaios.

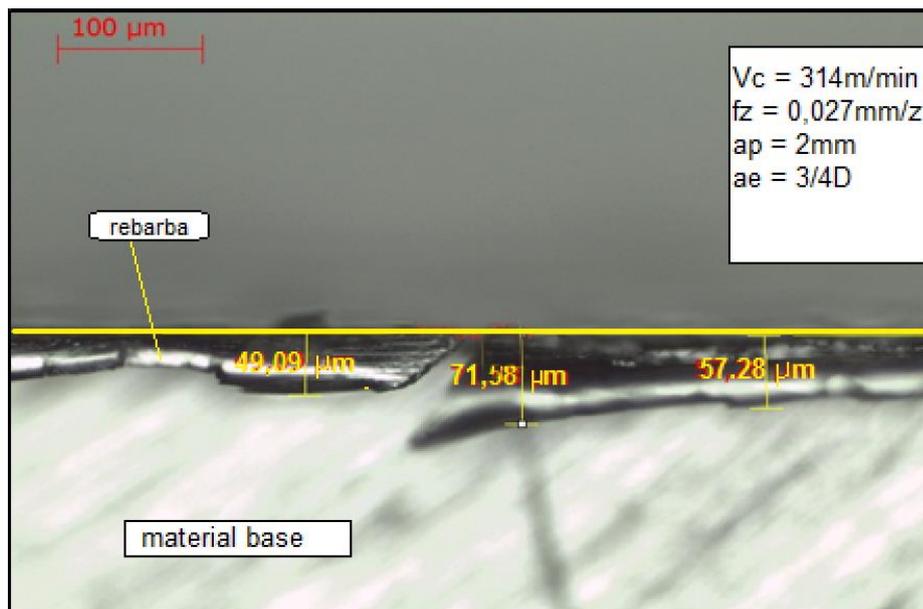


Figura 34 – Medição de espessura da rebarba formada pelo gume principal no fresamento discordante, com microscópio óptico focado na crista da rebarba

3.5. Análise da Força de Corte

A análise das forças de corte foi feita através dos valores médios de cada componente (F_x , F_y e F_z). No fresamento de topo as curvas geradas pelas forças de corte nas direções X , Y e Z tem comportamento aproximadamente senoidal, oscilando entre valores positivos e negativos, então neste caso os valores médios estariam logicamente próximos de zero. Sendo assim convencionou-se analisar as componentes da força separadamente, sendo: F_{xN} , F_{yN} e F_{zN} componentes negativas da força de corte e F_{xP} , F_{yP} e F_{zP} componentes positivas.

O sistema de aquisição possuía um ruído normal que gerava forças na ordem de $\pm 3N$, então buscou-se excluir dos cálculos de média esse ruído adotando um intervalo de força dado por $5N < F < F_{max}$, usado para valores positivos, e $-5N > F > -F_{max}$, usado para valores negativos. O valor limite do intervalo de $5N$ (ou $-5N$) foi escolhido para excluir do cálculo da média valores baixos de força que poderiam ser gerados por ruídos ou vibrações normais do sistema, o que alteraria o resultado das médias. Na escolha do intervalo de tempo da análise escolheu-se uma região onde o corte ocorreu de forma estável. A **Figura 35** mostra um exemplo de análise para cálculo da força médias da componente F_y , nela observa-se o comportamento da força, o

intervalo de tempo escolhido e a marcação do intervalo de forças que excluíram os ruídos do sistema ($5N < F < F_{\max}$ e $-5N > F > -F_{\max}$). O mesmo procedimento foi adotado para as outras componentes.

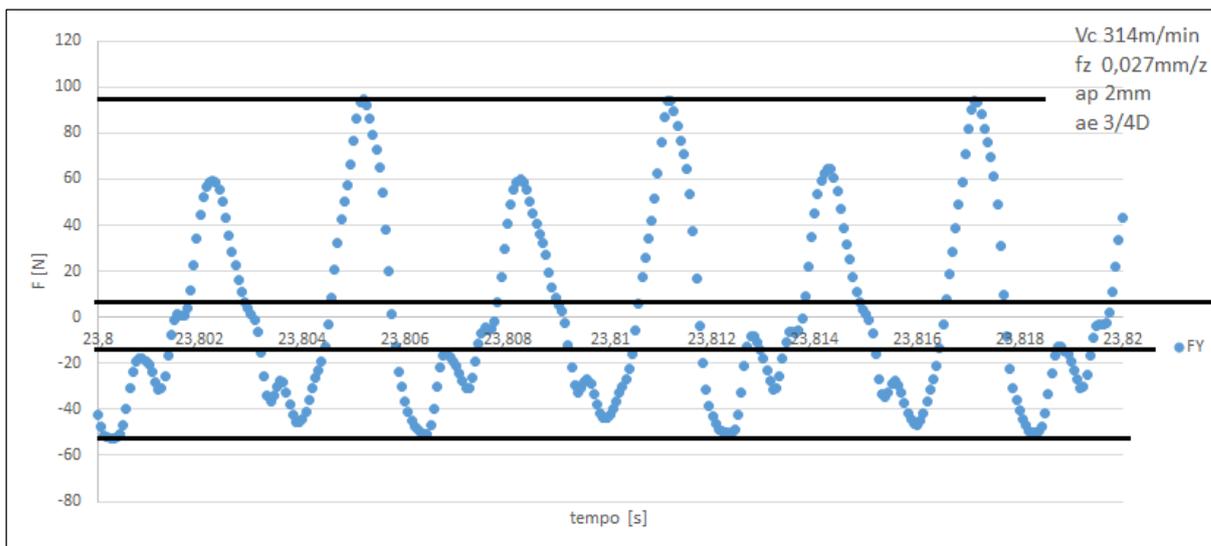


Figura 35 - Seleção de intervalo para cálculo das médias de F_{YN} e F_{YP}

3.6. Análise Estatística

Em análise da formação de rebarba, as ferramentas estatísticas desempenham papel importante. Dentre as análises aplicadas, a análise de variância (ANOVA) é ferramenta importante para identificar a combinação dos parâmetros que apresentam melhores resultados (KILICKAP, 2010), ela analisa qual o efeito que as variáveis de entrada (e suas interações) causam na resposta (MONTGOMERY D., 2001). Portanto, a ANOVA foi utilizada para determinar a influência dos parâmetros de corte e suas interações (variáveis de entrada) nas dimensões da rebarba (resposta). Sendo:

- P_{value} : é a probabilidade (que varia de zero a um) de os dados observados terem ocorrido por acaso. Se $P < 0,05$ o resultado é significativo, se $0,05 < P < 0,10$ considerou-se o resultado com tendência de ser significativo, se $P > 0,10$ o resultado é insignificante;
- O intervalo de confiança (IC) utilizado nas análises é de 95%;

- O software R foi utilizado para realizar os cálculos estatísticos e geração de tabelas;

Para analisar qual componente da força de usinagem tem maior influência na formação da rebarba, utilizou-se uma regressão linear simples. Esta técnica estatística permite modelar e investigar a relação entre duas variáveis. O coeficiente de determinação R^2 (que varia de zero a um) verifica a adequação de um modelo de regressão. Ele é usado para determinar o quanto o modelo de regressão explica a relação das variáveis. Por exemplo, se o R^2 for de 0,8 quer dizer que o modelo explica 80% da variabilidade dos dados. (MONTGOMERY D., 2001). Para as análises de regressão linear o intervalo de confiança (IC) utilizado também é de 95%. O software GraphPad Prism® Versão 6.01 foi utilizado para realizar a análise de regressão e geração de todos os gráficos do trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

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 ferramenta de corte foi a mesma em todos os ensaios, buscando focar o estudo na influência dos parâmetros de corte para a liga AA6070T4. Uma análise de variância foi realizada para cada dimensão (largura e espessura) identificando os parâmetros, ou interação destes, mais influentes na formação da rebarba. Da mesma forma a análise de regressão linear foi aplicada avaliando a relação entre força de corte e dimensão da rebarba. Por fim é elaborada uma otimização dos parâmetros de corte que apresenta melhor resultado em redução de rebarba.

4.1. Ensaios de Fresamento Discordante

Conforme mostrado na **Figura 3**, no fresamento discordante a espessura de corte é mínima na entrada da ferramenta e máxima na saída. A rebarba formada por deformação causada pela compressão do gume principal, quando este entra na superfície de corte no limite do contato entre o gume principal e a peça, é do tipo *Poisson*. A rebarba formada pelo gume secundário na saída da peça é do tipo *Roll over*, coincidindo com os resultados também observados por Gillespie e Blotter (GILLESPIE; BLOTTER, 1976).

4.1.1. Dimensões da Rebarba formada pelo Gume Principal na Lateral do Rebaixo no Fresamento Discordante

As rebarbas, formadas pelo gume principal da fresa na borda do rebaixo, apresentaram formação irregular e dimensões bastante variadas, **Figura 36** e a

Figura 37 (MEV). A imagem da figura 35 mostra a formação de rebarbas primárias. Quando ocorrem estas rebarbas, o processo de fresamento é considerado inadequado e as condições que as formam são evitadas na prática industrial. A formação destas rebarbas não apresenta uma regularidade, tornando difícil sua quantificação. Buscou-se evitar esta formação de rebarbas primárias pela seleção dos níveis dos parâmetros. Este mecanismo de formação de rebarbas primárias grandes costuma ocorrer apenas para pequenos avanços e profundidade de corte. Nas condições de ensaio em que foram verificados este mecanismo, as rebarbas primárias se formaram em todas as réplicas dos ensaios. Devido a irregularidade no mecanismo de formação, as rebarbas primárias levam a uma elevada dispersão dos valores de medida em torno da média, tanto para altura quanto para espessura da rebarba. Esta formação não ocorreu em toda a extensão do rebaixo, no caso da figura 35 ocorreu apenas na região circulada, porém o critério adotado para medição da rebarba foi da região de maior formação. Na imagem da figura 36 é mostrada a rebarba formada pelo gume principal para uma combinação de parâmetros com níveis de V_c e a_e mais altos. A figura mostra rebarbas com uma formação do tipo secundária onde houve rompimento e separação do cavaco durante sua formação. Devido a isto ela é bem menor que a rebarba formada de tipo primária. As regiões circuladas, que foram analisadas, são as escolhidas para as medições de altura e espessura.

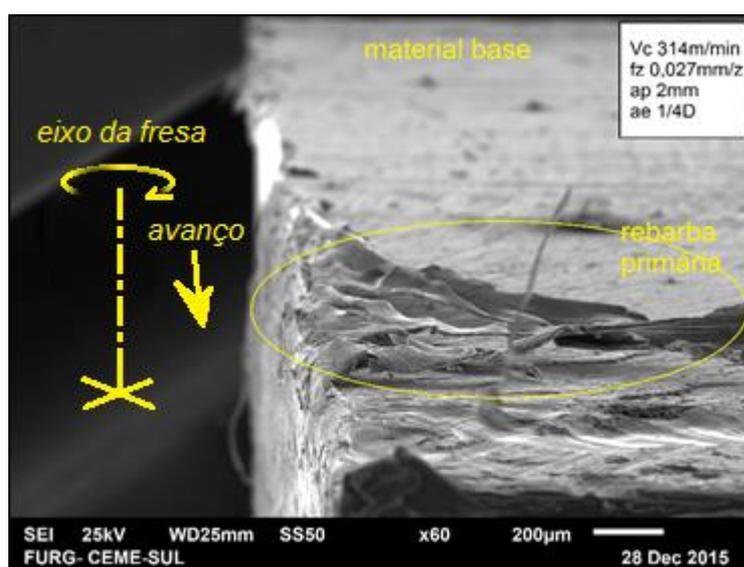


Figura 36 - Rebarba do tipo primária formada pelo gume principal no fresamento discordante.

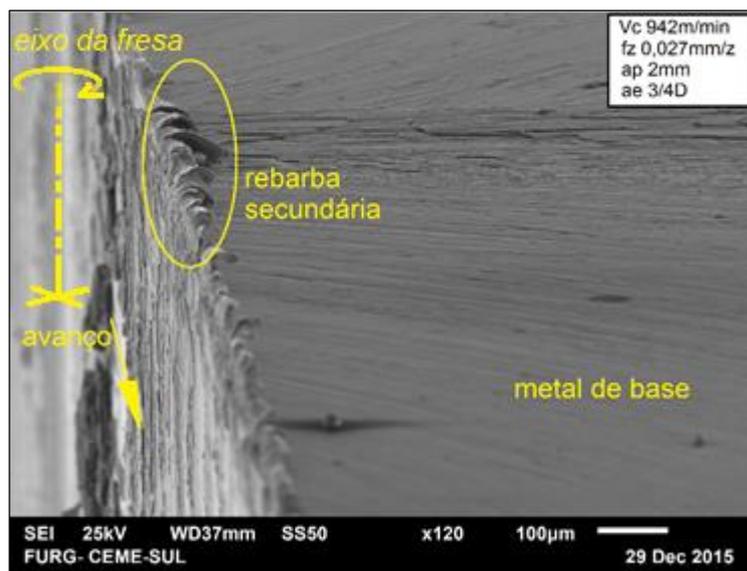


Figura 37 – Rebarba do tipo secundária formada pelo gume principal no fresamento discordante.

A **Tabela 4** apresenta valores de ANOVA organizados em ordem crescente de P_{value} , onde são destacados os valores significativos com $P < 0,05$ (ou 5%). De acordo com a tabela, não há influência dos parâmetros de corte na altura da rebarba formada pelo gume principal (AGP_D) quando analisados individualmente. A velocidade de corte (v_c) apresentou maior tendência de influenciar na altura da rebarba em relação aos outros parâmetros, com valor de $p = 0,09$. A **Figura 38** apresenta graficamente os efeitos de todos os parâmetros analisados individualmente, ele é composto pelas médias com intervalo de confiança (IC) de 95%. É possível notar a tendência da diminuição de AGP_D com aumento da v_c e a menor variação em torno da média no seu nível mais alto, bem como nota-se que os efeitos dos outros parâmetros não são significativos individualmente. O efeito mais significativo em AGP_D foi a interação $f_z * a_e$, com $P < 0,05$. A **Figura 39** apresenta graficamente esta interação através das médias com IC 95%, onde para $a_e = 1/4D$ o menor nível de f_z formou rebarbas mais altas e com grande dispersão entorno da média, obtendo-se melhor resultado no nível alto de f_z . Com $a_e = 3/4D$, os melhores resultados estão com baixo f_z . Portanto, a escolha do nível de f_z depende de qual nível de a_e será usado.

Como a rebarba do gume principal é formada na entrada da ferramenta, o aumento de f_z tende a reduzir o tamanho da rebarba pois diminui o efeito “*ploughing*”, assim como o aumento da v_c que diminui o atrito e as deformações, também reduziria

a rebarba. (NIKNAM; SONGMENE, 2013) no estudo do fresamento de topo em ligas de alumínio, encontraram influência de f_z para altura da rebarba de topo, os demais parâmetros e interações não foram significativos. O autor mostrou que o aumento de f_z influenciou na redução de AGP_D , neste caso num fresamento de canal em cheio, ou seja $a_e=1D$. (OLVERA; BARROW, 1996) no estudo do efeito dos parâmetros de corte em aço AISI 1040, apresentam uma redução de AGP_D com aumento de f_z para $AS>90^\circ$, assim como o aumento da v_c produziu o mesmo efeito.

Tabela 4 - Dados de ANOVA para AGP_D

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	P value (%)
$f_z:a_e$	1	91394	91394	9,235	0,47%
v_c	1	29975	29975	3,029	9,14%
$v_c:a_p$	1	26767	26767	2,705	10,98%
$v_c:f_z:a_e$	1	23670	23670	2,392	13,18%
$a_p:a_e$	1	22278	22278	2,251	14,33%
f_z	1	18467	18467	1,866	18,15%
a_e	1	17630	17630	1,781	19,14%
$f_z:a_p$	1	16789	16789	1,696	20,20%
$v_c:f_z:a_p:a_e$	1	9778	9778	0,988	32,77%
a_p	1	9467	9467	0,957	33,54%
$f_z:a_p:a_e$	1	6204	6204	0,627	43,43%
$v_c:f_z$	1	4923	4923	0,497	48,57%
$v_c:a_e$	1	3597	3597	0,363	55,09%
$v_c:f_z:a_p$	1	3090	3090	0,312	58,02%
$v_c:a_p:a_e$	1	2723	2723	0,275	60,35%
Residual	32	316683	9896		

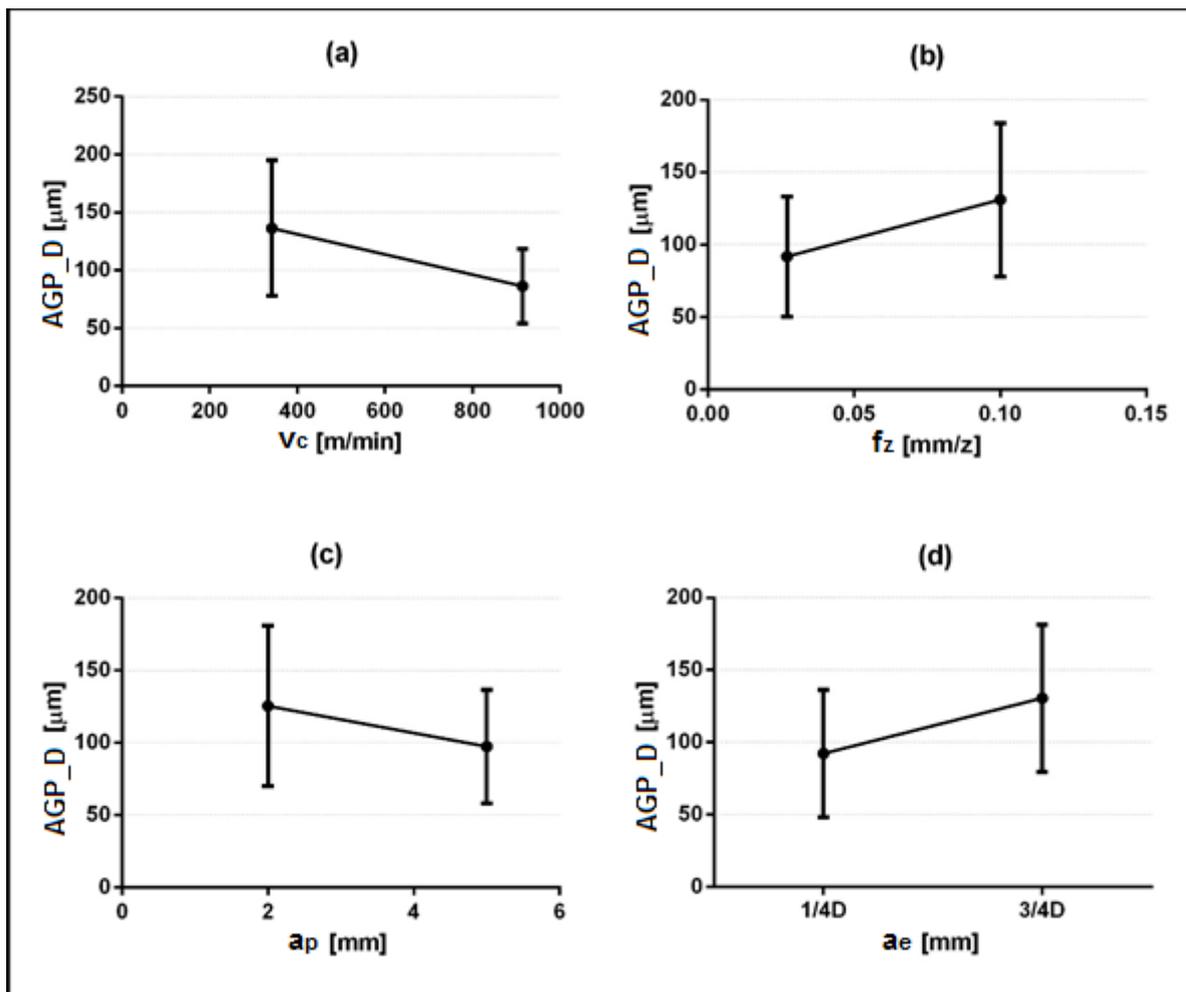


Figura 38 - Efeito dos parâmetros de corte em AGP_D, com 95% de IC.

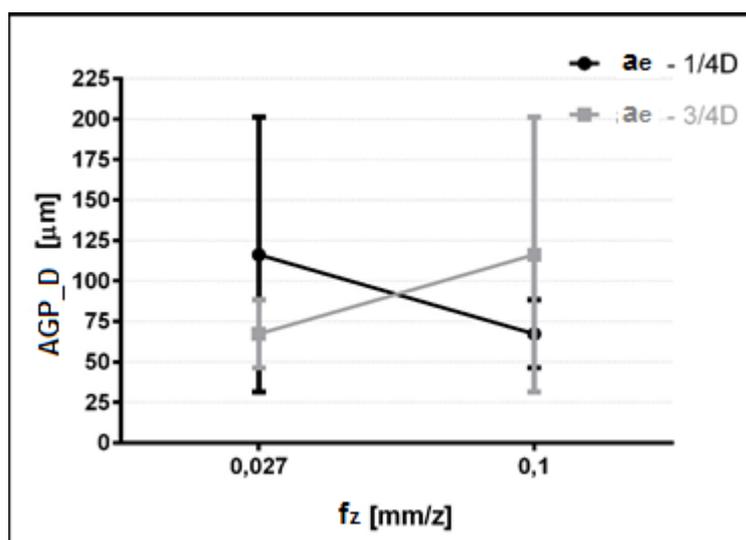


Figura 39 - Efeito da interação de fz*ae em AP_D, com 95% IC

A componente da força de usinagem F_{zN} , responsável por puxar a peça na direção do eixo da ferramenta, não apresentou adequação a um modelo de regressão linear de forma satisfatória. A hipótese de que a componente F_{zN} fosse apresentar forte relação com AGP_D não se confirmou, neste caso a componente consegue explicar apenas 9,9% das ocorrências de AGP_D , conforme coeficiente de determinação $R^2=0,09951$. A possibilidade da componente F_{zP} , que empurra a peça para baixo na entrada do gume pelo efeito “*ploughing*” (OLVERA; BARROW, 1996), apresentar relação com AGP_D também não se confirmou. O coeficiente de determinação R^2 foi de 8,6%, valor próximo de R^2 para F_{zN} . A **Tabela 5** apresenta o coeficiente de determinação R^2 para todas as componentes da força. A **Figura 40** apresenta um gráfico de dispersão e a curva de regressão linear para F_{zN} , nota-se que há grande dispersão dos pontos dificultando o ajuste da reta. O restante das componentes de força estão abaixo de $R^2<9\%$ e não serão apresentadas as regressões.

Tabela 5 - Análise de regressão linear das componentes de força com AGP_D

AGP_D	F_{zN}	F_{zP}	F_{yN}	F_{yP}	F_{xN}	F_{xP}
Adequação à reta (R^2)	0,09951	0,08592	0,03853	0,03288	0,0619	0,00196
F para inclinação	5,083	4,324	1,843	1,564	3,035	2,858
P_{value} para inclinação	0,029	0,0432	0,1812	0,2174	0,0882	0,7651
Desvio de zero?	Yes	Yes	No	No	No	No
Número de ensaios	48	48	48	48	48	48

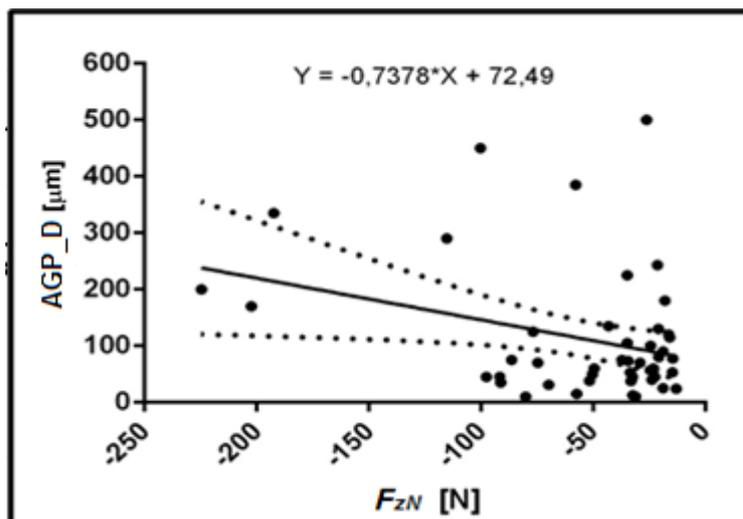


Figura 40 - Gráfico de dispersão e regressão linear F_{zN} x AGP_D, com 95% de IC

Os resultados de ANOVA para espessura da rebarba formada pelo gume principal (EGP_D) são apresentados na **Tabela 6**, observa-se que a única variável que influencia significativamente em EGP_D é a velocidade de corte v_c , os outros parâmetros (a_e , a_p e f_z) quando analisados individualmente não apresentam resultado significativo. A tabela está em ordem crescente de P_{value} e estão destacados os valores significativos com $P < 0,05$ (5%). A **Figura 41** apresenta a média com intervalo de confiança (IC) de 95% dos efeitos dos parâmetros de corte analisados individualmente, onde nota-se a influência significativa de v_c em relação aos demais. Entretanto, a interação pareada entre a_p , a_e e f_z é significativa, assim como a interação tripla inserindo v_c nestes mesmo pares. O aumento de v_c mostrou-se elemento chave na redução de EGP_D . A **Figura 42**, a **Figura 43** e a **Figura 44** mostram graficamente as interações $f_z \cdot a_e$, $a_p \cdot a_e$ e $f_z \cdot a_p$ respectivamente. Na primeira e na segunda nota-se que obteve-se os menores valores de EGP_D para $a_e = 1/4D$ com níveis mais altos de f_z e a_p , assim como pouca variação em torno da média. Na terceira a interação $f_z \cdot a_p$ apresentou os valores de EGP_D com grande variação em torno da média em ambas as combinações, mesmo a ANOVA indicando que a interação foi significativa.

(NIKNAM; SONGMENE, 2013) não encontraram efeito significativo dos parâmetros de corte na EGP_D , mas sim efeito da interação da v_c com outros parâmetros. O mesmo fato ocorreu conforme a **Tabela 6**, onde a interação de v_c com outros parâmetros foi significativa, mas também foi influente de forma direta.

Tabela 6 - Dados de ANOVA para EGP_D

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	P value (%)
fz:ae	1	427122	427122	35,975	0,000%
Vc:fz:ae	1	243946	243946	20,546	0,008%
Vc	1	211139	211139	17,783	0,019%
Vc:ap:ae	1	189719	189719	15,979	0,035%
ap:ae	1	187513	187513	15,793	0,038%
Vc:fz:ap	1	180529	180529	15,205	0,046%
fz:ap	1	141669	141669	11,932	0,158%
Vc:ap	1	26513	26513	2,233	14,488%
ap	1	23625	23625	1,99	16,800%
fz:ap:ae	1	20291	20291	1,709	20,043%
ae	1	19655	19655	1,655	20,745%
Vc:ae	1	11295	11295	0,951	33,671%
fz	1	7765	7765	0,654	42,466%
Vc:fz:ap:ae	1	5404	5404	0,455	50,475%
Vc:fz	1	1337	1337	0,113	73,941%
Residual	32	379932	11873		

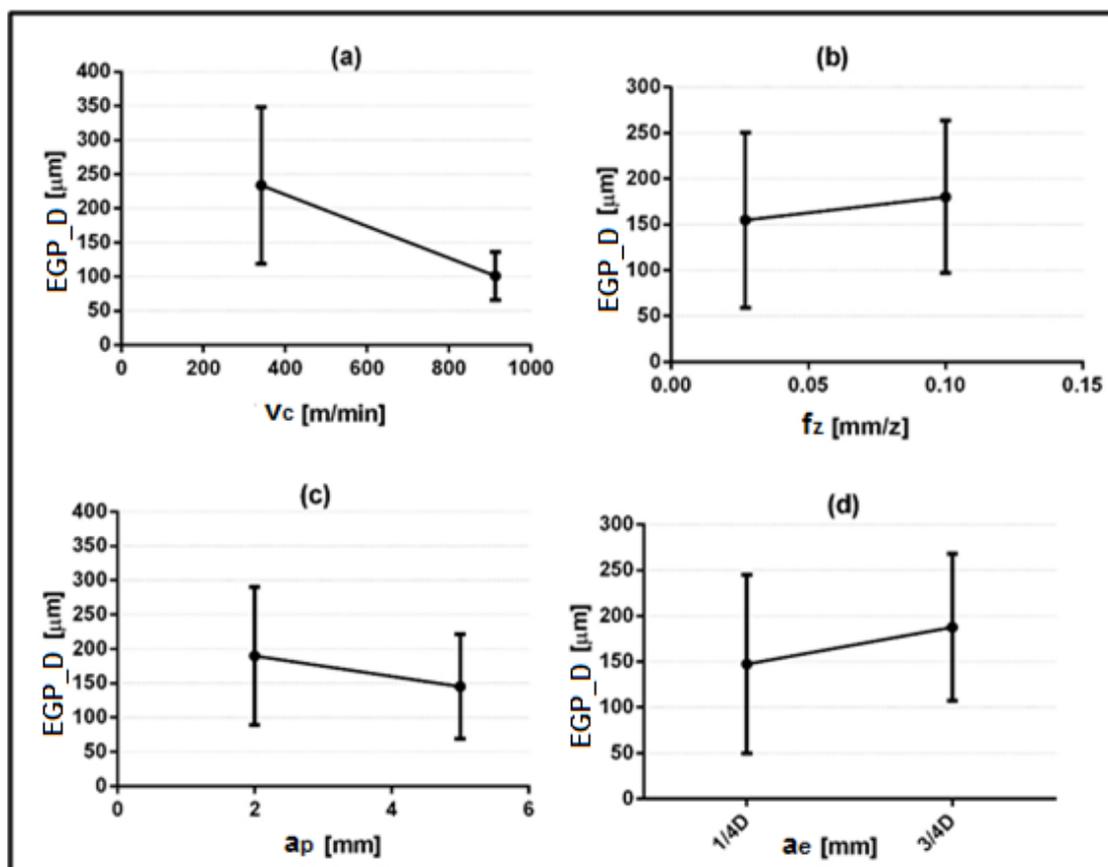


Figura 41 - Efeito dos parâmetros de corte em EGP_D, com 95% de IC

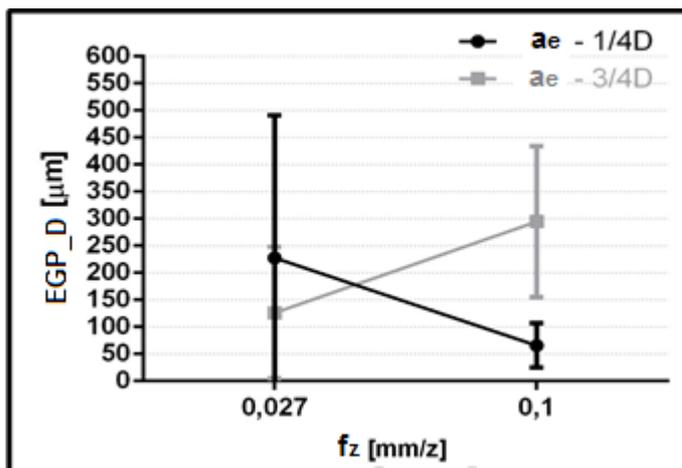


Figura 42 - Efeito da interação $f_z * a_e$ na EGP_D, com 95% de IC

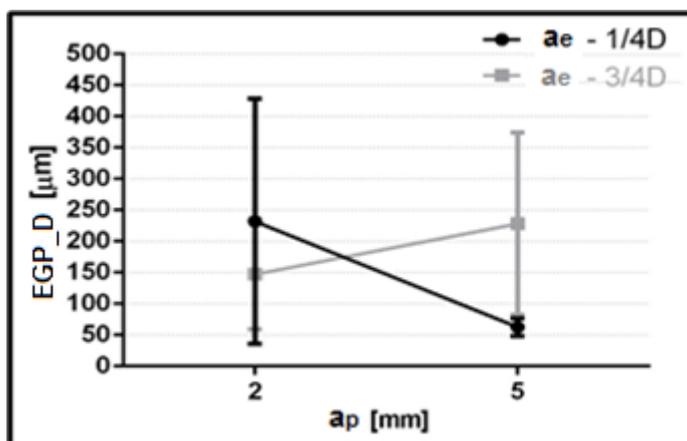


Figura 43 - Efeito da interação $a_p * a_e$ na EGP_D, com 95% de IC

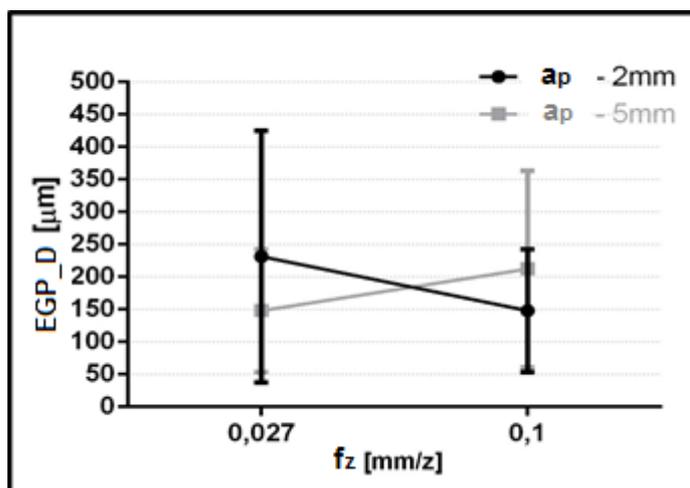


Figura 44 - Efeito da interação $f_z * a_p$ na EP_D, com 95% de IC

As componentes da força de fresamento F_{zN} e F_{zP} não apresentaram adequação a um modelo de regressão linear de forma satisfatória. A hipótese que as componentes apresentassem forte relação com EGP_D pelos mesmos motivos citados para altura não se confirmou. Neste caso, F_{zN} consegue explicar 17% das ocorrências de EGP_D , conforme coeficiente de determinação $R^2 = 0,17$, e F_{zP} explica 18,8% das ocorrências com $R^2 = 0,1888$. A **Tabela 7** apresenta o R^2 para todas as componentes da força de corte. A **Figura 45** mostra um gráfico de dispersão e a curva de regressão linear para F_{zN} , nota-se que há grande dispersão dos pontos dificultando o ajuste da reta. Não serão apresentadas as regressões para F_{zP} e para o restante das componentes de força que apresentaram $R^2 < 17\%$.

Tabela 7 – Análise de regressão linear das componentes de força com EGP_D

EGP_D	F_{zN}	F_{zP}	F_{yN}	F_{yP}	F_{xN}	F_{xP}
Adequação à reta (R^2)	0,1709	0,1888	0,07532	0,04609	0,1081	0,03449
F_{value} para inclinação	9,484	10,71	3,747	2,222	5,573	1,643
P_{value} para inclinação	0,0035	0,002	0,0591	0,1428	0,0225	0,2063
Desvio de zero?	Yes	Yes	No	No	Yes	No
Número de ensaios	48	48	48	48	48	48

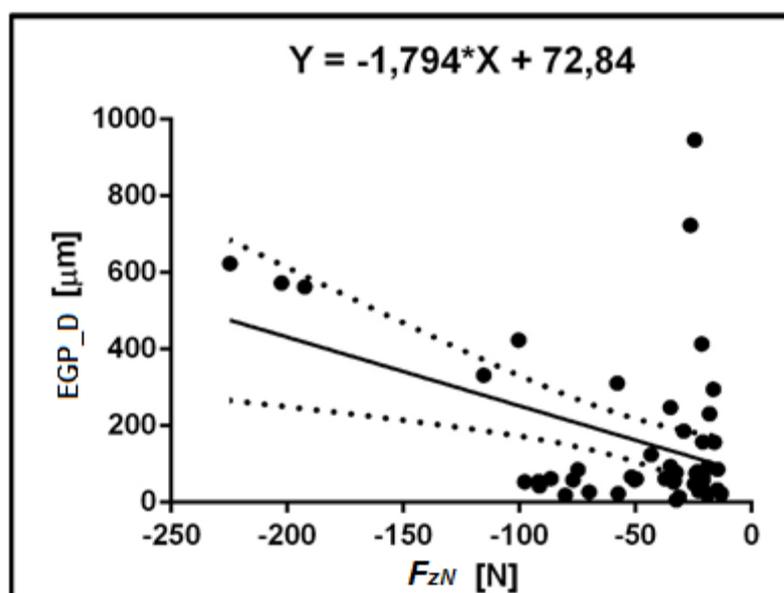


Figura 45 - Gráfico de dispersão e regressão linear F_{zN} x ET_D , com 95% de IC

4.1.2. Dimensões da Rebarba Formada pelo Gume secundário no Fresamento Discordante

As rebarbas formadas na saída do gume secundário da borda da peça são dependentes do ângulo de saída (AS). Desta maneira a largura de corte (a_e) passa a ser parâmetro fundamental na análise da formação desta rebarba, pois, o ângulo de saída do gume secundário varia com a_e , conforme apresentado na **Figura 46**. Conforme foi discutido no capítulo 2, o AS não depende somente de a_e , depende também da geometria de afiação da ferramenta, porém, a geometria não será avaliada neste trabalho e será mantida constante, sendo variado o engajamento da ferramenta (a_e).

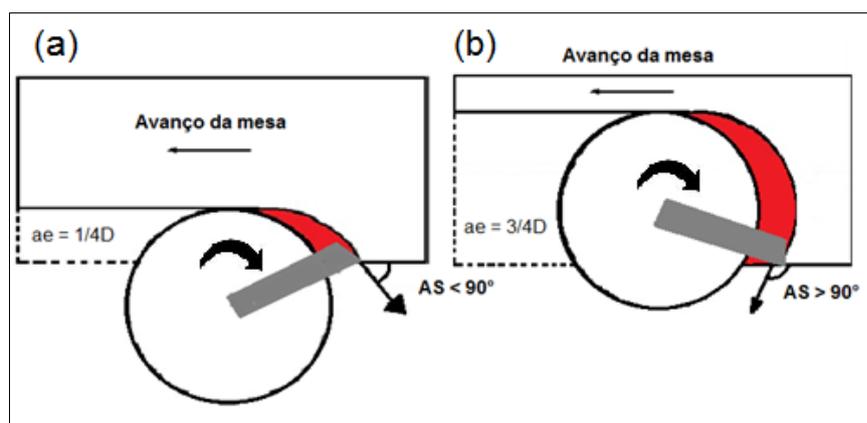


Figura 46 - Atuação da ferramenta no fresamento com condições de interação: (a) discordante com $a_e = 1/4D$ e discordante/ concordante (b) com $a_e = 3/4D$

A **Figura 47** apresenta a forma típica da rebarba decorrente da passagem do gume secundário sobre a borda do rebaixo usinado no fresamento concordante com $a_e=1/4D$

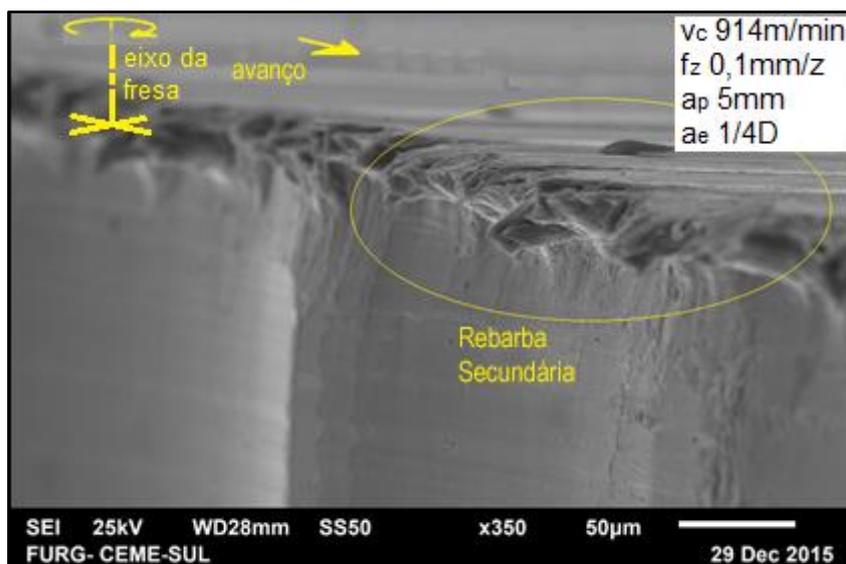


Figura 47 - Rebarba formada pelo gume secundário do tipo secundária em corte discordante

A forma típica das rebarbas que ocorreu em todos os ensaios realizados com $a_e = 1/4D$ são quase imperceptíveis a olho nu. Para $a_e = 1/4D$ a quina do gume secundário é a primeira parcela do gume secundário que atinge a borda do rasgo já usinado, passando sobre a rebarba formada nas passagens dos gumes anteriores, num ângulo de 60° e com a velocidade de corte máxima da fresa (determinado pela escolha do parâmetro $a_e = 1/4D$). A parcela do gume secundário que passa sobre a borda do rasgo já fresado (e também sobre a rebarba dos cortes anteriores) se estende da quina até a metade do raio da fresa. A velocidade de corte do ponto de contato do gume secundário com a borda do rebaixo aumenta a partir deste atingir o limite da espessura de usinagem máxima da secção de usinagem do ciclo até que a quina da fresa atinja o ponto de saída sobre a borda do rebaixo. Neste intervalo região do gume secundário que passa sobre a borda é responsável pela formação da rebarba. O ponto de contato se desloca para a periferia da fresa à medida que esta gira, aumentando gradativamente a velocidade de corte, até que no ângulo de contato de 60° a quina deixa a borda do rebaixo, sendo esta a última parcela do gume secundário responsável pela formação da rebarba naquele ciclo. Ao longo do arco percorrido pela quina da fresa até a profundidade $a_e = 1/4D$ e novamente até a borda do rebaixo, a quina do gume secundário é responsável pelas características da superfície fresada pelo topo da fresa. A velocidade de corte crescente na região ativa do gume por ciclo tem como consequência um aumento gradual da temperatura e

diminuição do fator de recalque, ao mesmo tempo que se tem um aumento da espessura de usinagem, favorecendo a quebra da rebarba.

A **Figura 48** mostra a forma típica da rebarba decorrente da passagem do gume secundário sobre a borda do rebaixo usinado no fresamento concordante/ discordante para $a_e=3/4D$. A forma típica desta rebarba apresenta uma característica distinta da forma mostrada na figura 46, principalmente pelo maior tamanho, facilmente percebida a olho nu. É uma rebarba primária, devido seu tamanho, em forma de onda.

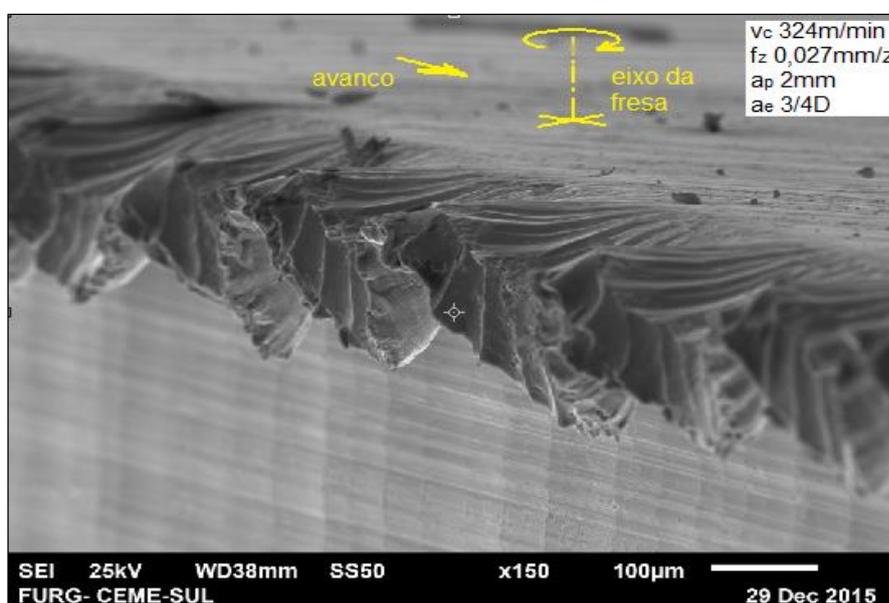


Figura 48 - Rebarba formada pelo gume secundário, do tipo primária e em forma de onda.

A diferença destas destas formas reside numa diferença no mecanismos de formação das rebarbas que é relacionada com a forma com que o gume secundário passa sobre a borda do rebaixo fresado para $a_e=3/4D$, ou seja, pela sequência de saída do gume na borda do rebaixo.

O primeiro ponto do gume secundário que atinge a borda do rebaixo é a quina da fresa com a máxima velocidade de corte e com máxima espessura de usinagem, num ângulo de 120° . O gume secundário ativo se estende por alguns incrementos em direção ao centro da fresa, dependendo do avanço por dente selecionado. A partir deste ponto não ocorre mais ação de formação de rebarba e o gume secundário passa sobre as rebarbas formadas nos ciclos anteriores, inicialmente com velocidade

tangencial decrescente e depois crescente até que a quina da fresa entre novamente sobre a borda do rebaixo com velocidade de corte máxima. O início da formação da rebarba de cada ciclo para $a_e=3/4D$ se dá com a maior velocidade, com a maior temperatura e maior plasticidade da raiz da rebarba, bem como com menor fator de recalque. A medida que a fresa gira e a parcela do gume secundário se desloca para o centro, a velocidade de corte, a temperatura da raiz da rebarba e a espessura de cavaco diminuem e o fator de recalque aumenta não significativamente. Embora a diminuição da velocidade de corte e a diminuição da temperatura, bem como o aumento do fator de recalque propiciem a quebra da raiz da rebarba, a diminuição da espessura de usinagem no sentido contrário, não atingindo o limite de deformabilidade necessário para quebrar a rebarba pela passagem dos gumes secundários sobre a mesma, mantendo as rebarbas fortemente aderidas à quina do rebaixo. Esta rebarba está propícia a não ter atingido a deformabilidade máxima do material e não quebra.

Uma ANOVA foi realizada para testar os parâmetros mais influentes nas dimensões da rebarba formada pelo gume secundário. A **Tabela 8** apresenta os dados de ANOVA para a altura desta rebarba (AGS_D), ela está organizada em ordem crescente de P_{value} e aparecem destacados os valores significativos com $P<0,05$ (5%). Podemos observar a influência significativa de todos os parâmetros de corte (v_c , f_z , a_p e a_e) analisados individualmente, principalmente de a_e , e a influência das interações pareadas entre f_z*a_p , f_z*a_e e a_p*a_e e a interação tripla $f_z*a_p*a_e$. A v_c não interage significativamente com os outros parâmetros de forma pareada, somente diretamente e em interação tripla. A **Figura 49** a média com intervalo de confiança (IC) de 95% dos efeitos dos parâmetros de corte analisados individualmente. A **Figura 50** mostra o efeito da interação f_z*a_p , onde para o nível mais baixo de a_p nenhum dos valores de f_z modifica a AGS_D e para o nível mais alto de a_p o melhor resultado está com menor f_z . Na **Figura 51** e **Figura 52** fica evidente a predominância de a_e sobre o resultado de AGS_D , o fato de a ferramenta atuar com $3/4D$ aumentou muito a altura da rebara.

(CHERN, 2006) mostra que há acréscimo significativo de altura com $AS>90^\circ$ com formato tipo onda (ver **Figura 15**). Também apresenta resultados em que a rebarba tipo onda, observada na **Figura 48**, é uma rebarba primária devido sua forma e tamanho, sugerindo que níveis mais altos de f_z podem reduzi-la drasticamente, tornando-a secundária. (OLVERA; BARROW, 1996) apresentou resultados em que $AS=60^\circ$ produziu rebarbas com alturas similares a um $AS=120^\circ$, porém as rebarbas

eram ambas secundárias. Estes fatos indicam que a rebarba tipo onda encontrada em todos os ensaios com $a_e=3/4D$ é primária e as formadas com $a_e=1/4D$ são secundárias, explicando o fato da predominância de a_e nos resultados. Os mesmo autores também encontraram influência direta de a_p , f_z e v_c .

Tabela 8 - Dados de ANOVA para AGS_D

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	P value (%)
a_e	1	617055	617055	175,776	0,000%
a_p	1	53634	53634	15,278	0,045%
f_z	1	42727	42727	12,171	0,144%
$f_z:a_p$	1	31626	31626	9,009	0,517%
$a_p:a_e$	1	20929	20929	5,962	2,033%
$f_z:a_e$	1	20879	20879	5,948	2,047%
$f_z:a_p:a_e$	1	19244	19244	5,482	2,561%
v_c	1	16811	16811	4,789	3,606%
$v_c:f_z:a_p$	1	16684	16684	4,753	3,672%
$v_c:f_z:a_p:a_e$	1	16573	16573	4,721	3,731%
$v_c:a_e$	1	12304	12304	3,505	7,035%
$v_c:a_p$	1	10258	10258	2,922	9,706%
$v_c:f_z:a_e$	1	5378	5378	1,532	22,480%
$v_c:a_p:a_e$	1	4632	4632	1,319	25,922%
$v_c:f_z$	1	1464	1464	0,417	52,301%
Residual	32	112335	3510		

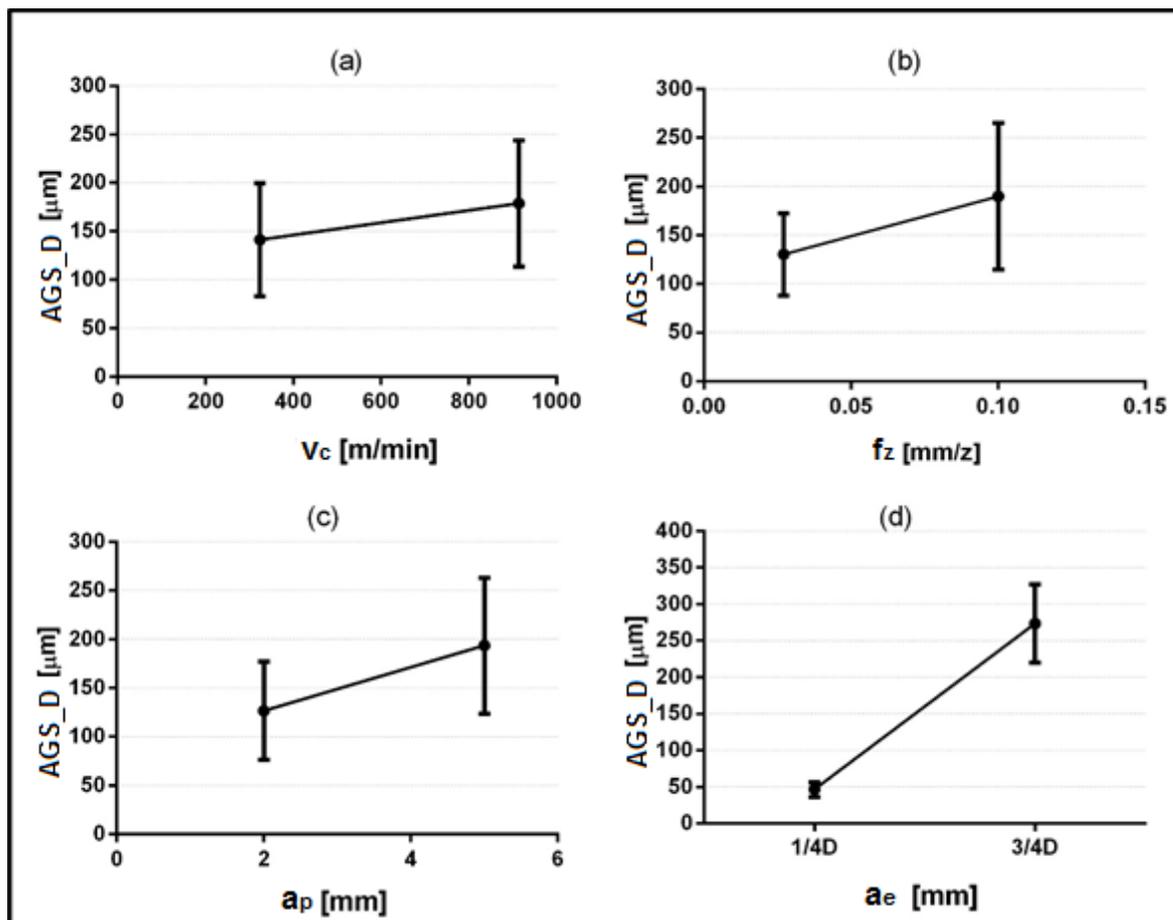


Figura 49 - Efeito dos parâmetros de corte em AGS_D, com 95% de IC

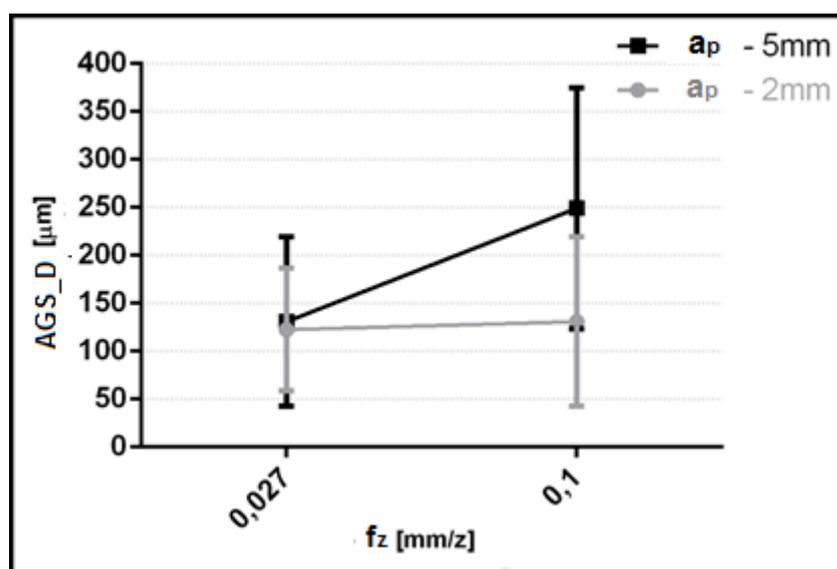


Figura 50 - Efeito da interação $f_z \cdot a_p$ em HL_D com 95% de IC

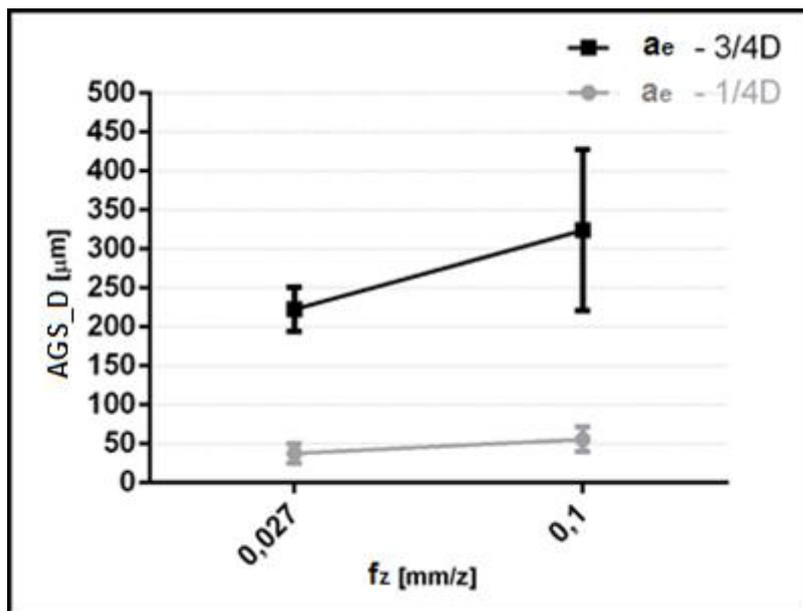


Figura 51 - Efeito da interação $f_z \cdot a_e$ em AS_D com 95% de IC

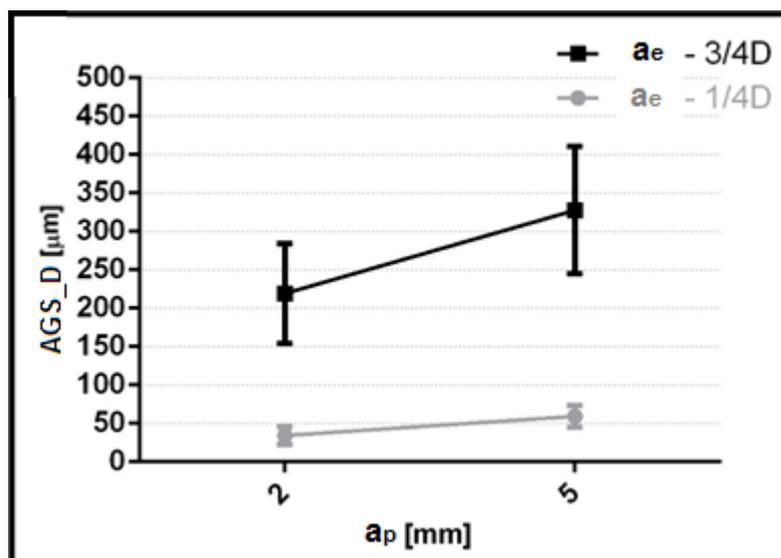


Figura 52 - Efeito da interação $a_p \cdot a_e$ em AS_D com 95% de IC

A componente da força de corte F_{yN} não apresentou adequação a um modelo de regressão linear de forma satisfatória. A hipótese da componente F_{yN} apresentar forte relação com AS_D devido estar na mesma direção da saída do gume não se confirmou, neste caso a componente consegue explicar apenas 37% das ocorrências de AS_D , conforme coeficiente de determinação $R^2 = 0,3748$. A **Tabela 9** apresenta o R^2 para todas as componentes da força de corte. A **Figura 53** mostra um gráfico de dispersão e a curva de regressão linear para F_{zN} , nota-se que há grande dispersão

dos pontos dificultando o ajuste da reta. Não serão apresentadas as regressões para o restante das componentes de força que apresentaram $R^2 < 30\%$.

Tabela 9 - Análise de regressão linear das componentes de força com AGS_D

AGS_D	F _{zN}	F _{zP}	F _{yN}	F _{yP}	F _{xN}	F _{xP}
Adequação à reta (R ²)	0,1949	0,1919	0,3748	0,1827	0,2338	0,03956
F _{value} para inclinação	11,14	10,92	27,57	10,28	14,04	1,895
P _{value} para inclinação	0,0017	0,0018	< 0,0001	0,0024	0,0005	0,1753
Desvio de zero?	yes	yes	yes	yes	yes	No
Número de ensaios	48	48	48	48	48	48

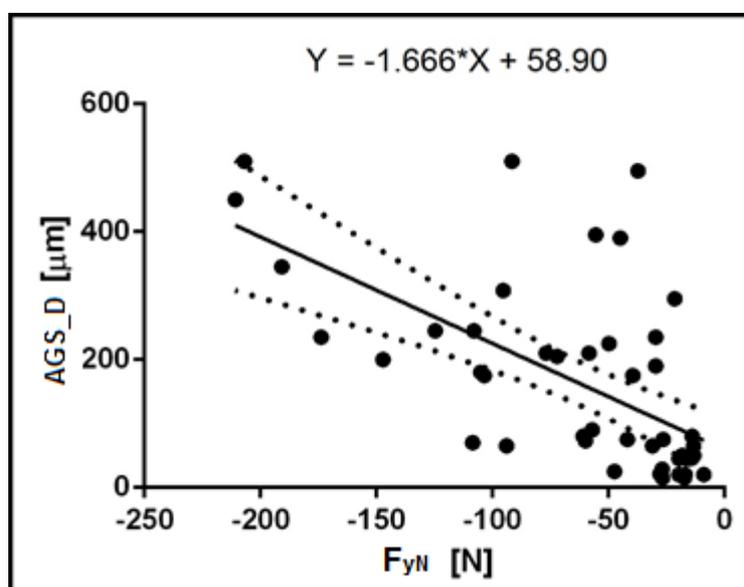


Figura 53 - Gráfico de dispersão e regressão linear F_{yN} x AS_D, com 95% de IC

Os resultados de ANOVA para espessura da rebarba formada pelo gume secundário (EGS_D) são apresentados na **Tabela 10**, ela está organizada em ordem crescente de P_{value} e os valores significativos com $P < 0,05$ (5%) estão destacados. Observa-se que a única variável direta que influencia significativamente em EGS_D é a_e , os outros parâmetros (v_c , a_p e f_z) quando analisados individualmente não apresentam resultado significativo. A **Figura 54** apresenta as médias com intervalo de confiança de 95% dos efeitos dos parâmetros de corte analisados individualmente. Assim como discutido para EGS_D , a rebarba gerada por $a_e = 3/4D$ é primária. Ainda podemos observar na **Figura 55** a influência significativa da interação $f_z * a_p$, onde para

o nível mais baixo de a_p não há alteração quando f_z é variado, para o nível mais alto de a_p os melhores resultados são com menor nível de f_z . A v_c não apresentou nenhuma influência nos resultados, nem mesmo interagindo com outros parâmetros.

Tabela 10 - Dados de ANOVA para EGS_D

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	P value (%)
a_e	1	328203	328203	201,108	0,000%
$f_z:a_p$	1	10293	10293	6,307	1,730%
a_p	1	6554	6554	4,016	5,360%
f_z	1	5894	5894	3,612	6,640%
$f_z:a_p:a_e$	1	5227	5227	3,203	8,300%
$v_c:f_z:a_e$	1	2729	2729	1,672	20,530%
$a_p:a_e$	1	2014	2014	1,234	27,490%
$v_c:f_z$	1	1939	1939	1,188	28,380%
$v_c:a_p$	1	1896	1896	1,162	28,910%
$f_z:a_e$	1	1438	1438	0,881	35,500%
$v_c:a_p:a_e$	1	795	795	0,487	49,030%
v_c	1	770	770	0,472	49,700%
$v_c:a_e$	1	473	473	0,29	59,400%
$v_c:f_z:a_p:a_e$	1	291	291	0,178	67,590%
$v_c:f_z:a_p$	1	78	78	0,048	82,800%
Residual	32	52223	1632		

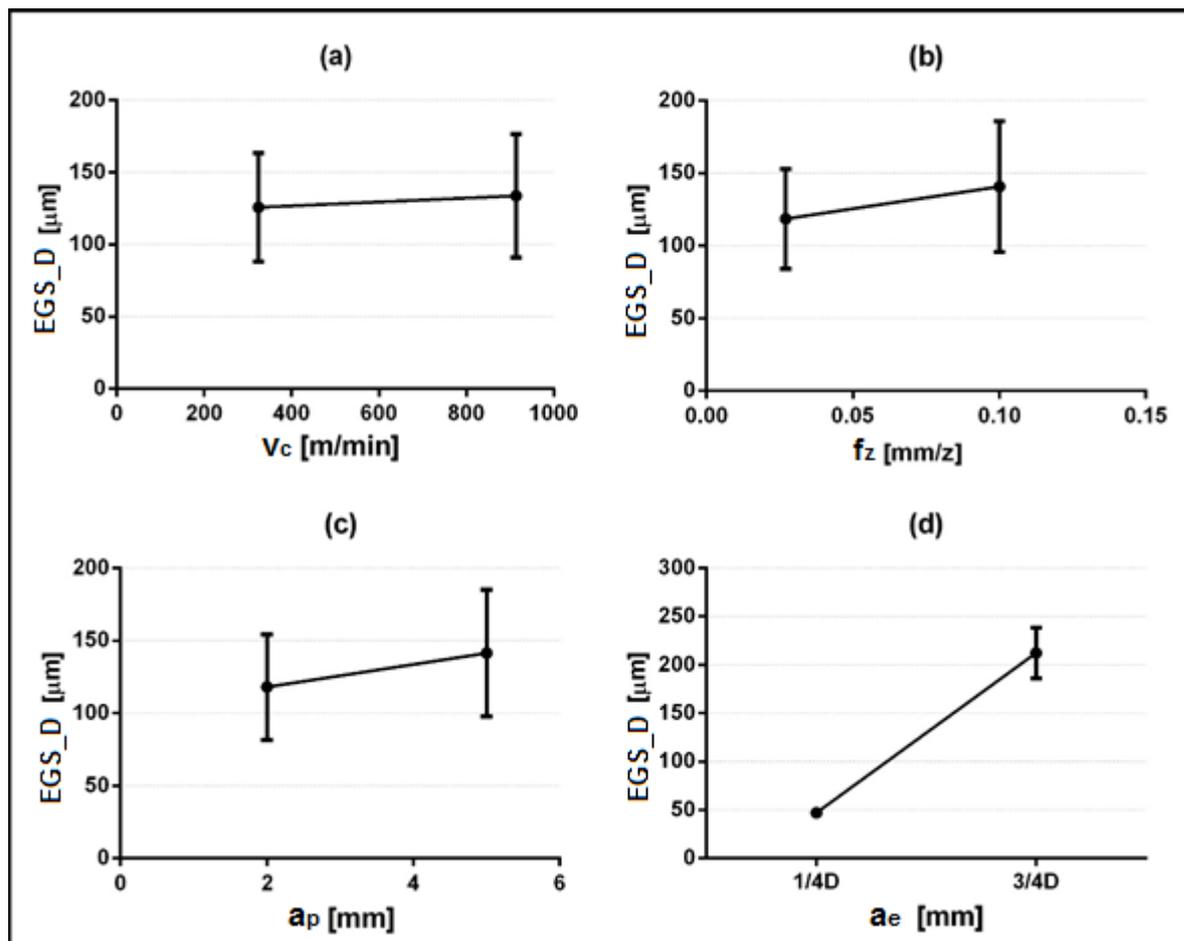


Figura 54 - Efeito dos parâmetros de corte em EGS_D, com 95% de IC

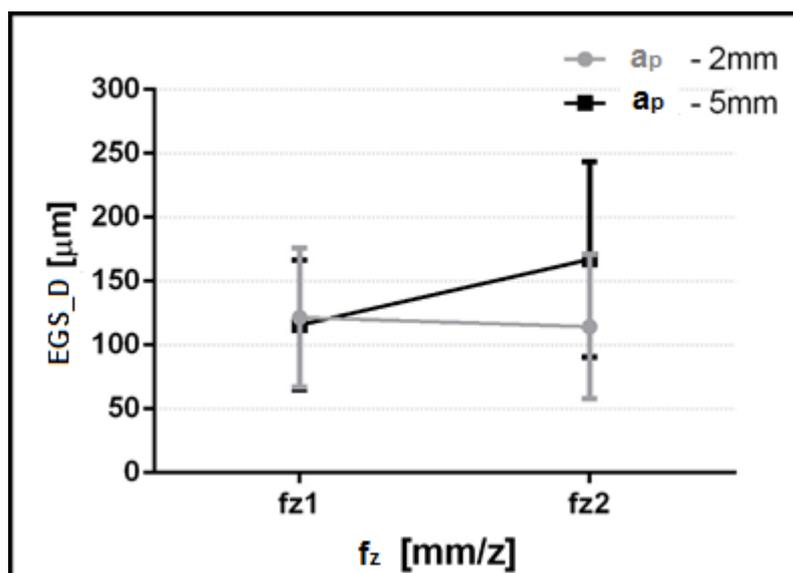


Figura 55 - Efeito da interação $f_z \cdot a_p$ em EGS_D com 95% de IC

A componente da força de corte F_{yN} não apresentou adequação a um modelo de regressão linear de forma satisfatória. A hipótese da componente F_{yN} apresentar forte influência em EGS_D não se confirmou, neste caso a componente consegue explicar 42% das ocorrências de EGS_D, conforme coeficiente de determinação $R^2=0,4268$. A **Tabela 11** apresenta o R^2 para todas as componentes da força de corte. A **Figura 56** mostra um gráfico de dispersão e a curva de regressão linear para F_{zN} , nota-se que há grande dispersão dos pontos dificultando o ajuste da reta. Não serão apresentadas as regressões para o restante das componentes de força que apresentaram $R^2 < 42\%$.

Tabela 11 - Análise de regressão linear das componentes de força com EGS_D

EGS_D	F_{zN}	F_{zP}	F_{yN}	F_{yP}	F_{xN}	F_{xP}
Adequação à reta (R^2)	0,1351	0,1312	0,4268	0,1997	0,218	0,08081
F_{value} para inclinação	7,183	6,949	34,25	11,48	12,82	4,044
P_{value} para inclinação	0,0102	0,0114	< 0,0001	0,0015	0,0008	0,0502
Desvio de zero?	yes	yes	yes	yes	yes	no
Número de ensaios	48	48	48	48	48	48

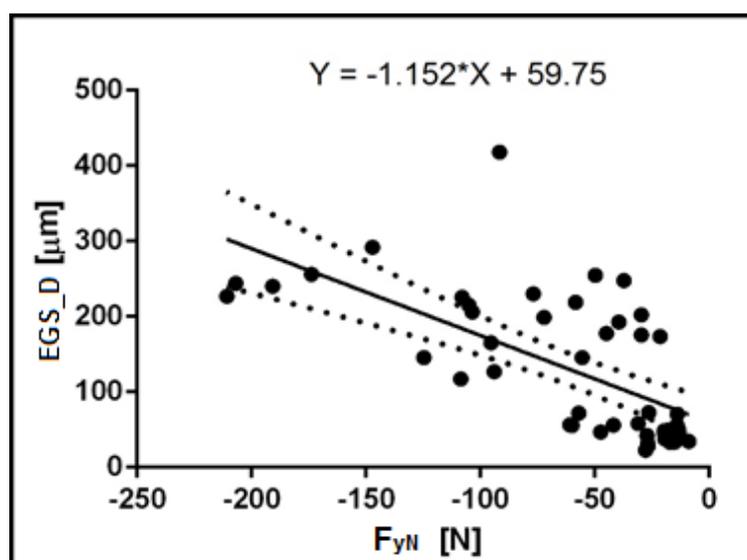


Figura 56 - Gráfico de dispersão e regressão linear F_{zN} x EGS_D, com 95% de IC

4.2. Ensaios de Fresamento Concordante

A atuação da ferramenta no corte concordante é diferente do corte discordante, sendo que as rebarbas laterais são formadas na entrada da ferramenta, onde a espessura de corte é máxima, e as rebarbas de topo na saída da ferramenta, onde a espessura de corte é zero. As dimensões das rebarbas foram menores de uma maneira geral, ou até mesmo inexistentes em alguns casos.

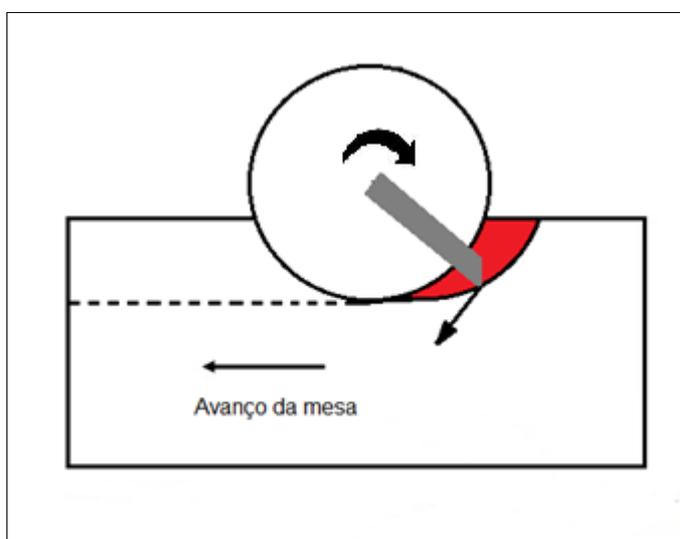


Figura 57 - Sentido de corte concordante

4.2.1. Dimensões da Rebarba formada pelo Gume Principal na Lateral do Rebaixo no Fresamento Concordante

A **Figura 58** mostra imagem da formação típica da rebarba de topo, do tipo Poisson. Segundo (OLVERA; BARROW, 1996), as rebarbas de topo no corte concordante tendem a serem menores que no discordante devido a não ocorrer o efeito "ploughing". Os resultados seguiram esta tendência apresentando dimensões menores em relação ao corte discordante, porém houve ocorrência de rebarbas primárias na combinação de níveis mais baixos dos parâmetros, assim como houve no corte discordante.

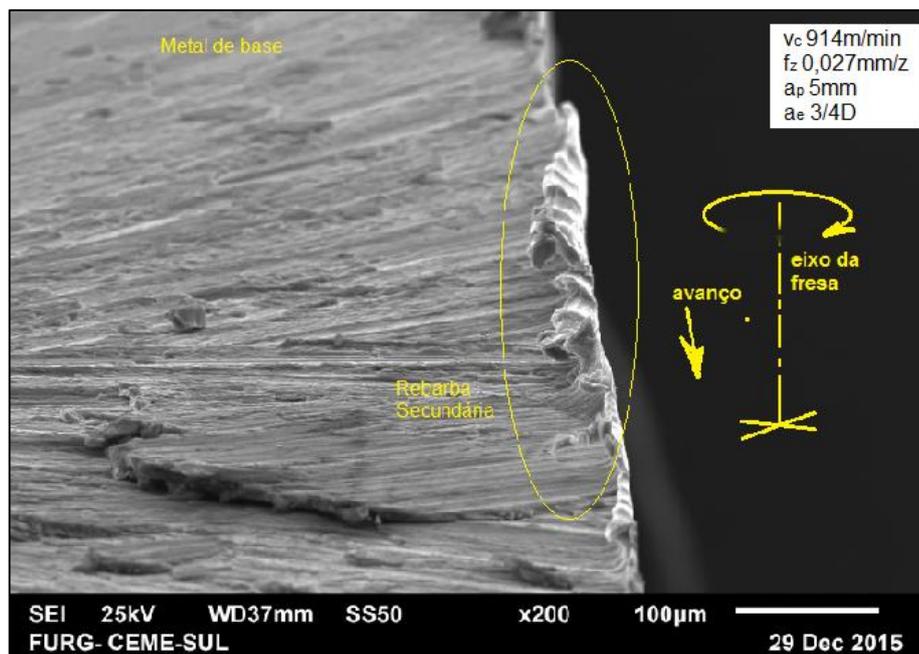


Figura 58 - Rebarba formada pelo gume principal em corte concordante

A **Tabela 12** apresenta os dados de ANOVA para altura da rebarba formada pelo gume principal em corte concordante, ela está organizada em ordem crescente de P_{value} e os valores significativos com $P < 0,05$ (5%) são destacados na tabela. De acordo com a ANOVA apresentada v_c e a_e são os parâmetros mais significativos na formação de AGP_C individualmente analisados, sendo v_c o mais influente. O f_z não é significativo de forma direta, mas passa ter influência com a interação $f_z * a_e$ e $v_c * f_z$. A **Figura 59** apresenta um gráfico das médias com intervalo de confiança (IC) de 95%, que mostra a influência dos parâmetros de corte na formação de AGP_C , traçando um comparativo entre eles. Na **Figura 60** e na **Figura 61** estão apresentadas as interações $f_z * a_e$ e $v_c * f_z$, respectivamente. A primeira mostra que com $a_e = 1/4D$ o avanço não promoveu mudança significativa, mas com $a_e = 3/4D$ o menor nível de f_z apresentou melhor resultado. Para o maior nível de f_z houve uma grande variação em torno da média. A segunda mostra que no nível mais alto de v_c apresentou o melhores resultados e a variação de f_z não promoveu mudança. Já o menor nível de v_c e o maior nível de f_z promoveram o pior resultado, com grande dispersão em torno da média.

Como a rebarba de topo no corte concordante é formada na saída da aresta de corte não existe o efeito “*ploughing*”. Uma característica do avanço na formação dessa rebarba, é que na saída da ferramenta o avanço da mesa e o movimento de corte

estão na mesma direção e sentido, portanto a tendência é os esforços diminuïrem com o aumento do avanços, reduzindo a rebarba. Assim como o aumento de v_c tem a tendência de diminuir o tamanho da rebarba devido a redução do atrito. (OLVERA; BARROW, 1996) encontraram redução significativa de AGP_C com aumento de f_z , (NIKNAM; SONGMENE, 2013) encontraram efeito direto de a_p e interações com f_z e v_c . Resultados que são semelhantes com os encontrados neste trabalho.

Tabela 12 - Dados de ANOVA para AGP_C

AGP_C	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	P value (%)
v_c	1	106277	106277	8.290	0,71%
$f_z:a_e$	1	88890	88890	6.934	1,29%
$v_c:f_z:a_e$	1	75573	75573	5.895	2,10%
a_e	1	73117	73117	5.704	2,30%
$v_c:f_z$	1	55651	55651	4.341	4,53%
$v_c:a_e$	1	48540	48540	3.786	6,05%
$v_c:f_z:a_p$	1	39480	39480	3.080	8,88%
f_z	1	31796	31796	2.480	12,51%
$f_z:a_p$	1	23214	23214	1.811	18,79%
$v_c:a_p:a_e$	1	15502	15502	1.209	27,97%
$a_p:a_e$	1	12923	12923	1.008	32,29%
$v_c:f_z:a_p:a_e$	1	7610	7610	0,59	44,67%
$v_c:a_p$	1	2952	2952	0,23	63,46%
a_p	1	2316	2316	0,18	67,37%
$f_z:a_p:a_e$	1	2179	2179	0,17	68,29%
Residual	32	410214	12819		

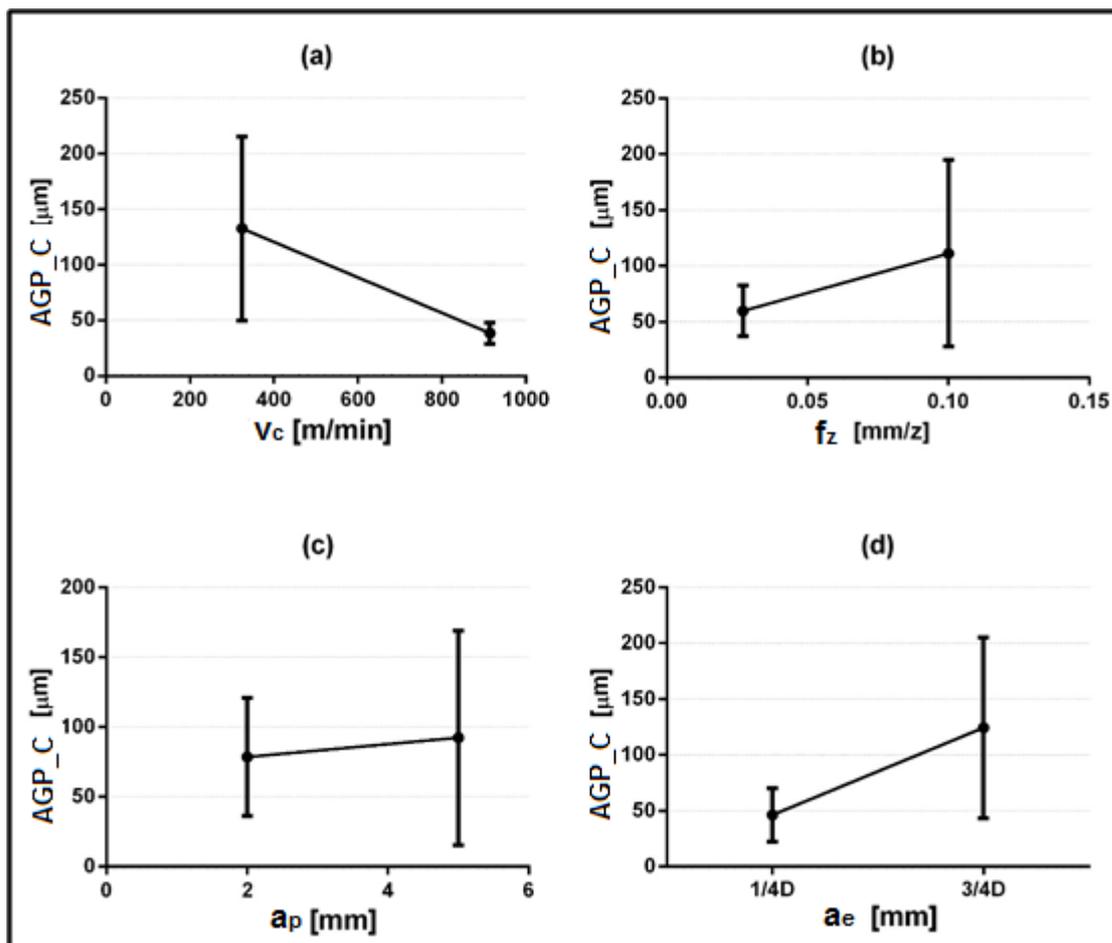


Figura 59 - Efeito dos parâmetros de corte em AGP_C, com 95% de IC

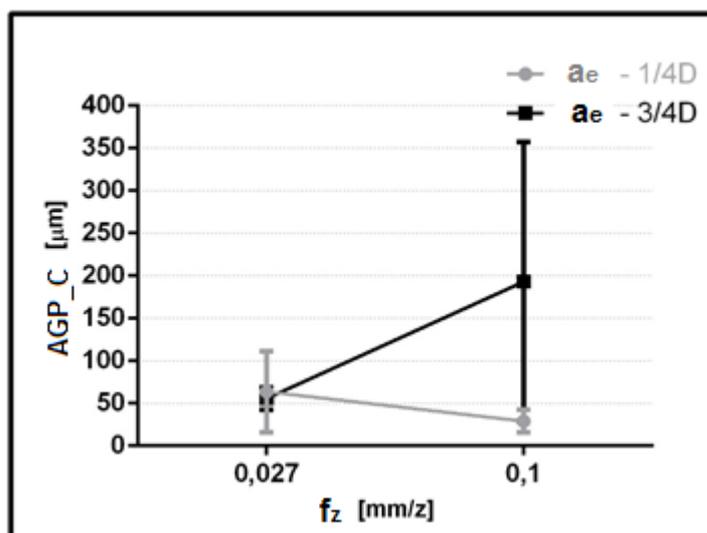


Figura 60 - Efeito da interação $f_z \cdot a_p$ em AGP_C com 95% de IC

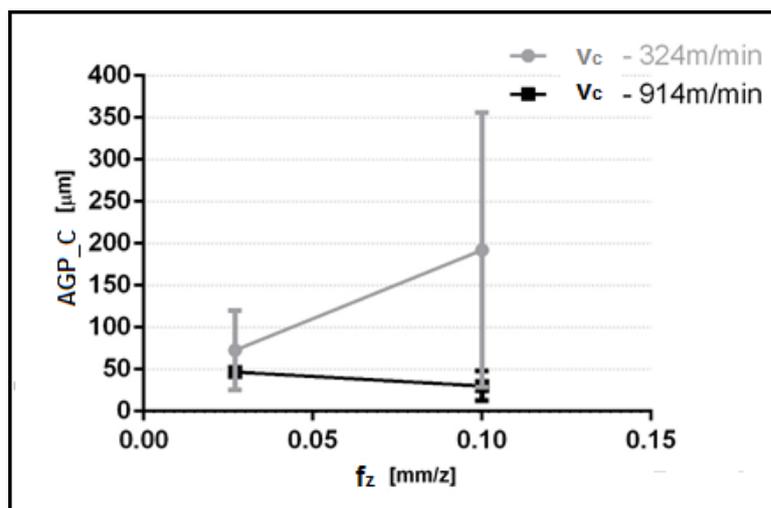


Figura 61 - Efeito da interação $v_c \cdot f_z$ em AGP_C com 95% de IC

A componente da força de corte F_{zN} não apresentou adequação à um modelo de regressão linear de forma satisfatória. A hipótese da componente F_{zN} apresentar forte influência em AGP_C sendo responsável por puxar a peça na direção do eixo da ferramenta não se confirmou, neste caso a componente consegue explicar 50% das ocorrências de AGP_C , conforme coeficiente de determinação $R^2=0,5050$. A componente F_{zP} apresenta R^2 semelhante, porém será descartado pela hipótese de não haver efeito “ploughing” no corte concordante. A **Tabela 13** apresenta o R^2 para todas as componentes da força de corte. A **Figura 62** mostra um gráfico de dispersão e a curva de regressão linear para F_{zN} , nota-se que há grande dispersão dos pontos dificultando o ajuste da reta. Não serão apresentadas as regressões para o restante das componentes de força que apresentaram $R^2 < 50\%$.

Tabela 13 - Análise de regressão linear das componentes de força com AGP_C

AGP_C	F_{zN}	F_{zP}	F_{yN}	F_{yP}	F_{xN}	F_{xP}
Adequação à reta (R^2)	0,505	0,4962	0,3152	0,0007301	0,4073	0,07536
F_{value} para inclinação	46,93	45,3	21,17	0,03361	31,61	3,749
P_{value} para inclinação	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,8553	< 0,0001	0,059
Desvio de zero?	yes	yes	yes	no	yes	no
Número de ensaios	48	48	48	48	48	48

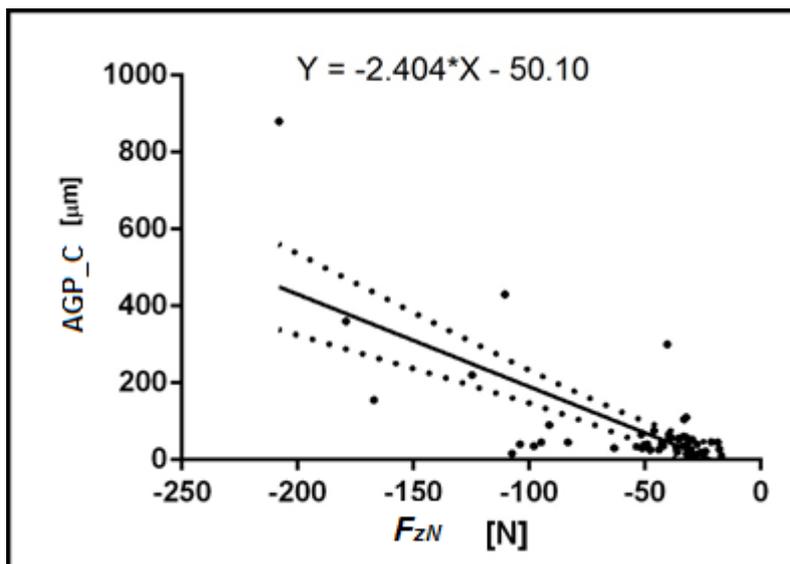


Figura 62 - Gráfico de dispersão e regressão linear F_{zN} x AGP_C , com 95% de IC

A **Tabela 14** apresenta resultados de ANOVA para a espessura da rebarba formada pelo gume principal em fresamento concordante (AGP_C), a tabela está organizada em ordem crescente de P_{value} e com valores significativos com $P < 0,05$ (5%) destacados na tabela. Nela observa-se que a v_c é a única variável significativa numa análise individual dos parâmetros. A interação dupla $f_z * a_e$ também se mostrou influente, bem como a interação tripla $v_c * f_z * a_e$ onde a v_c é inserida na combinação $f_z * a_e$. A **Figura 63** apresenta graficamente as médias com intervalo de confiança (IC) de 95% dos parâmetros de corte analisados individualmente. A **Figura 64** apresenta o gráfico de interação $f_z * a_e$ onde para $a_e = 1/4D$ o maior nível de avanço apresentou o melhor resultado, para $a_e = 3/4D$ o menor nível de f_z apresentou melhor resultado.

Os mesmos parâmetros influentes para espessura foram os mesmos encontrados para altura, diferente do que encontraram (NIKNAM; SONGMENE, 2013). Nos seus resultados os parâmetros que são influentes na altura da rebarba não os mesmo para espessura, neste caso f_z foi o parâmetro que influenciou em EGP_C .

Tabela 14 - Dados de ANOVA para EGP_C

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	P value (%)
v_c	1	219335	219335	9,626	0,40%
$f_z:a_e$	1	212255	212255	9,316	0,46%
$v_c:f_z:a_e$	1	187963	187963	8,249	0,72%
a_e	1	81041	81041	3,557	6,84%
$v_c:a_e$	1	57637	57637	2,53	12,16%
$v_c:f_z$	1	48610	48610	2,133	15,39%
$v_c:f_z:a_p$	1	42323	42323	1,857	18,24%
f_z	1	34954	34954	1,534	22,45%
$f_z:a_p$	1	27836	27836	1,222	27,73%
$a_p:a_e$	1	20061	20061	0,88	35,51%
$v_c:a_p:a_e$	1	16722	16722	0,734	39,80%
a_p	1	2972	2972	0,13	72,04%
$v_c:a_p$	1	1293	1293	0,057	81,33%
$f_z:a_p:a_e$	1	1148	1148	0,05	82,39%
$v_c:f_z:a_p:a_e$	1	58	58	0,003	96,00%
Residual	32	729118	22785		

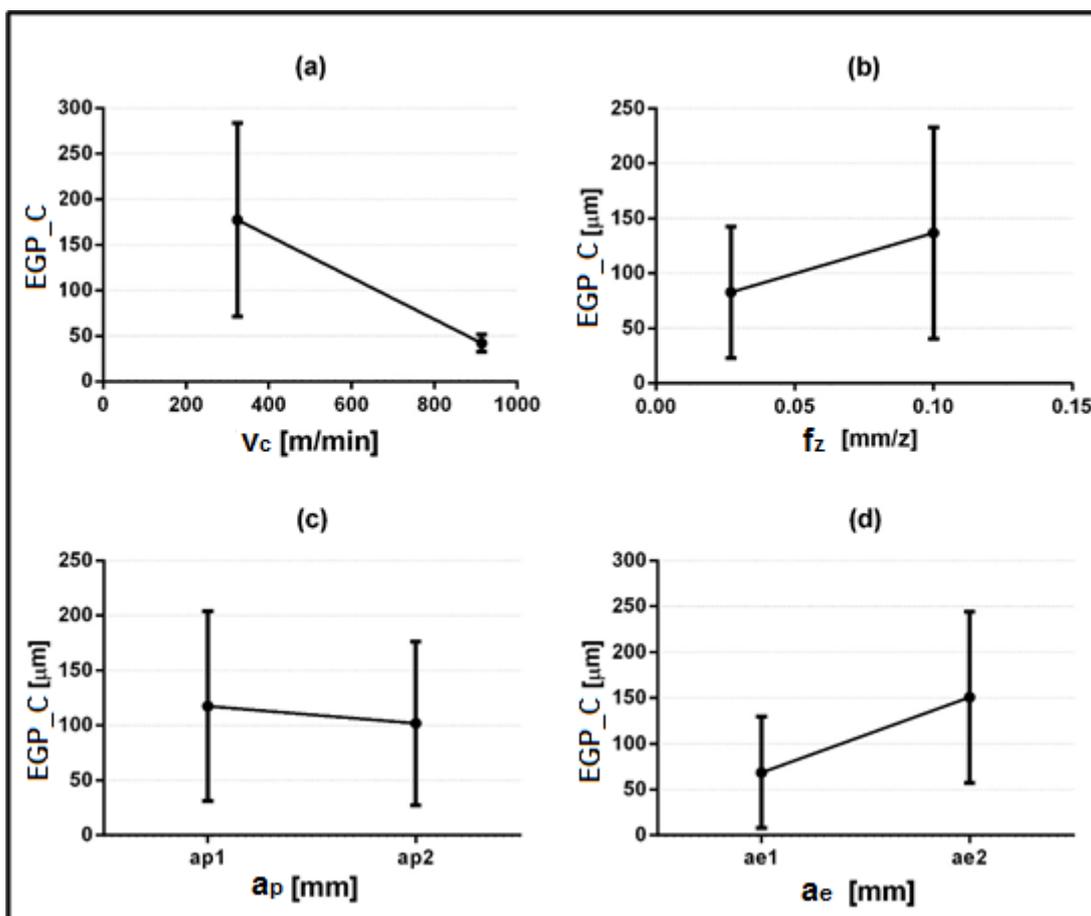


Figura 63 - Efeito dos parâmetros de corte na EGP_C, com 95% de IC

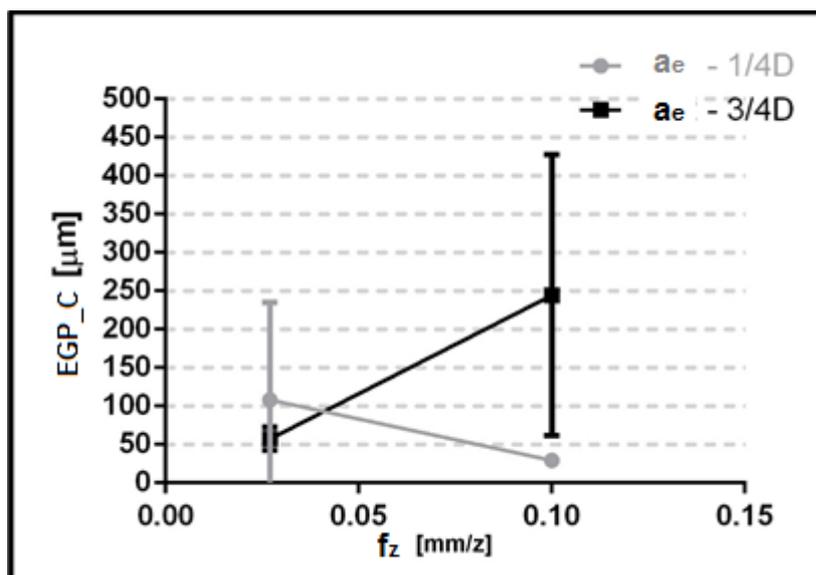


Figura 64 - Efeito da interação $f_z \cdot a_e$ em EGP_C com 95% de IC

A componente da força de corte F_{zN} não apresentou adequação a um modelo de regressão linear de forma satisfatória. A hipótese da componente F_{zN} apresentar forte influência em EGP_C por ser responsável por puxar a peça na direção do eixo da ferramenta não se confirmou, neste caso a componente consegue explicar 38% das ocorrências de EGP_C , conforme coeficiente de determinação $R^2=0,3791$. A **Tabela 15** apresenta o R^2 para todas as componentes da força de corte. A **Figura 65** mostra um gráfico de dispersão e a curva de regressão linear para F_{zN} , nota-se que há grande dispersão dos pontos dificultando o ajuste da reta. Não serão apresentadas as regressões para o restante das componentes de força que apresentaram $R^2 < 50\%$.

Tabela 15 - Análise de regressão linear das componentes de força com EGP_C

EGP_C	F_{zN}	F_{zP}	F_{yN}	F_{yP}	F_{xN}	F_{xP}
Adequação à reta (R^2)	0,3791	0,3887	0,2319	0,00006802	0,2774	0,06384
F_{value} para inclinação	28,09	29,25	13,89	0,003129	17,66	3,137
P_{value} para inclinação	< 0,0001	< 0,0001	0,0005	0,9556	0,0001	0,0832
Desvio de zero?	yes	yes	yes	no	yes	no
Número de ensaios	48	48	48	48	48	48

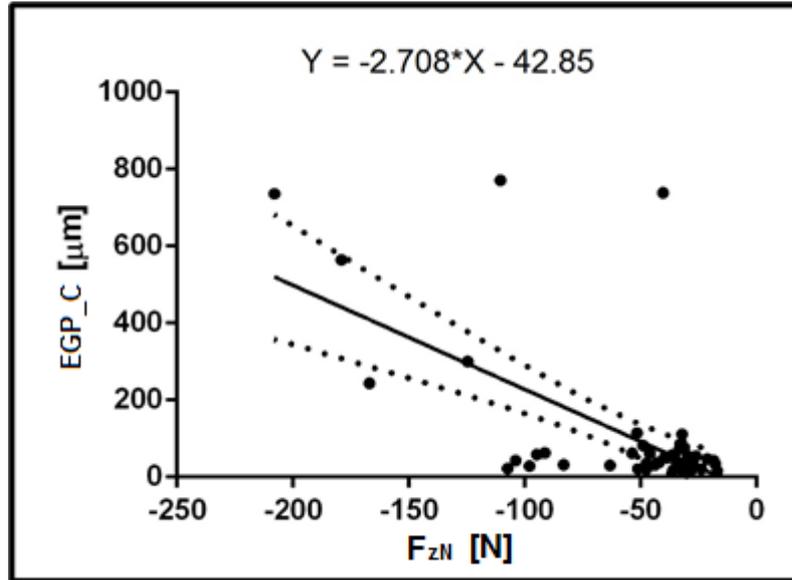


Figura 65 - Gráfico de dispersão e regressão linear F_{zN} x EGP_C , com 95% de IC

4.2.2. Dimensões da Rebarba formada pelo Gume Secundário na Lateral do Rebaixo no Fresamento Concordante

As rebarbas laterais formadas pelo gume secundário em fresamento concordante puro apresentaram formato típico, tipo secundária, conforme **Figura 66**. Diferentemente da rebarba lateral discordante, a concordante não apresentou outras formações devido a variação de a_e . No caso do corte discordante ela variou do tipo secundária para primária com $a_e=3/4D$. A formação desta rebarba é sempre na entrada do gume, iniciando-se o corte com um impacto da ferramenta na borda da peça com espessura máxima, diferentemente do discordante em que a formação é na saída do gume da peça. Quando formada, a rebarba terá seu tamanho sempre pequeno (GILLESPIE; BLOTTER, 1976).

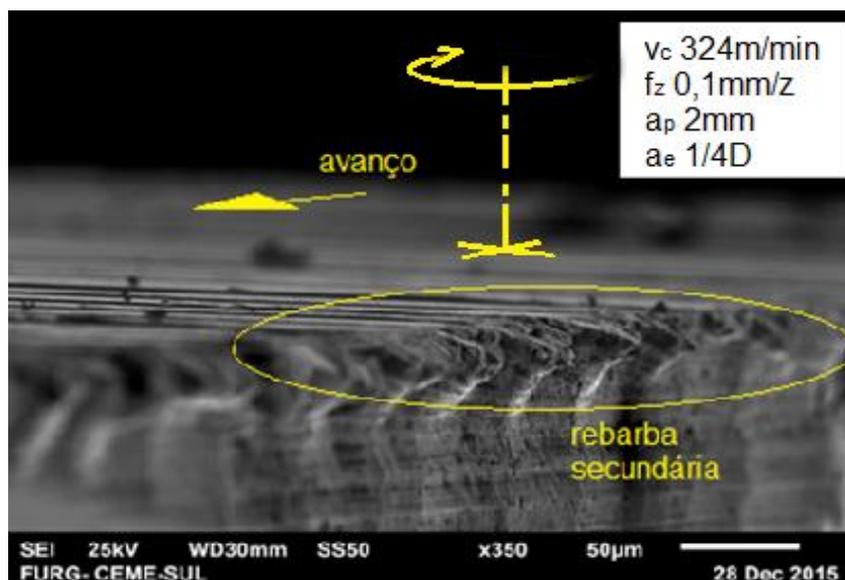


Figura 66 - Rebarba formada pelo gume secundário em fresamento concordante

A **Tabela 16** apresenta os resultado da ANOVA para a altura da rebarba formada pelo gume secundário em corte concordante (AGS_C), ela é organizada de forma decrescente de P_{value} , onde valores significativos com $P < 0,05$ (5%) são destacados na tabela. Observa-se a influência direta de f_z e a_e , assim como a influência da sua interação, $f_z * a_e$. A **Figura 67** mostra a média com intervalo de confiança (IC) de 95% dos efeitos dos parâmetros de corte, onde é possível notar a influência significativa de f_z e a_e . A **Figura 68** mostra o efeito significativo da interação $f_z * a_e$, sendo que com $a_e = 1/4D$ o f_z não influencia na altura, porém com $a_e = 3/4D$ o aumento de f_z aumentou AGS_C. contrapondo o resultado encontrado por (OLVERA; BARROW, 1996), onde o aumento de f_z reduziu a altura.

Tabela 16 - Dados de ANOVA para AGS_C

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	P value (%)
f_z	1	10188	10188	13,093	0,10%
a_e	1	10188	10188	13,093	0,10%
$f_z:a_e$	1	7220	7220	9,279	0,46%
$v_c:f_z:a_p:a_e$	1	3576	3576	4,596	3,98%
$v_c:f_z:a_p$	1	2050	2050	2,635	11,44%
$v_c:a_p:a_e$	1	1998	1998	2,568	11,89%
$v_c:f_z$	1	1614	1614	2,074	15,96%
v_c	1	1061	1061	1,364	25,15%
a_p	1	758	758	0,974	33,12%
$f_z:a_p$	1	747	747	0,959	33,47%
$v_c:a_p$	1	576	576	0,74	39,59%
$f_z:a_p:a_e$	1	525	525	0,674	41,76%
$v_c:f_z:a_e$	1	251	251	0,322	57,42%
$v_c:a_e$	1	4	4	0,005	94,15%
$a_p:a_e$	1	2	2	0,002	96,19%
Residual	32	24899	778		

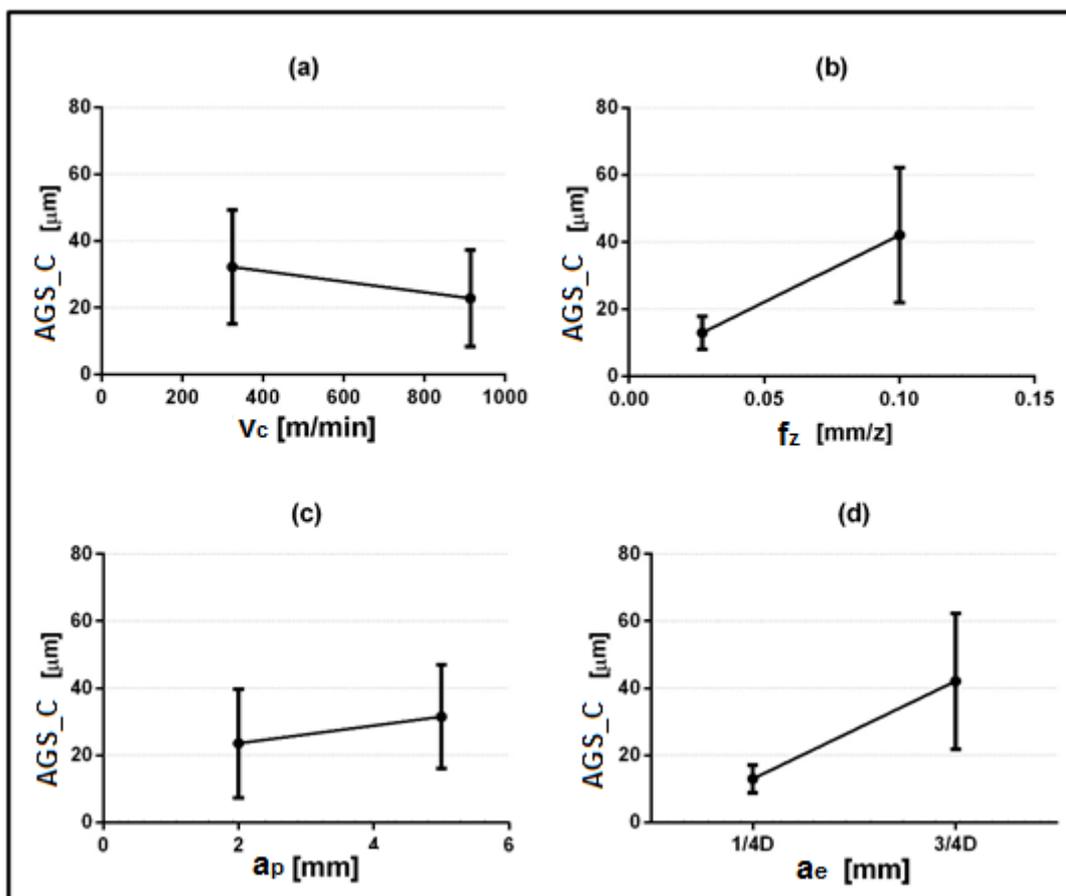


Figura 67 - Efeito dos parâmetros de corte na AGS_C, com 95% de IC

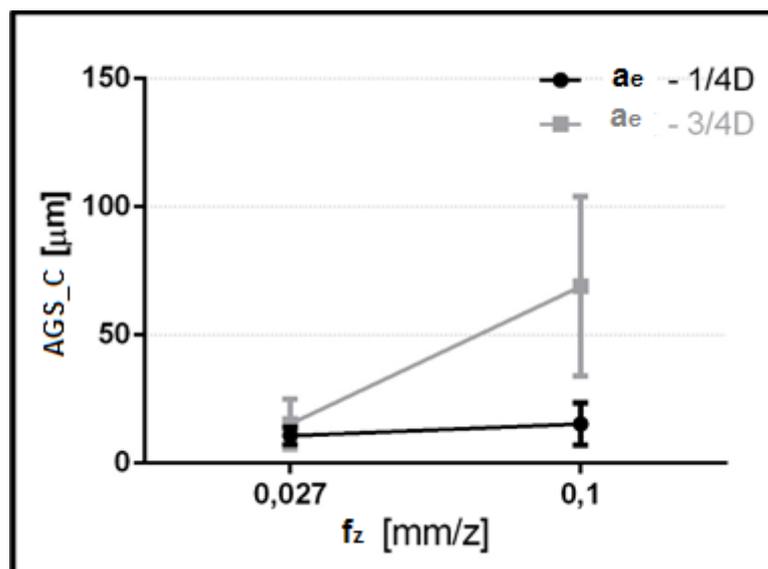


Figura 68 - Efeito da interação $f_z \cdot a_e$ em HL_C com 95% de IC

A componente da força de corte F_{yN} não apresentou adequação a um modelo de regressão linear de forma satisfatória. A hipótese da componente F_{yN} apresentar forte influência em AGS_C não se confirmou, neste caso a componente consegue explicar 16% das ocorrências de AGS_C , conforme coeficiente de determinação $R^2=0,1638$. A componente F_{xP} teve uma adequação melhor, 43%. A **Tabela 17** apresenta o R^2 para todas as componentes da força de corte. A **Figura 69** mostra um gráfico de dispersão e a curva de regressão linear para F_{xP} que foi a componente que com curva melhor adaptada, nota-se que há grande dispersão dos pontos dificultando o ajuste da reta. Não serão apresentadas as regressões para o restante das componentes de força que apresentaram $R^2 < 40\%$.

Tabela 17 - Análise de regressão linear das componentes de força com AGS_C

AGS_C	F_{zN}	F_{zP}	F_{yN}	F_{yP}	F_{xN}	F_{xP}
Adequação à reta (R^2)	0,1675	0,2191	0,1638	0,00722	0,1497	0,4374
F_{value} para inclinação	9,256	12,91	9,012	0,3345	8,096	35,76
P_{value} para inclinação	0,0039	0,0008	0,0043	0,5658	0,0066	< 0,0001
Desvio de zero?	yes	yes	yes	no	yes	yes
Número de ensaios	48	48	48	48	48	48

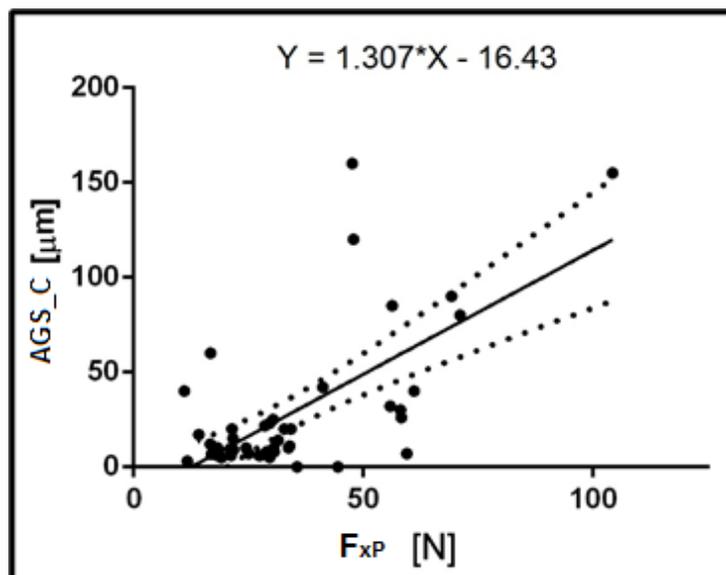


Figura 69 - Gráfico de dispersão e regressão linear F_{xP} x AGS_C , com 95% de IC

A **Tabela 18** mostra os dados de ANOVA para a espessura da rebarba lateral formada pelo gume secundário em fresamento concordante (EGS_C). A tabela está organizada em ordem crescente de P_{value} e os valores significativos com $P < 0,05$ (5%) estão destacados. As variáveis a_e e f_z tem efeito significativo quando analisadas individualmente. As interações pareadas $f_z * a_e$ e $v_c * f_z$ também tem efeito significativo. A v_c não apresentou efeito apenas interagindo com f_z . A **Figura 70** mostra as médias com intervalo de confiança de 95% dos efeitos das parâmetros de corte analisados individualmente, onde é possível observar a influência significativa de f_z e a_e . A **Figura 71** e a **Figura 72** mostram as interações $f_z * a_e$ e $v_c * f_z$, respectivamente. A primeira figura mostra que para $a_e = 1/4D$ a variação do avanço na causa efeito em EGS_C , com $a_e = 3/4D$ o menor nível de f_z apresenta melhor resultado. A segunda figura mostra que o f_z só causa efeito significativo com o menor nível de v_c , sendo que o menor nível de f_z também apresenta melhor resultado.

Tabela 18 - Dados de ANOVA para EGS_C

EGS_C	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	P value (%)
a _e	1	15080	15080	13,42	0,09%
f _z	1	13300	13300	11,83	0,16%
f _z :a _e	1	13114	13114	11,67	0,17%
v _c :f _z	1	6311	6311	5,62	2,40%
v _c :f _z :a _e	1	3997	3997	3,56	6,84%
v _c	1	3806	3806	3,39	7,50%
v _c :f _z :a _p :a _e	1	1411	1411	1,26	27,09%
f _z :a _p	1	484	484	0,43	51,64%
a _p :a _e	1	468	468	0,42	52,35%
f _z :a _p :a _e	1	329	329	0,29	59,24%
v _c :a _p :a _e	1	310	310	0,28	60,30%
a _p	1	94	94	0,08	77,48%
v _c :f _z :a _p	1	60	60	0,05	81,83%
v _c :a _p	1	55	55	0,05	82,56%
v _c :a _e	1	10	10	0,01	92,44%
Residual	32	35959	1124		

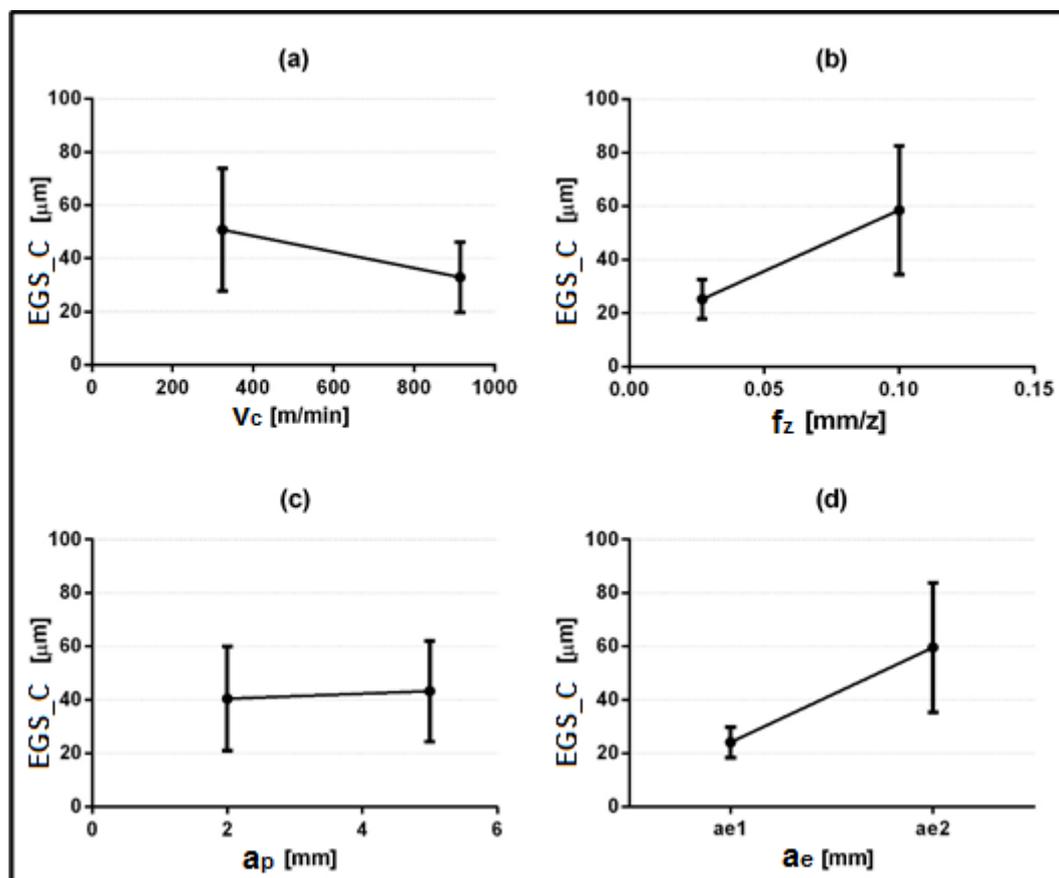


Figura 70 - Efeito dos parâmetros de corte na EGS_C, com 95% de IC

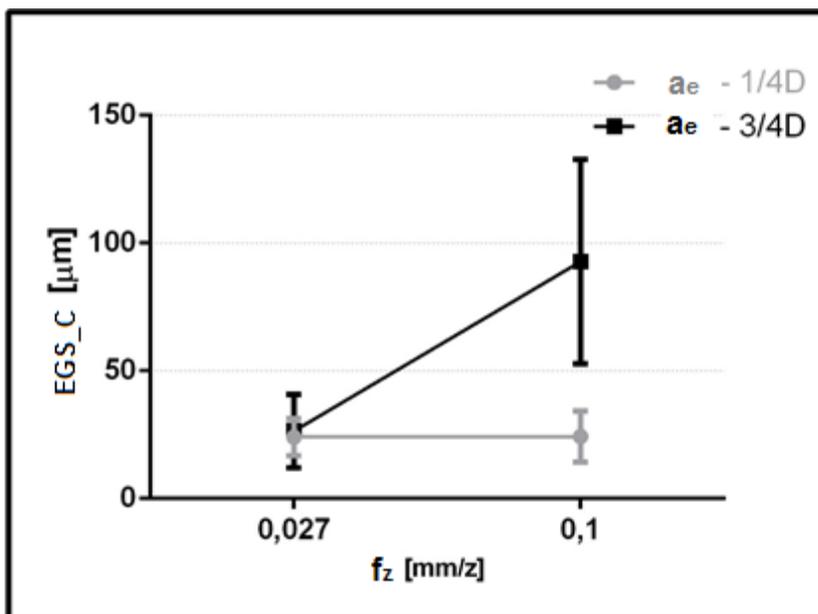


Figura 71 - Efeito da interação $f_z \cdot a_e$ em EGS_C com 95% de IC

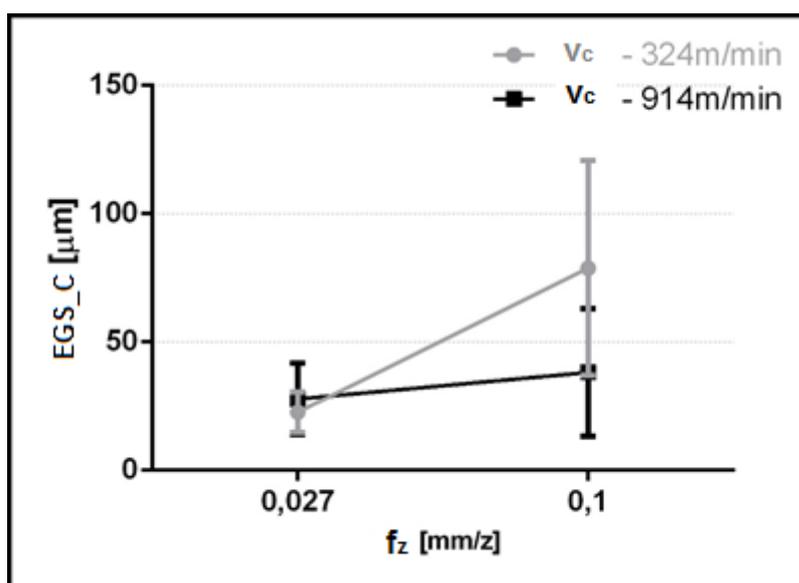


Figura 72 - Efeito da interação $f_z \cdot v_c$ em EGS_C com 95% de IC

A componente da força de corte F_{yN} não apresentou adequação a um modelo de regressão linear de forma satisfatória. A hipótese da componente F_{yN} apresentar forte influência em EGS_C não se confirmou, neste caso a componente consegue explicar 25% das ocorrências de EGS_C , conforme coeficiente de determinação $R^2=0,2497$. A componente F_{zP} teve uma adequação melhor, 33,9%. A **Tabela 19** apresenta o R^2 para todas as componentes da força de corte. A **Figura 73** mostra um

gráfico de dispersão e a curva de regressão linear para F_{zP} que foi a componente com curva melhor adaptada, nota-se que há grande dispersão dos pontos dificultando o ajuste da reta. Não serão apresentadas as regressões para o restante das componentes de força que apresentaram $R^2 < 30\%$.

Tabela 19 - Análise de regressão linear das componentes de força com EGS_C

EGS_C	F_{zN}	F_{zP}	F_{yN}	F_{yP}	F_{xN}	F_{xP}
Adequação à reta (R^2)	0,2708	0,3387	0,2497	0,001829	0,2229	0,2739
F_{value} para inclinação	17,08	23,56	15,31	0,08427	13,19	17,35
P_{value} para inclinação	0,0002	< 0,0001	0,0003	0,7729	0,0007	0,0001
Desvio de zero?	yes	yes	yes	no	yes	yes
Número de ensaios	48	48	48	48	48	48

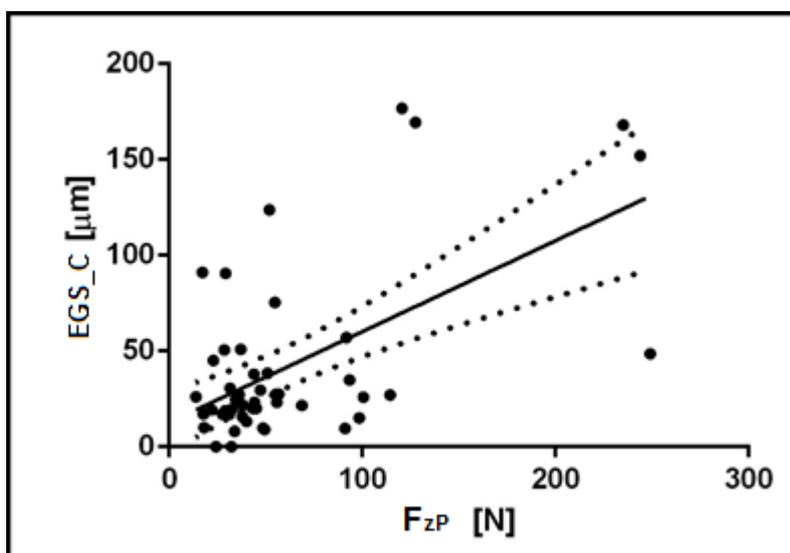


Figura 73 - Gráfico de dispersão e regressão linear F_{zP} x EGS_C, com 95% de IC

4.3. Comparativo Entre Fresamento Concordante e Discordante

A **Figura 74** apresenta um gráfico que traça um comparativo entre as dimensões de rebarba obtidas no fresamento concordante e no fresamento discordante, as medidas de rebarba apresentadas no gráfico são os valores médios de todos os ensaios. Na primeira parte há uma comparação entre a altura média da rebarba formada pelo gume principal no fresamento concordante e no discordante. Na segunda parte a comparação é com a espessura da rebarba formada por este gume. De maneira geral, as rebarbas formadas pelo gume principal na borda do rebaixo são de menor tamanho (altura e espessura) no fresamento concordante, pois a rebarba é formada na saída do gume, enquanto no fresamento discordante a rebarba é formada na entrada do gume. A terceira parte do gráfico compara a altura média da rebarba formada pelo gume secundário no fresamento concordante e no discordante. A quarta parte a comparação é com a espessura da rebarba formada pelo gume secundário. A diferença de dimensão da rebarba entre o fresamento concordante e discordante é bastante evidente, o gume secundário produz rebarbas bem menores no fresamento concordante, pois estas rebarbas são formadas na entrada do gume na borda da peça, ao contrário do fresamento discordante, que forma rebarba na saída do gume. Além disto, há formação de rebarbas do tipo primária quando o engajamento da ferramenta na peça é de $3/4D$, o que faz com que as rebarbas formadas pelo gume secundário tenham valores médios bem maiores no fresamento discordante.

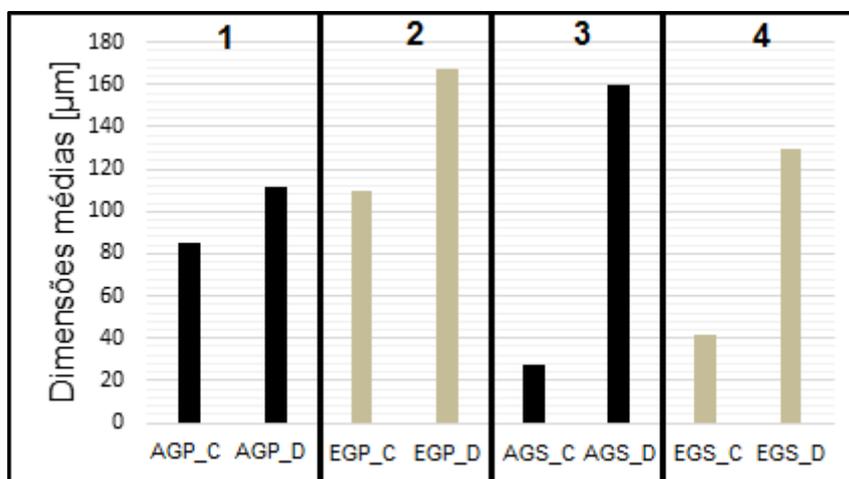


Figura 74 - Dimensões médias das rebarbas nos sentidos de corte concordante e discordante

4.4. Escolha dos Parâmetros de Corte com Melhor Resultado na Redução das Rebarbas

Através da análise visual das tabelas de ANOVA e dos gráficos de influência dos parâmetros de corte, foi possível montar a **Tabela 20** que aponta qual foi o nível de cada parâmetros que apresentou melhor resultado de redução nas dimensões das rebarbas. O número 1 representa o nível mais baixo e o número 2, o nível mais alto. Foram analisados os parâmetros individualmente e as suas interações. Em alguns casos, parâmetros analisados de forma individual, apresentaram resultado oposto quando analisado em interação com outros parâmetros. Nestes casos estão destacados com asterisco, para que possam ser reavaliados em caso de ajuste da escolha da melhor combinação de parâmetros.

Tabela 20 – Escolha dos parâmetros de corte com melhor resultado em redução das dimensões da rebarba

	v_c	f_z	a_p	a_e
AGP_D	2	2	NS	1
EGP_D	2	2	NS	1
AGS_D	NS	1*	1	1
EGS_D	NS	1*	1	1
AGP_C	2	2*	NS	1
EGP_C	2	2*	NS	1
AGS_C	NS	1	NS	1
EGS_C	2	1	NS	1

A velocidade de corte (v_c) mostrou ter, de uma maneira geral, melhor resultado em seu nível mais alto, sendo que nas rebarbas formadas pelo gume secundário os resultados nem sempre foram significativos (NS), ou seja, pode-se usar qualquer nível. O avanço (f_z) apresentou resultados diferentes de dimensões da rebarba no gume principal e no gume secundário, porém, os marcados com asterisco na tabela podem ser modificados conforme a conveniência, pois apresentaram resultados opostos quando analisados individualmente e na interação com outros parâmetros.

Portanto, podem ser modificados, flexibilizando a escolha da combinação de parâmetros. A profundidade de corte (a_p) mostrou melhor resultado com nível mais baixo na rebarba formada pelo gume secundário no fresamento discordante, nas demais rebarbas não se mostrou significativo (NS), podendo ser usado qualquer nível. A largura de corte (a_e) apresentou melhor resultado com 1/4D em todas as rebarbas, visto que na rebarba formada pelo gume secundário no fresamento discordante o a_e de 3/4D provocou formação de rebarba do tipo primária.

Portanto, chegou-se a seguinte combinação de parâmetros:

Tabela 21 - Seleção dos parâmetros de corte

	v_c [m/min]	f_z [mm/z]	a_p [mm]	a_e [mm]
Fresamento concordante	914	0,027	2	1/4D
Fresamento discordante	914	0,1	2	1/4D

A combinação de parâmetros que melhor apresentou resultado para o fresamento discordante foi empregada no CP07. O ANEXO VI – IMAGENS DOS CPs USINADOS (CORTE DISCORDANTE) mostra as imagens de todos os CPs. Nota-se que esta combinação de parâmetros, além de menor formação de rebarba, não apresentou adesão de cavado na parede do canal, fenômeno muito comum em corte discordante de materiais dúcteis. A ocorrência de maior acúmulo de cavaco foi, principalmente quando se utilizou o maior nível de a_p (5mm).

Para o corte concordante, a melhor combinação de parâmetros se aplicou no CP05. O ANEXO V – IMAGENS DOS CPs USINADOS (CORTE CONCORDANTE) mostra as imagens fotográfica de todos os CPs. Nota-se que para o maior nível de f_z (0,1mm/z), as marcas da aresta de corte ficaram bem pronunciadas, estando visíveis a olho nu.

A **Figura 75** apresenta as imagens fotográficas dos corpos de prova (CP) que apresentaram os melhores resultados na redução das dimensões da rebarba. A primeira imagem é do fresamento concordante (CP05_C) e a segunda do fresamento discordante (CP07_D).

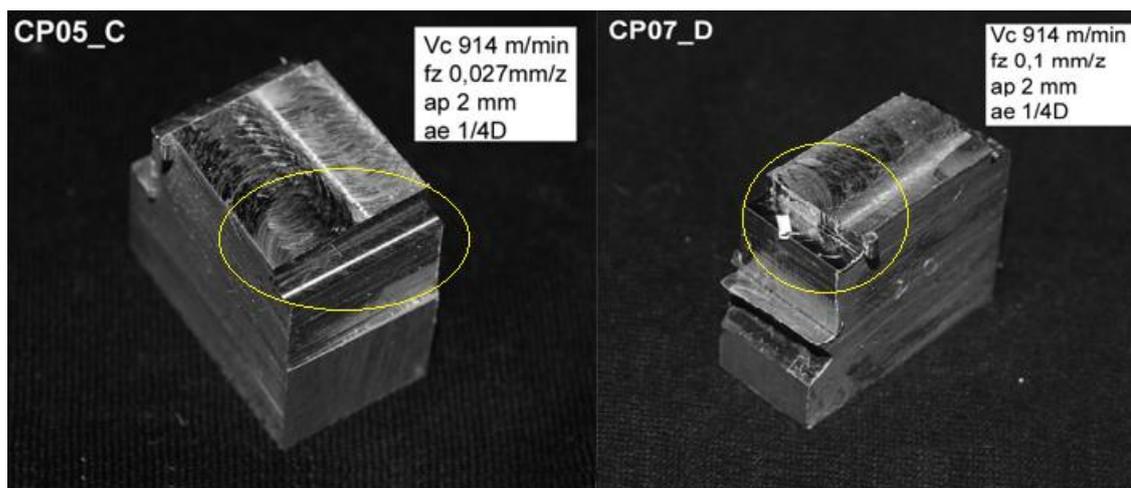


Figura 75 - Imagem dos CPs com melhor resultado em redução de rebarbas

Na **Figura 76** a imagem fotográfica mostra grandes desvios de forma no rebaixo, resultado da instabilidade da ferramenta na entrada da peça. Esta instabilidade ocorreu apenas com combinação de parâmetros em seus níveis mais altos. A primeira imagem é do fresamento concordante (CP16_C) e a segunda do fresamento discordante (CP16_D). Neste caso, a medição da rebarba fica prejudicada no trecho com desvio de forma, devendo ser descartado das medições. O critério adotado neste trabalho, de excluir das medições de rebarba 2mm das borda de entrada e saída da fresa, buscando eliminar os efeitos de instabilidade de corte, não foi adequado para esta combinação de parâmetros de corte.

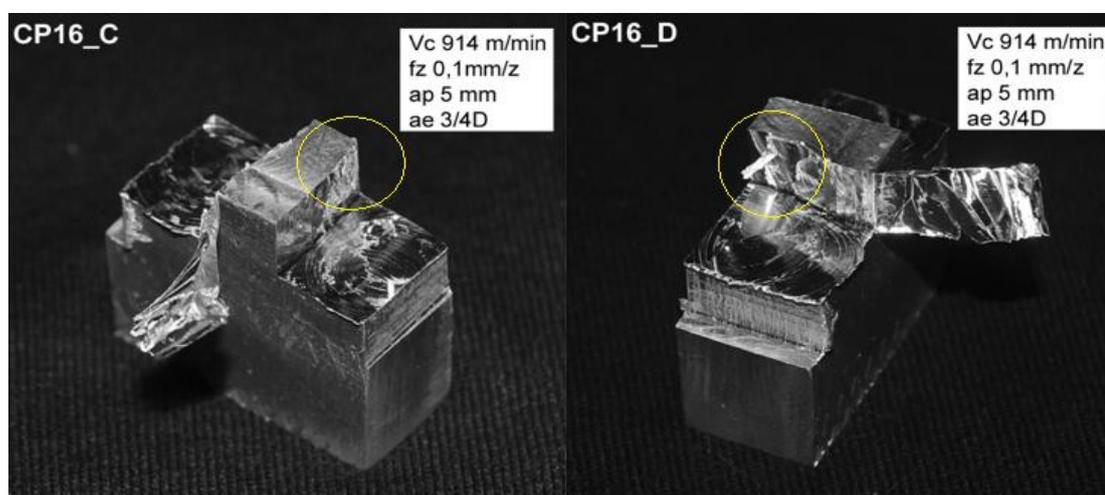


Figura 76 – Resultado da instabilidade do corte no fresamento concordante e discordante

5. CONCLUSÕES

Fresamento Discordante:

Para a rebarba formada pelo gume principal, o aumento a v_c foi significativa na redução da rebarba, tanto na altura quanto na espessura, confirmando as teorias apresentadas sobre a influência deste parâmetro na formação da rebarba. Já o f_z não influenciou individualmente o tamanho da rebarba como se esperava, somente interagindo com a_e . O aumento de f_z somente reduziu a rebarba com $a_e=1/4D$, contrariando o encontrado por outros autores. A utilização de outros materiais e ferramentas pode ter ocasionado essa diferença, já que a formação da rebarba é sensível a estes fatores. Na análise da rebarba formada pelo gume secundário, a_e foi o parâmetro predominantemente influente nas dimensões da rebarba, devido ao fato de que para $a_e=1/4D$ a rebarba foi secundária em todos os ensaios. Já para $a_e=3/4D$, a rebarba formada foi do tipo primária em forma de onda em todos os ensaios. Pode-se concluir que o níveis de a_p utilizados para $a_e=3/4D$, não foram suficientes para a transição de rebarba primária para secundária.

Fresamento Concordante:

Para a rebarba formada pelo gume principal, o parâmetro mais significativo na redução da rebarba, tanto para altura quanto para espessura, foi a v_c . Numa análise prévia, o a_e não teria influência nessa rebarba, porém apresentou resultado significativo na redução da rebarba com $a_e=1/4D$. A interação de $a_e=1/4D$ e o maior nível de f_z reduziu o tamanho da rebarba. O maior nível de a_p interagindo com $a_e=1/4D$ reduziu a espessura, mas não teve influência na altura. Na rebarba lateral, os parâmetros mais influentes na redução da rebarba foram a_e e f_z , tanto para altura quanto espessura. Seus níveis mais baixos apresentaram as menores dimensões. Porém analisando a interação f_z*a_e , é possível utilizar o f_z de nível mais alto.

De maneira geral, o corte concordante apresentou dimensões médias de rebarba menores que o corte discordante.

Nenhuma das componentes de forças de usinagem apresentaram relação direta com a formação de rebarba. Todas apresentaram $R^2 < 75\%$, ou seja, os dados

de força se mostraram muito dispersos no gráfico, não conseguindo adequação a um modelo de regressão linear. O método de utilizar as forças médias não é adequado para relacionar as forças de usinagem com a formação de rebarba, seria necessário identificar as forças no exato instante da saída do gume pela borda da peça, o que exigiria uma taxa de aquisição de forças bem mais elevada do que a utilizada neste trabalho.

Na escolha dos parâmetros de corte com o melhor resultado na redução das rebarbas, encontrou-se, no fresamento discordante, a mesma combinação de parâmetros para as rebarbas formadas pelos gumes principal e secundário, assim como no corte concordante. Porém, quando comparados as combinações entre os dois sentidos de corte, houve mudança apenas do avanço. Estas seleções de parâmetros também geraram os melhores resultados numa análise visual do acabamento das superfícies. Na combinação dos parâmetros de melhor resultado em redução de rebarbas, também não houveram cavacos aderidos na parede do canal. Este fenômeno ocorreu em inúmeros testes com cortes discordante, como se pode ver no ANEXO VI, sendo que a profundidade de corte indicou ser influente na ocorrência deste fenômeno.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolver o estudo com maior faixa de parâmetros de corte, podendo também, avaliar outras regiões de formação da rebarba.
- Desenvolver o estudo de formação de rebarba em outros materiais.
- Estudar a formação de rebarba da liga de alumínio em outras operações e processos.
- Desenvolver um estudo com taxa de aquisição mais elevada, adotando uma metodologia adequada para identificar a força de usinagem no exato instante de formação da rebarba.
- Desenvolver estudo específico para identificar os pontos de transição da ocorrência de rebarba primária para secundária, tanto para rebarba formada pelo gume principal quanto para rebarba formada pelo gume secundário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARMAREGO, E. J. A; DESHPANDE, N. P. Computerized Predictive Cutting Models for Forces in End-Milling Including Eccentricity Effects. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 38, n. 1, p. 45–49, 1989.

ASM HANDBOOK. **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**, v. 2, 2001.

ASTME. **American Society of Tool and Manufacturing Engineers**, 1959.

AURICH, J. C.; DORNFELD, D. **Burr - Analysis, Control and Removal**. 3rd. ed. 2009.

AVILA, M. C.; DORNFELD, D. A. On The Face Milling Burr Formation Mechanisms And Minimization Strategies At High Tool Engagement. 2004.

CHERN, G. L. **Analysis of Burr Formation and Breakout in Metal Cutting**. University of California at Berkeley, Berkeley, CA, 1993.

CHERN, G. L. Experimental observation and analysis of burr formation mechanisms in face milling of aluminum alloys. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 46, p. 1517–1525, 2006.

DINIZ, A. E. **Tecnologia da Usinagem dos Metais**. 3°. ed. São Paulo.

FERRARESI, D. **Fundamentos de Usinagem dos Metais**. 3°. ed. São Carlos, 1995.

GILLESPIE, L. K. BURRS PRODUCED BY END MILLING. n. September, 1976.

GILLESPIE, L. K. **Deburring and Edge Finishing Handbook**. SME, 1999.

GILLESPIE, L. K.; BLOTTER, P. T. The Formation and Properties of Machining Burrs. n. February 1976, p. 66–74, 1976.

HASHIMURA, M.; DORNFELD, D. Analysis of Burr Formation Mechanism in Orthogonal Cutting J __. v., n. FEBRUARY 1999, p. 1–7, 1999.

HASHIMURA, M.; HASSAMONTR, J.; DORNFELD, D. A. Effect of In-Plane Exit Angle and Rake Angles on Burr Height and Thickness in Face Milling Operation. v. 121, n. FEBRUARY 1999, 1999.

ISO 13750. **Desenhos Técnicos - Arestas sem Formas Definidas - Vocabulário e Indicações**, 2000.

KILICKAP, E. Modeling and optimization of burr height in drilling of Al-7075 using Taguchi method and response surface methodology. p. 911–923, 2010.

KISHIMOTO W, MIYAKE T, YAMAMOTO A, YAMANAKA K, T. K. Study of Burr Formation in Face Milling. **Bulletin Japan Society of Precision Engineering**, v. 15, n. 1, p. 51–53, 1981.

KO, S.; DORNFELD, D. A. Analysis of fracture in burr formation at the exit stage of metal cutting. 1996.

KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen, Bohren**. 3°. ed. 1990.

MACEDO, S. E. **Análise de forças no fresamento de topo convencional e com altas velocidades de corte**. UFSC, 2001.

MONTGOMERY D. **Design and Analysis of Experiments**. 5. ed. 2001.

NAKAYAMA, K.; ARAI, M. Burr Formation in Metal Cutting. v. 36, p. 33–36, 1987.

NIKNAM, S. A. **Burrs understanding , modeling and optimization during slot milling of aluminium alloys**. 2013.

NIKNAM, S. A.; SONGMENE, V. Factors governing burr formation during high-speed slot milling of wrought aluminum alloys. **Journal of Engineering Manufacture**, v. 227, n. 8, p. 1165–1179, 2013.

NIKNAM, S. A.; ZEDAN, Y.; SONGMENE, V. Machining Burrs Formation & Deburring of Aluminium Alloys. In: MONTEIRO, V. A. **Light Metal Alloys Applications**. 2014.

OLVERA, O.; BARROW, G. An Experimental Study of Burr Formation in Square Shoulder Face Milling. v. 36, n. 9, p. 1005–1020, 1996.

POLLI, M. L. **Análise da Estabilidade Dinâmica do Processo de Fresamento a Altas Velocidades de Corte**. UFSC, 2005.

SANDVIK COROMANT. **CoroKey. (catálogo comercial)**, 2010.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte II**. 3°. ed. UFSC, 1995.

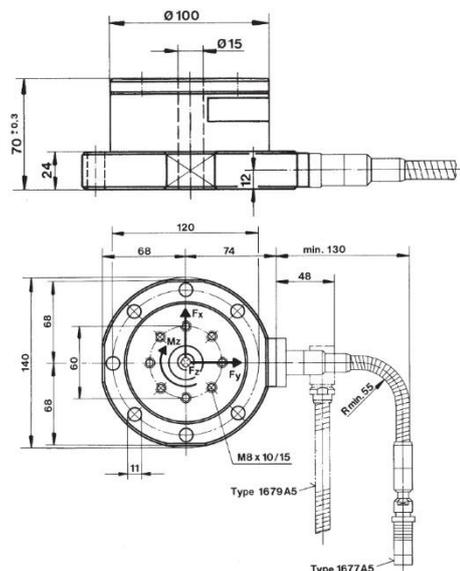
TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4°. ed. 2000.

WANG, G. C.; ZHANG, C. Y. Mechanism of Burr Formation in Milling. v. 260, p. 278–281, 2004.

ANEXO I – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO DINAMÔMETRO

Technical Data

Measuring range	F_x, F_y	kN	-5 ... 5 ¹⁾
	F_z	kN	-5 ... 20 ²⁾
	M_z	N-m	-200 ... 200
Calibrated measuring range 100 %	F_x, F_y	kN	0 ... 5
	F_z	kN	0 ... 20
	M_z	N-m	0 ... 200
10 %	F_x, F_y	kN	0 ... 0,5
	F_z	kN	0 ... 2
	M_z	N-m	0 ... 20
Overload	F_x, F_y	kN	-6/6
	F_z	kN	-6/24
	M_z	N-m	-240/240
Max. bending moment	M_x, M_y	N-m	-400 ... 400
Threshold	F_x, F_y	N	<0,01
	F_z	N	<0,02
	M_z	mN-m	<0,2
Sensitivity	F_x, F_y	pC/N	≈-7,8
	F_z	pC/N	≈-3,5
	M_z	pC/N-m	≈-160
Linearity, all ranges		% FSO	≤±1
Hysteresis, all ranges		% FSO	≤1
Crosstalk	$F_x \leftrightarrow F_y$	%	≤±2
	$F_z \rightarrow F_{x,y}$	%	≤±1
	$F_{x,y} \rightarrow F_z$	%	≤±2
	$F_z \rightarrow M_z$	mN-m/N	≤±0,2
	$F_{x,y} \rightarrow M_z$	mN-m/N	≤±0,7
	$M_z \rightarrow F_{x,y}$	N/N-m	≤±0,5
Rigidity	c_x, c_y	kN/μm	≈0,4
	c_z	kN/μm	≈2
	c_{M_z}	N-m/μrad	≈0,7
	Natural frequency (mounted on rigid base)	$f_n(x,y)$	kHz
	$f_n(z)$	kHz	≈6,3
	$f_n(M_z)$	kHz	≈4,2



Operating temperature range	°C	0 ... 70	
Temperature coefficient of sensitivity	%/°C	-0,02	
Capacitance	F_x, F_y, F_z	pF	185
	M_z	pF	420
Insulation resistance (20 °C)	Ω	>10 ¹³	
Ground isolated	Ω	>10 ⁸	
Connector	Fischer flange 9-pole neg.		
Degree of protection EN60529	-	IP67 ³⁾	
Weight	kg	4,2	

¹⁾ Force application point inside and max. 25 mm above top plate area

²⁾ Force application point max. 20 mm from center

³⁾ With connecting cable Types 1677A5, 1679A5

ANEXO II – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO AMPLIFICADOR

Technical Data

Charge Amplifier

Number of channels		4
Option		8
Connector type		BNC neg.
Option		Fischer 9-pole neg.
Measuring range FS	pC	±200 ... 200 000
Option	pC	±600 ... 600 000
Error (0 ... 50 °C) typ./max.	%	<±0,3/<±1
Drift, measurement type DC/long		
at 25 °C	pC/s	<±0,05
at 50 °C	pC/s	<±0,2
Frequency range (20 Vpp)	kHz	=0 ... >45

Voltage Output

Connector type		D-Sub 15f
Output voltage	V	±10
Output current	mA	<±2
Output resistance	Ω	10
Reset-measure transition	pC	<±2
Zero point error (Reset)	mV	<±10
Output interference signal (0,1 Hz ... 1 MHz)	mVpp	<10

Low-Pass Filter

Order		2
Cutoff frequency (-3 dB)	Hz	100, 300, 600, 1 000, 2 000
Error	%	<±5

High-Pass Filter

Zero point error	mV	<±15
Time constant		
Range 200 ... 200 000 pC		
200 ... 6 269 pC	s	10
6 270 ... 200 000 pC	s	340
Time constant		
Range 600 ... 600 000 pC		
600 ... 18 809 pC	s	33
18 810 ... 600 000 pC	s	1 023
Error (time constant)	%	<±20

Signal Evaluation

Measurand renewal		
Instantaneous value	ms	300
Minimum value	ms	300
Maximum value	ms	300
Bar display	ms	50

Summing Calculator (Option)

Specifications are valid incl. charge amplifier

Number of summation outputs		6
Error (0 ... 50 °C) typ./max.	%	<±0,5/<±1
Output voltage	V	±10
Output current (short-circuit proof)	mA	±2
Output resistance	Ω	10
Zero point error (Reset)	mV	<±10
Output interference signal (0,1 Hz ... 1 MHz)	mVpp	<10
Frequency range (20 Vpp)	kHz	=0 ... >45

RS-232C Interface

Standard		RS-232C (V.24)
Connector type		D-Sub 9f
Pin allocation		
Pin 2		R X D
Pin 3		T X D
Pin 5		GND RS
Max. input voltage, continuous	V	±20
Max. voltage between signal ground and protective ground	V _{RMS}	<20
Baud rates		1 200/9 600/ 19 200/ 38 400/ 57 600/115 200
Data bit		8
Stop bit		1
Parity		none



RS-232C Interface

Standard		RS-232C (V.24)
Connector type		D-Sub 9f
Pin allocation		
Pin 2		R X D
Pin 3		T X D
Pin 5		GND RS
Max. input voltage, continuous	V	±20
Max. voltage between signal ground and protective ground	V _{RMS}	<20
Baud rates		1 200/9 600/ 19 200/ 38 400/ 57 600/115 200
Data bit		8
Stop bit		1
Parity		none

IEEE-488 Interface (Option)

Standard		IEEE-488.1-1987
Connector type		Microribbon Series 57, (24-pole)
Interface functions		SH1, AH1, L4, LEO, T6, TE0, SR1, RL2, PPO, DC1, DT1, CO, E1
Uniline commands		IFC, REN, EOI, SRQ, ATN
Multiline commands		DCL, SDC, GET, UNL, UNT, SPE, SPD
Address range		0 ... 30

Mains Connection

Mains connector type (2P + E, Protective Class I)	Type	IEC 320C14
Voltage	VAC	100 ... 240
Voltage tolerance	%	±10
Mains frequency	Hz	50 ... 60
Power consumption	VA	20
Voltage between signal ground and protective ground	V _{RMS}	<50

Further Technical Data

Degree of protection IEC60529 (DIN40050)	IP	40
Operating temperature	°C	0 ... 50
Storage temperature	°C	-10 ... 60
Relative air humidity non-condensing	%	<80
Vibration resistance (20 Hz ... 2 kHz, duration 16 min., cycle 2 min.)	g	<10
Shock resistance (1 ms)	g	<200
Case dimensions		
without frame (WxHxD)	mm	213,4x128,7x230
with frame (WxHxD) (Option)	mm	247,5x142x253,15
Front panel according to DIN 41494, Part 5	HE/TE	3/42
Weight	kg	3,8

ANEXO III – PLANO DE ENSAIOS

Num CP	velocidade de corte [m/min]	avanço [mm/z]	profundidade de corte [mm]	largura de corte [mm]	Réplica	fator	nível	
							1	2
1	V1	fz1	ap1	ae1	1			
2	V1	fz1	ap2	ae1	1	Vc	314	942
3	V1	fz2	ap1	ae1	1	fz	0,03	0,1
4	V1	fz2	ap2	ae1	1	ap	2	5
5	V2	fz1	ap1	ae1	1	ae	1/4	3/4
6	V2	fz1	ap2	ae1	1			
7	V2	fz2	ap1	ae1	1			
8	V2	fz2	ap2	ae1	1			
9	V1	fz1	ap1	ae2	1			
10	V1	fz1	ap2	ae2	1			
11	V1	fz2	ap1	ae2	1			
12	V1	fz2	ap2	ae2	1			
13	V2	fz1	ap1	ae2	1			
14	V2	fz1	ap2	ae2	1			
15	V2	fz2	ap1	ae2	1			
16	V2	fz2	ap2	ae2	1			
17	V1	fz1	ap1	ae1	2			
18	V1	fz1	ap2	ae1	2			
19	V1	fz2	ap1	ae1	2			
20	V1	fz2	ap2	ae1	2			
21	V2	fz1	ap1	ae1	2			
22	V2	fz1	ap2	ae1	2			
23	V2	fz2	ap1	ae1	2			
24	V2	fz2	ap2	ae1	2			
25	V1	fz1	ap1	ae2	2			
26	V1	fz1	ap2	ae2	2			
27	V1	fz2	ap1	ae2	2			
28	V1	fz2	ap2	ae2	2			
29	V2	fz1	ap1	ae2	2			
30	V2	fz1	ap2	ae2	2			
31	V2	fz2	ap1	ae2	2			
32	V2	fz2	ap2	ae2	2			
33	V1	fz1	ap1	ae1	3			
34	V1	fz1	ap2	ae1	3			
35	V1	fz2	ap1	ae1	3			
36	V1	fz2	ap2	ae1	3			
37	V2	fz1	ap1	ae1	3			
38	V2	fz1	ap2	ae1	3			
39	V2	fz2	ap1	ae1	3			
40	V2	fz2	ap2	ae1	3			
41	V1	fz1	ap1	ae2	3			
42	V1	fz1	ap2	ae2	3			
43	V1	fz2	ap1	ae2	3			
44	V1	fz2	ap2	ae2	3			
45	V2	fz1	ap1	ae2	3			
46	V2	fz1	ap2	ae2	3			
47	V2	fz2	ap1	ae2	3			
48	V2	fz2	ap2	ae2	3			

ANEXO IV – ANÁLISE QUÍMICA DA LIGA USINADA

	Al	Si	Fe	Cu	Mn	M	Zn
1	97,8	1,07	0,170	0,0843	0,436	0,405	0,0091
2	97,8	1,07	0,169	0,0841	0,444	0,402	0,0080
3	97,8	1,04	0,161	0,0844	0,441	0,406	0,0084
4	97,8	1,05	0,161	0,0848	0,442	0,403	0,0086
5	97,8	1,04	0,156	0,0838	0,438	0,402	0,0073
6	97,8	1,03	0,154	0,0836	0,438	0,399	0,0071
Average	97,8	1,05	0,162	0,0842	0,440	0,403	0,0081

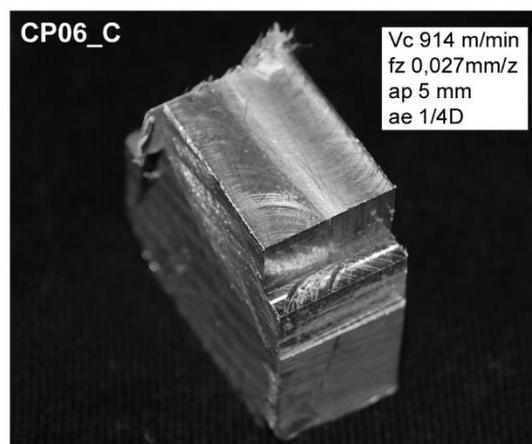
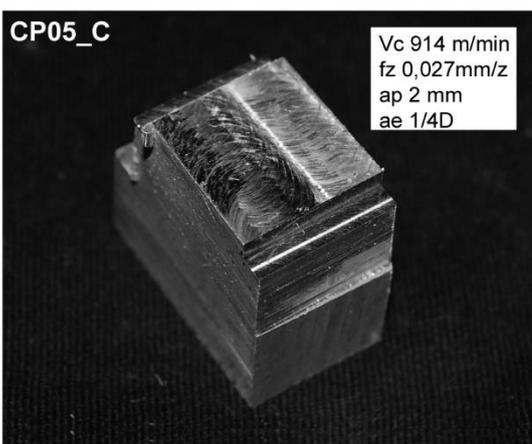
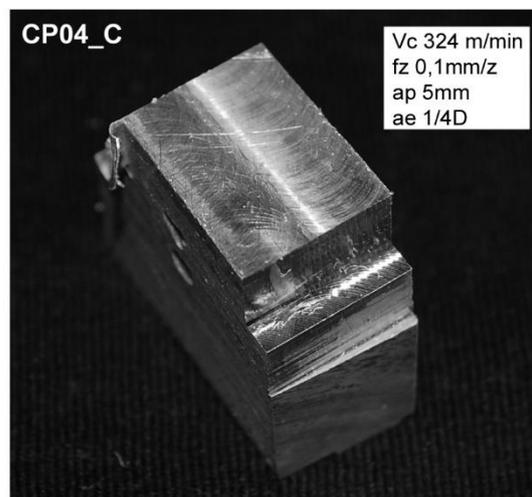
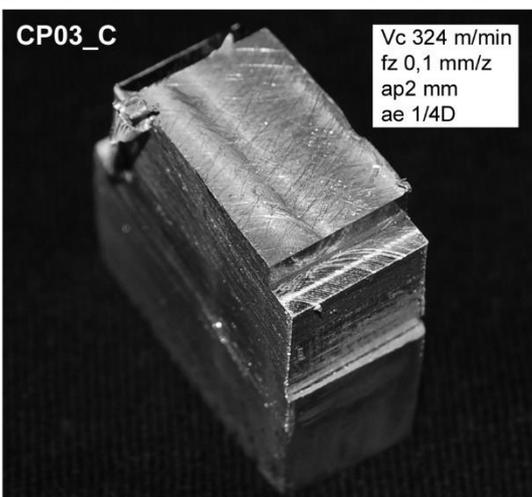
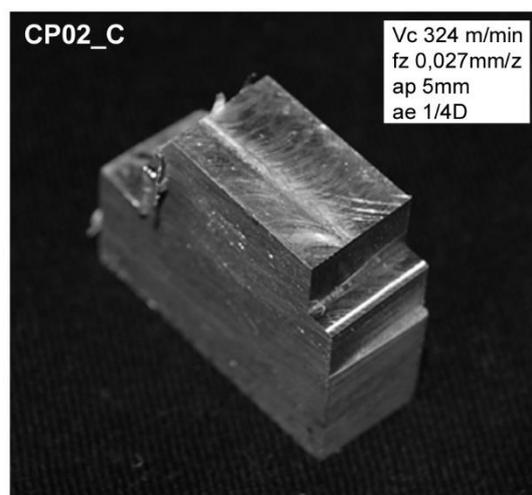
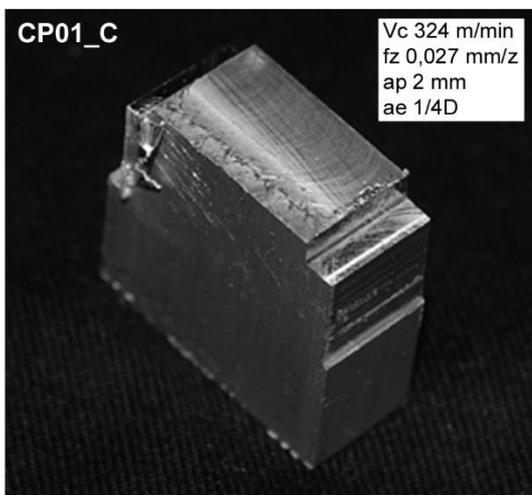
	Cr	Ni	Ti	Be	Ca	Li	Pb
1	0,0042	0,0004	0,0272	< 0,0001	0,0048	< 0,0001	< 0,0006
2	0,0041	0,0003	0,0292	< 0,0001	0,0026	< 0,0001	< 0,0006
3	0,0040	0,0004	0,0273	< 0,0001	0,0013	< 0,0001	< 0,0006
4	0,0040	< 0,0003	0,0272	< 0,0001	0,0011	< 0,0001	< 0,0006
5	0,0041	0,0008	0,0337	< 0,0001	0,0013	< 0,0001	0,0009
6	0,0042	0,0007	0,0272	< 0,0001	0,0009	< 0,0001	0,0007
Average	0,0041	0,0005	0,0286	< 0,0001	0,0020	< 0,0001	< 0,0006

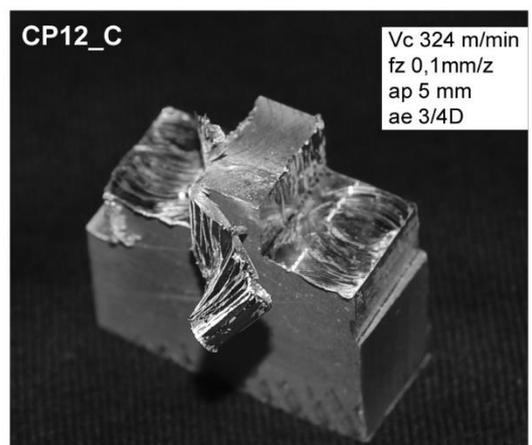
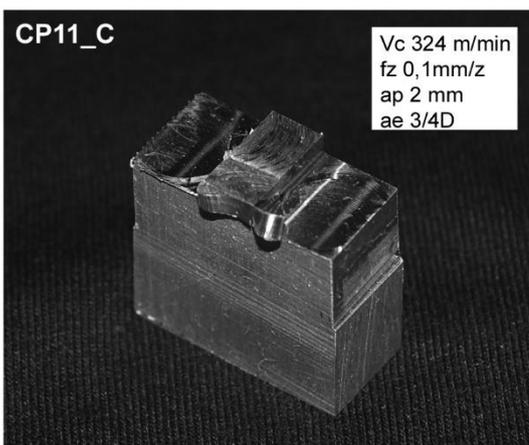
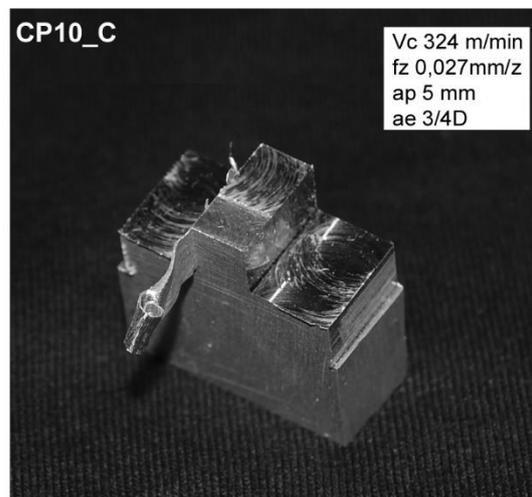
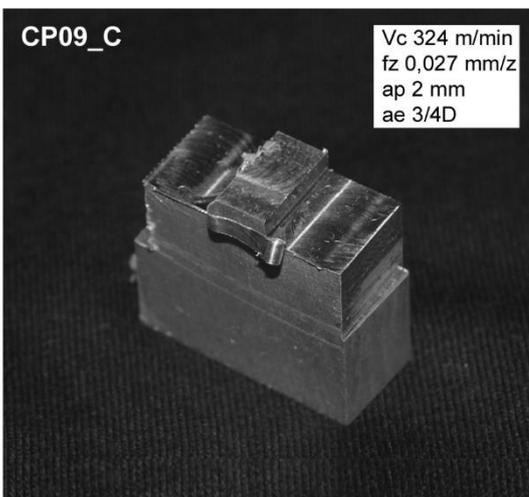
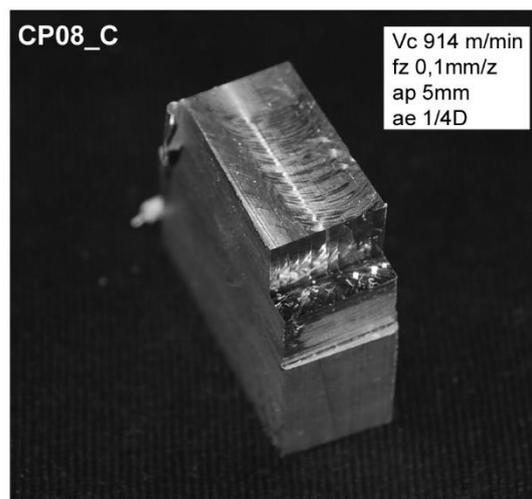
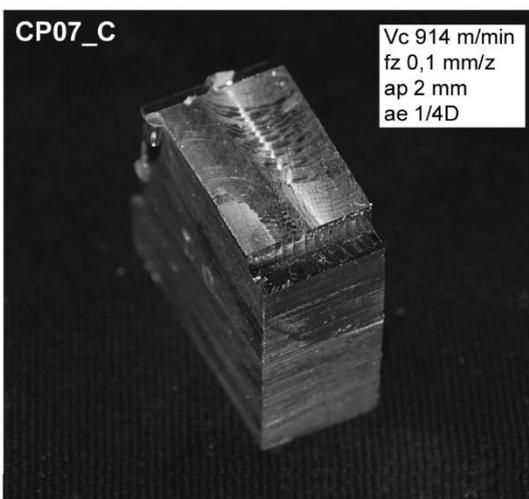
	Sn	Sr	V	Na	Bi	Zr	B
1	< 0,0004	< 0,0001	0,0068	< 0,0001	< 0,0015	0,0008	0,0064
2	0,0015	< 0,0001	0,0066	< 0,0001	< 0,0015	0,0005	0,0080
3	0,0013	< 0,0001	0,0071	< 0,0001	< 0,0015	0,0006	0,0063
4	0,0018	< 0,0001	0,0070	0,0001	< 0,0015	0,0008	0,0063
5	0,0015	0,0001	0,0072	< 0,0001	< 0,0015	0,0008	0,0085
6	0,0014	< 0,0001	0,0073	< 0,0001	< 0,0015	0,0010	0,0066
Average	0,0012	< 0,0001	0,0070	< 0,0001	< 0,0015	0,0008	0,0070

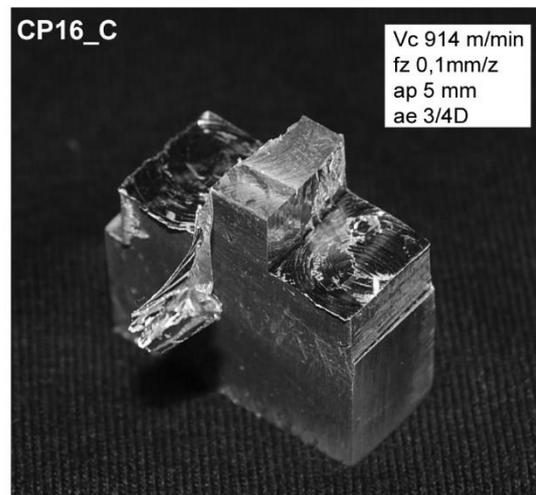
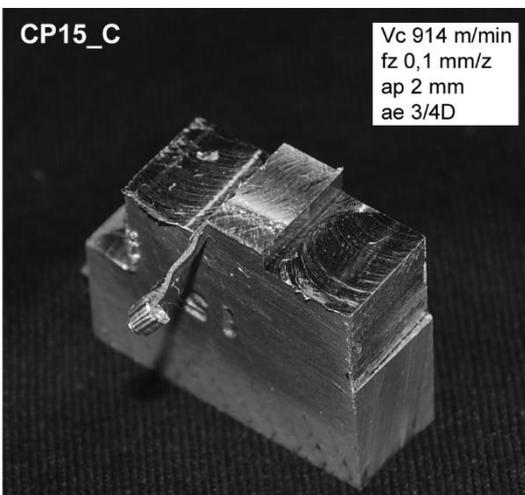
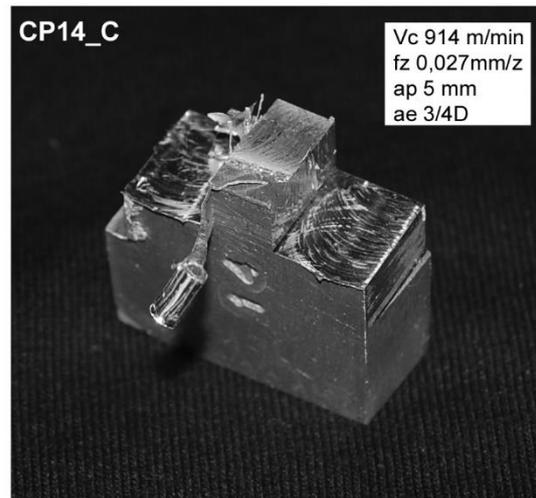
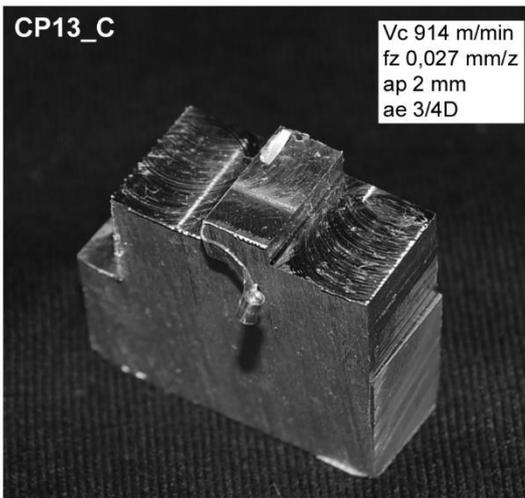
	G	Cd	Co	Ag	Hg	In	Sb
1	0,0060	< 0,0003	0,0015	0,0004	< 0,0010	< 0,0100	< 0,0050
2	0,0059	< 0,0003	0,0014	0,0004	< 0,0010	< 0,0100	< 0,0050
3	0,0060	< 0,0003	0,0017	0,0007	< 0,0010	< 0,0100	< 0,0050
4	0,0052	< 0,0003	0,0017	0,0007	< 0,0010	< 0,0100	< 0,0050
5	0,0061	< 0,0003	0,0014	0,0007	< 0,0010	< 0,0100	< 0,0050
6	0,0060	< 0,0003	0,0014	0,0007	< 0,0010	< 0,0100	< 0,0050
Average	0,0058	< 0,0003	0,0015	0,0006	< 0,0010	< 0,0100	< 0,0050

	P	Ce	La
1	0,0042	< 0,0006	0,0016
2	0,0051	< 0,0006	0,0017
3	0,0037	< 0,0006	0,0016
4	0,0034	< 0,0006	0,0016
5	0,0041	< 0,0006	0,0014
6	0,0038	< 0,0006	0,0014
Average	0,0041	< 0,0006	0,0016

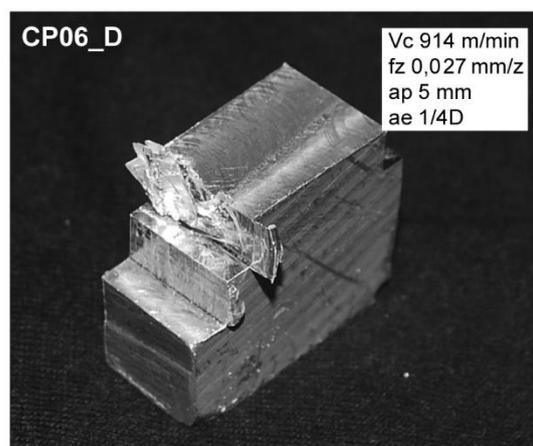
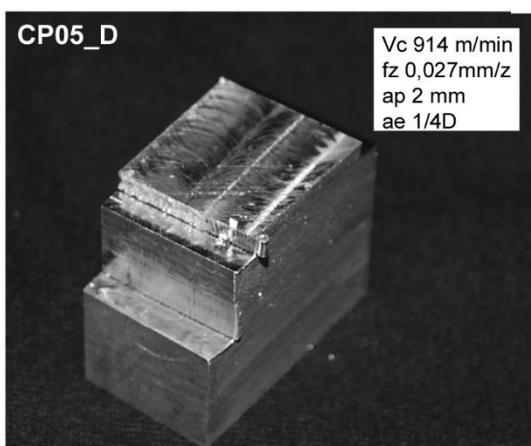
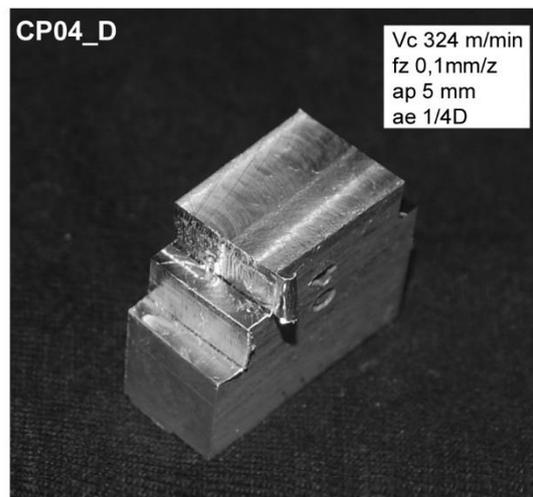
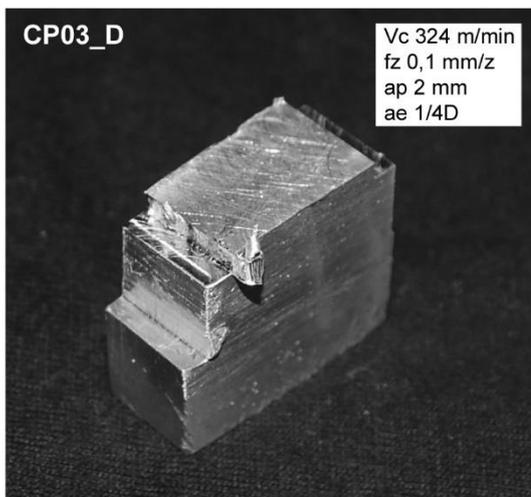
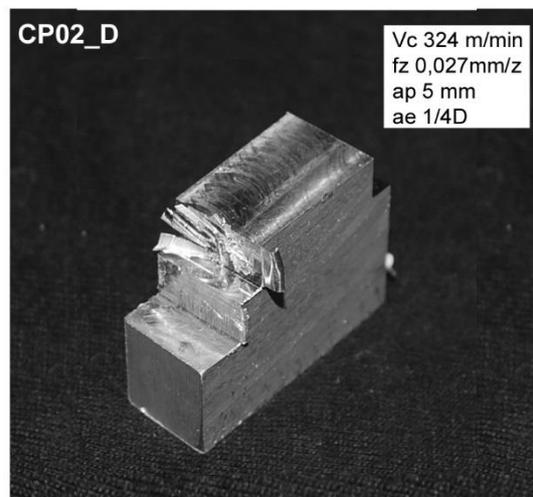
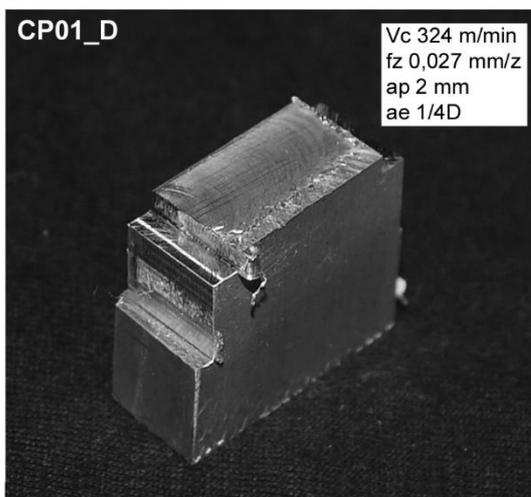
ANEXO V – IMAGENS DOS CPs USINADOS (CORTE CONCORDANTE)

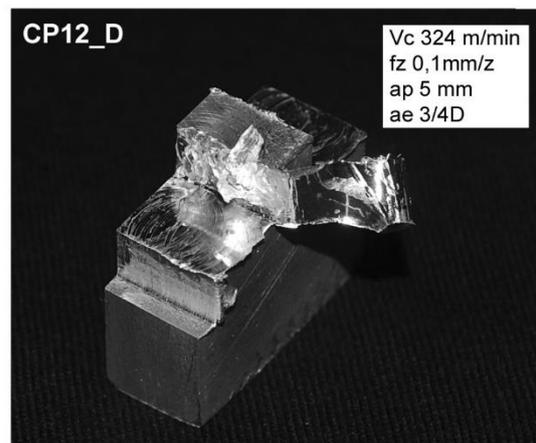
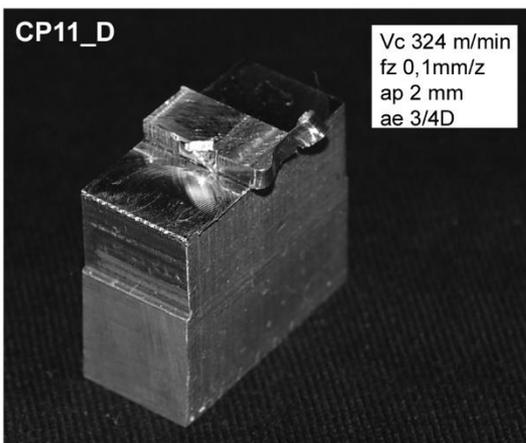
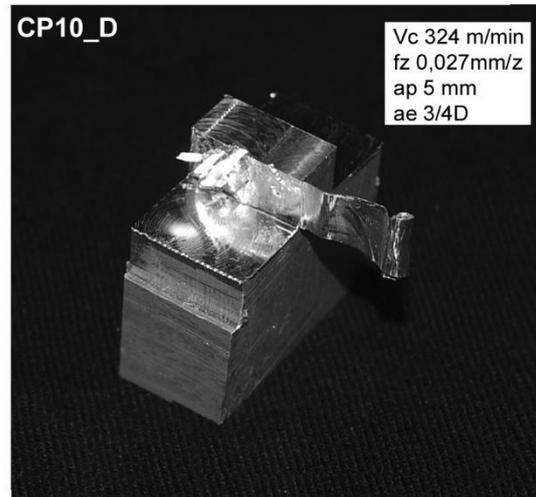
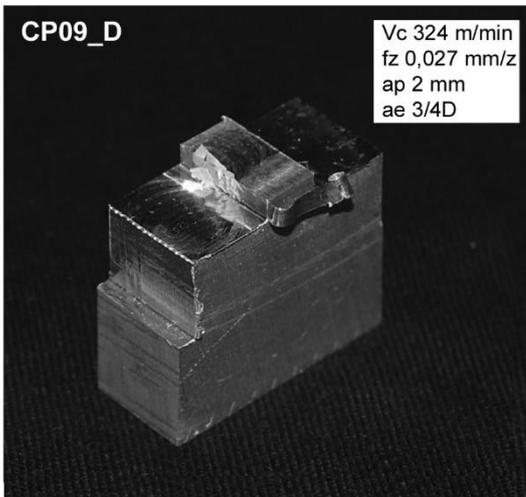
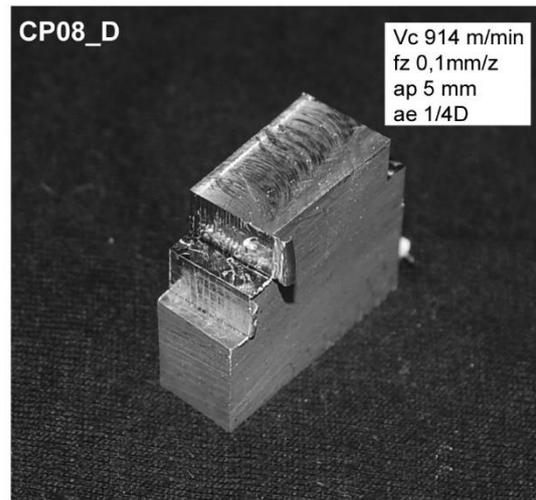
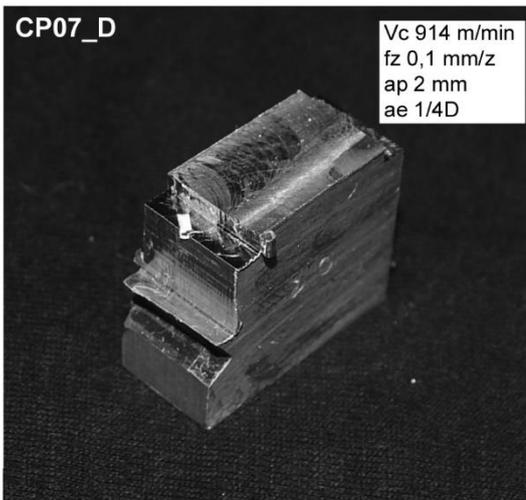


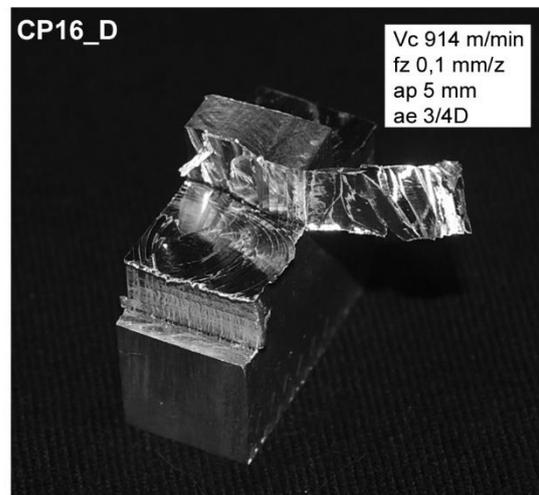
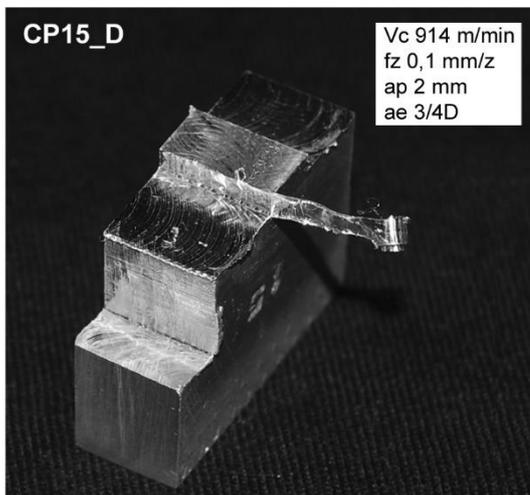
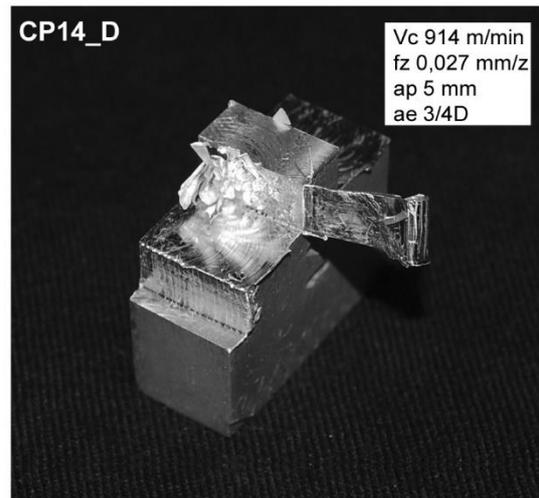
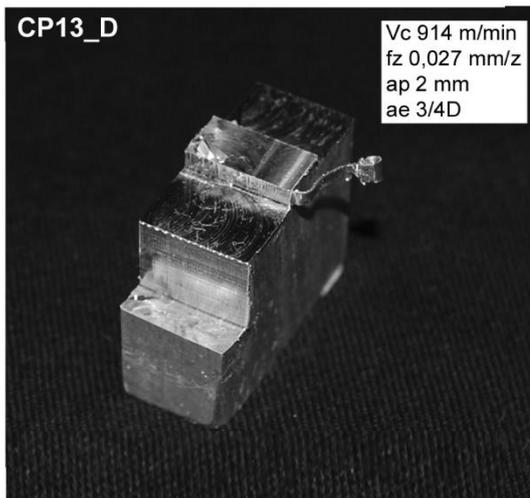




ANEXO VI – IMAGENS DOS CPs USINADOS (CORTE DISCORDANTE)







ANEXO VII – RESULTADOS GERAIS (CORTE DISCORDANTE)

	vel [m/min]	fz [mm/z]	ap [mm]	ae [mm]	HT [µm]	ET [µm]	HL [µm]	EL [µm]	FZN [N]	FZP [N]	FYN [N]	FYP [N]	FXN [N]	FXP [N]
1	V1	fz1	ap1	ae1	100,0	946,0	20,0	33,2	-24,5	25,8	-17,0	24,5	-31,5	20,4
2	V1	fz1	ap2	ae1	37,7	56,5	21,3	22,5	-33,2	30,7	-27,8	37,9	-47,4	24,7
3	V1	fz2	ap1	ae1	225,0	247,7	65,0	58,1	-35,0	37,8	-31,1	37,9	-47,7	22,5
4	V1	fz2	ap2	ae1	31,3	27,4	73,3	55,6	-69,9	70,0	-60,0	73,5	-91,6	34,0
5	V2	fz1	ap1	ae1	53,3	32,7	20,0	34,5	-14,8	15,3	-8,9	13,4	-9,4	11,9
6	V2	fz1	ap2	ae1	57,5	76,7	46,0	56,2	-23,2	19,7	-14,1	16,1	-18,0	13,4
7	V2	fz2	ap1	ae1	15,0	23,2	25,0	42,1	-57,4	31,8	-27,2	11,9	-25,6	14,9
8	V2	fz2	ap2	ae1	10,0	13,9	45,0	45,2	-31,2	20,4	-19,7	27,8	-36,8	7,4
9	V1	fz1	ap1	ae2	50,0	59,1	210,0	230,3	-50,4	56,0	-76,9	50,5	-35,6	30,4
10	V1	fz1	ap2	ae2	45,0	54,4	245,0	145,6	-91,8	92,5	-124,7	76,1	-79,9	44,4
11	V1	fz2	ap1	ae2	10,0	18,4	200,0	292,0	-80,2	83,9	-147,2	88,9	-100,7	37,0
12	V1	fz2	ap2	ae2	170,0	573,0	450,0	226,9	-202,5	217,5	-210,8	110,0	-185,1	40,6
13	V2	fz1	ap1	ae2	45,0	78,1	175,0	192,5	-32,6	43,0	-39,5	22,9	-24,6	14,1
14	V2	fz1	ap2	ae2	70,0	186,0	235,0	175,6	-29,2	28,9	-29,6	28,6	-44,7	21,5
15	V2	fz2	ap1	ae2	180,0	231,6	390,0	177,8	-18,1	15,7	-44,9	15,7	-19,5	12,2
16	V2	fz2	ap2	ae2	57,0	48,1	510,0	418,0	-24,6	16,0	-91,6	70,3	-113,2	30,6
17	V1	fz1	ap1	ae1	243,3	413,8	15,0	43,5	-21,5	26,1	-17,3	25,4	-29,6	23,6
18	V1	fz1	ap2	ae1	53,0	53,0	28,5	32,4	-33,5	35,6	-26,9	38,8	-50,1	29,0
19	V1	fz2	ap1	ae1	12,5	6,5	15,0	28,6	-32,4	32,9	-26,8	36,3	-45,0	23,9
20	V1	fz2	ap2	ae1	125,0	58,5	80,0	56,5	-76,9	63,7	-60,9	70,2	-106,3	43,0
21	V2	fz1	ap1	ae1	115,0	157,0	65,0	49,3	-16,0	13,2	-13,4	13,2	-16,8	16,5
22	V2	fz1	ap2	ae1	77,5	86,6	50,0	49,5	-14,6	14,4	-18,3	13,3	-21,8	14,2
23	V2	fz2	ap1	ae1	90,0	92,0	50,0	46,5	-19,0	27,3	-13,3	14,0	-18,2	11,3
24	V2	fz2	ap2	ae1	80,0	70,0	80,0	70,6	-20,9	12,5	-14,0	26,3	-40,4	6,3
25	V1	fz1	ap1	ae2	60,0	61,2	210,0	219,0	-49,7	48,7	-58,4	41,8	-39,8	30,6

26	V1	fz1	ap2	ae2	35,0	43,0	180,0	215,4	-91,3	90,7	-105,1	63,3	-81,1	45,5
27	V1	fz2	ap1	ae2	290,0	332,4	70,0	117,3	-115,3	116,6	-108,5	64,6	-103,2	49,7
28	V1	fz2	ap2	ae2	200,0	623,5	510,0	244,0	-224,7	256,6	-206,9	97,7	-170,7	42,6
29	V2	fz1	ap1	ae2	130,0	157,7	295,0	173,4	-21,0	37,2	-21,5	25,1	-16,6	13,9
30	V2	fz1	ap2	ae2	75,0	62,2	245,0	225,8	-86,5	82,4	-108,0	25,5	-55,2	22,5
31	V2	fz2	ap1	ae2	120,0	295,3	395,0	145,5	-16,5	16,9	-55,5	20,7	-36,5	8,0
32	V2	fz2	ap2	ae2	385,0	311,5	495,0	247,9	-57,9	18,3	-37,3	59,1	-61,5	22,2
33	V1	fz1	ap1	ae1	500,0	723,5	20,0	48,6	-26,3	26,6	-19,6	26,4	-25,7	24,2
34	V1	fz1	ap2	ae1	38,0	66,5	75,0	56,0	-51,7	61,6	-41,9	61,3	-50,0	31,1
35	V1	fz2	ap1	ae1	75,0	62,4	25,0	47,0	-37,3	35,8	-47,4	48,5	-52,2	38,4
36	V1	fz2	ap2	ae1	70,0	85,3	90,0	71,9	-74,8	64,2	-57,0	85,8	-114,0	41,6
37	V2	fz1	ap1	ae1	80,0	57,7	45,0	33,4	-20,9	15,3	-15,1	13,9	-7,8	17,6
38	V2	fz1	ap2	ae1	40,0	76,5	47,0	37,9	-24,0	29,4	-19,4	21,3	-27,1	11,4
39	V2	fz2	ap1	ae1	25,0	20,9	45,0	37,0	-18,9	29,6	-16,5	11,7	-19,0	12,5
40	V2	fz2	ap2	ae1	60,0	80,0	75,0	72,5	-23,3	11,8	-26,5	12,5	-45,6	12,1
41	V1	fz1	ap1	ae2	73,0	59,4	205,0	199,1	-34,5	31,2	-72,1	52,3	-44,3	45,8
42	V1	fz1	ap2	ae2	45,0	53,5	175,0	206,2	-97,7	92,7	-103,6	57,6	-74,4	38,1
43	V1	fz2	ap1	ae2	450,0	423,7	65,0	127,0	-100,3	97,8	-94,0	53,8	-83,6	41,4
44	V1	fz2	ap2	ae2	335,0	563,0	345,0	240,3	-192,5	231,1	-190,8	84,2	-174,0	41,4
45	V2	fz1	ap1	ae2	45,0	29,3	190,0	202,3	-22,7	24,6	-29,6	15,4	-14,0	14,4
46	V2	fz1	ap2	ae2	135,0	124,3	308,4	165,0	-43,2	68,1	-95,3	22,1	-23,9	35,7
47	V2	fz2	ap1	ae2	24,0	22,8	225,0	254,7	-13,1	29,2	-49,8	7,8	-42,6	6,6
48	V2	fz2	ap2	ae2	105,0	94,1	235,0	256,1	-35,0	25,8	-173,8	68,0	-98,8	19,2

ANEXO VIII – RESULTADOS GERAIS (CORTE CONCORDANTE)

	vel [m/min]	fz [mm/z]	ap [mm]	ae [mm]	HT [µm]	ET [µm]	HL [µm]	EL [µm]	FZN [N]	FZP [N]	FYN [N]	FYP [N]	FXN [N]	FXP [N]
1	V1	fz1	ap1	ae1	300,0	739,0	6,0	37,9	-40,3	43,9	-61,2	35,8	-16,0	27,3
2	V1	fz1	ap2	ae1	26,3	35,4	11,0	20,1	-47,6	45,1	-85,4	56,4	-17,8	34,0
3	V1	fz2	ap1	ae1	26,0	31,1	23,0	38,4	-43,9	50,9	-73,0	57,0	-9,0	29,6
4	V1	fz2	ap2	ae1	16,5	22,0	26,0	27,0	-107,4	114,4	-149,4	104,0	-27,0	58,3
5	V2	fz1	ap1	ae1	36,0	37,8	6,0	20,1	-42,2	43,2	-36,2	24,0	-15,1	18,3
6	V2	fz1	ap2	ae1	55,0	52,2	6,0	13,2	-39,7	40,0	-43,2	22,5	-15,5	21,2
7	V2	fz2	ap1	ae1	19,0	54,6	10,0	27,2	-26,2	36,3	-26,3	14,0	-6,4	18,3
8	V2	fz2	ap2	ae1	10,0	10,1	0,0	0,0	-30,2	24,2	-67,2	24,5	-22,6	44,5
9	V1	fz1	ap1	ae2	65,0	114,8	5,0	9,1	-51,6	49,4	-77,4	43,0	-29,0	19,2
10	V1	fz1	ap2	ae2	35,0	28,5	25,0	25,9	-98,0	100,5	-134,4	58,7	-48,8	30,4
11	V1	fz2	ap1	ae2	30,0	30,5	7,0	21,5	-63,2	68,7	-150,8	68,9	-68,7	59,5
12	V1	fz2	ap2	ae2	360,0	564,3	85,0	152,0	-179,1	243,9	-255,1	47,0	-74,6	56,3
13	V2	fz1	ap1	ae2	40,0	41,0	60,0	90,5	-27,6	29,2	-39,4	16,6	-20,9	16,8
14	V2	fz1	ap2	ae2	65,0	51,1	7,0	30,6	-39,7	31,6	-72,5	24,9	-25,3	17,9
15	V2	fz2	ap1	ae2	45,0	43,1	3,0	10,0	-18,5	18,1	-56,5	0,0	-19,0	11,7
16	V2	fz2	ap2	ae2	10,0	15,0	42,0	50,6	-17,0	28,5	-141,6	5,9	-42,1	41,2
17	V1	fz1	ap1	ae1	53,3	57,8	7,0	50,9	-35,4	37,0	-45,7	26,8	-14,3	25,0
18	V1	fz1	ap2	ae1	34,7	62,2	14,0	27,5	-53,7	56,7	-85,0	54,7	-17,0	31,5
19	V1	fz2	ap1	ae1	25,0	19,4	8,0	23,3	-47,7	55,7	-73,0	57,8	-9,2	29,0
20	V1	fz2	ap2	ae1	90,0	63,0	32,0	34,9	-91,3	93,4	-127,1	93,1	-26,5	55,9
21	V2	fz1	ap1	ae1	32,0	56,9	6,5	24,0	-36,4	35,1	-27,3	20,8	-14,3	16,9
22	V2	fz1	ap2	ae1	43,0	36,7	20,0	23,3	-42,8	44,3	-43,9	24,6	-14,9	21,4
23	V2	fz2	ap1	ae1	25,0	28,0	5,0	17,0	-30,1	27,6	-32,2	21,2	-13,7	19,0
24	V2	fz2	ap2	ae1	20,0	18,2	0,0	0,0	-36,1	32,2	-57,4	19,8	-16,5	35,6
25	V1	fz1	ap1	ae2	75,0	61,3	5,0	9,8	-46,1	48,6	-57,9	41,4	-31,9	29,6

26	V1	fz1	ap2	ae2	45,0	59,1	10,0	9,5	-94,8	91,0	-110,6	48,5	-53,2	30,5
27	V1	fz2	ap1	ae2	220,0	300,1	160,0	169,4	-124,6	127,6	-133,0	50,4	-56,3	47,6
28	V1	fz2	ap2	ae2	880,0	736,3	30,0	48,6	-208,0	249,1	-234,0	24,5	-89,9	58,1
29	V2	fz1	ap1	ae2	46,5	47,1	8,0	15,7	-21,3	37,9	-61,6	27,4	-17,0	18,4
30	V2	fz1	ap2	ae2	57,0	50,0	6,0	24,7	-38,6	34,4	-74,0	31,5	-36,1	27,6
31	V2	fz2	ap1	ae2	110,0	111,5	40,0	91,0	-32,2	17,2	-71,6	20,9	-22,4	11,1
32	V2	fz2	ap2	ae2	45,0	76,1	155,0	123,8	-31,2	51,9	-35,3	24,1	-22,8	104,3
33	V1	fz1	ap1	ae1	53,3	54,8	9,5	16,9	-29,6	31,1	-38,6	28,6	-14,9	21,0
34	V1	fz1	ap2	ae1	40,0	82,4	21,7	27,4	-48,9	55,2	-82,1	67,0	-17,5	28,6
35	V1	fz2	ap1	ae1	30,0	20,9	10,0	29,6	-51,2	47,2	-93,8	71,4	-18,9	33,7
36	V1	fz2	ap2	ae1	45,0	32,0	40,0	57,0	-83,2	91,8	-121,9	87,3	-28,1	61,1
37	V2	fz1	ap1	ae1	56,0	46,8	10,0	8,0	-35,3	33,9	-32,7	21,8	-17,5	18,3
38	V2	fz1	ap2	ae1	35,0	36,8	10,0	18,9	-33,4	29,1	-44,1	23,8	-18,3	24,5
39	V2	fz2	ap1	ae1	15,0	17,3	9,0	17,0	-32,0	17,7	-37,0	19,3	-15,5	21,8
40	V2	fz2	ap2	ae1	28,0	33,9	20,0	19,6	-17,9	32,4	-60,0	19,8	-19,6	34,3
41	V1	fz1	ap1	ae2	105,0	84,9	20,0	21,7	-33,1	38,3	-72,3	47,2	-39,2	32,8
42	V1	fz1	ap2	ae2	40,0	43,0	8,0	15,1	-104,0	98,4	-104,3	52,1	-48,6	30,6
43	V1	fz2	ap1	ae2	430,0	771,0	120,0	176,8	-110,5	120,6	-116,3	42,3	-48,1	47,9
44	V1	fz2	ap2	ae2	155,0	244,0	90,0	168,0	-167,0	235,0	-222,6	29,0	-70,8	69,2
45	V2	fz1	ap1	ae2	35,0	35,1	12,0	19,3	-32,7	22,1	-44,0	26,3	-17,8	16,7
46	V2	fz1	ap2	ae2	60,0	73,1	17,0	45,0	-33,3	22,9	-27,7	31,3	-38,9	14,2
47	V2	fz2	ap1	ae2	12,0	19,5	15,0	26,0	-27,9	13,9	-67,0	12,5	-17,1	21,6
48	V2	fz2	ap2	ae2	22,0	21,2	80,0	75,4	-23,8	54,7	-148,2	49,3	-17,8	71,1

ANEXO IX – CATÁLOGO DA FERRAMENTA DE CORTE

Ref.: 1P220-1000-XA 1630 CoroMill® Plura solid carbide square shoulder end mill	
cutting diameter DC	10mm
cutting diameter face contact DCF	9.6mm
corner chamfer KCH	45deg
corner chamfer width CHW	0.2mm
depth of cut maximum APMX	11.5mm
maximum ramping angle RMPX	9deg
center cutting capability CCC	1
tool style code TSYC	1P220-XA
usable length LU	11mm
peripheral effective cutting edge count ZEFP	2
adaptive interface machine direction ADINTMS	Cylindrical shank (DIN1835-A / DIN6535-HA) -metric: 10
connection diameter tolerance TCDCON	h6
grade GRADE	1630
coating COATING	PVD
basic standard group BSG	DIN 6527 K
coolant entry style code CNSC	0: without coolant
connection diameter DCON	10 mm
functional length LF	66 mm
hand HAND	R
flute helix angle FHA	30 deg
rotational speed maximum RPMX	80000 r/min
weight of item WT	0.074 kg
feed direction code FEEDDIRCODE	SFW (EFW)
max engagement AEAPX	1 NULL
working engagement ratio maximum AERMX	1
body material code BMC	Carbide
core diameter at face CDF	5.6 mm
cutting length type CLT	2
cutting pitch differential CPDF	0
coolant exit style code CXSC	0: no coolant exit
connection size code CZC	10
flute helix hand FHH	R
radial rake angle GAMF	9 deg
axial rake angle GAMP	5.5 deg
interrupted edge property IEP	0
item type ITEMYPE	Solid Cutting Tool
maximum regrinds NORGMX	2
overall length OAL	66 mm
maximum overhang OHX	26 mm
release pack id RELEASEPACK	12.2
tolerance class cutting diameter TCDC	e8
usable length diameter ratio ULDR	1.1