

LUIZ CARLOS DA SILVA

COMPORTAMENTO DA REBARBA NO FRESAMENTO
DE FACEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL PH 13 8Mo



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2011

LUIZ CARLOS DA SILVA

**COMPORTAMENTO DA REBARBA NO FRESAMENTO DE
FACEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL PH 13 8Mo**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Álisson Rocha Machado

Uberlândia

2011

Si381

Silva, Luiz Carlos da.

Comportamento da rebarba no fresamento de faceamento do aço inoxidável PH 138Mo / Luiz Carlos da Silva. – Uberlândia : Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

178 p. : il.

Orientador: Prof^o. Dr. Álisson Rocha Machado.

Inclui anexos.

Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

1. Aço inoxidável – comportamento. 2. Aço inoxidável – rebarba – fresamento. 3. Materiais – processos de fabricação – aço inoxidável. I. Machado, Álisson Rocha (orientador). II. Universidade Federal de Uberlândia.

CDD 22^a ed.669.1

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Arnaldo Alves Ferreira Júnior CRB-1/2.092
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

*Ao meu filho Gregório,
minha esposa Ilda,
aos meus pais, Alcides e Luzia
e a Deus*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Álisson Rocha Machado pela orientação, apoio e incentivo durante a realização deste trabalho.

Ao professor Márcio Bacci pelo apoio e incentivo.

Ao Instituto Federal de Goiás, pela oportunidade.

À Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade.

As irmãs Rosa e Ângela pelo incentivo.

Ao professor Paulo Rosa pelo auxílio na realização dos ensaios.

Aos colegas do Núcleo de Pesquisa e Fabricação (NUPEF) e do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU).

Aos colegas do DINTER

A CAPES como gestora do DINTER.

A Villares Metals S.A. pelo fornecimento do material

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Da Silva, L. C., **Comportamento da Rebarba no Fresamento de Faceamento do Aço Inoxidável PH 13 8Mo**. 2011. 154 folhas. Tese de Doutorado, Universidade federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

Resumo

Esta tese tem o objetivo de investigar a formação das rebarbas no fresamento de faceamento do aço inoxidável PH 13 8Mo. Foram utilizados insertos de metal duro intercambiáveis numa fresa de diâmetro de 63 mm. Os ensaios foram divididos em duas etapas. Na primeira etapa foram consideradas as seguintes variáveis: aplicação do fluido de corte, geometria da ferramenta, carregamento da fresa (penetração de trabalho), profundidade de corte e fresamento com as rebarbas remanescentes do corte anterior. Nesta etapa a profundidade de corte foi considerada apenas para estudar a transição da rebarba primária-secundária. Na segunda etapa dos ensaios foram aplicadas as condições de condições de corte de menor altura da rebarba, na primeira etapa. Foi utilizado um planejamento composto central onde foram variados a velocidade de corte, o avanço, a profundidade de corte, o desgaste de flanco e o ângulo de saída da peça. A medição da rebarba foi realizada em seis pontos diferentes da borda. Como sistema de medição, foi utilizado o silicone de condensação para formar a réplica da rebarba e posterior medição da sua altura no microscópio. Verificou-se que a aplicação do fluido de corte não influenciou na dimensão da rebarba, mas o mesmo não aconteceu com a rebarba remanescente, que afetou significativamente a altura da rebarba. A rebarba também foi menor quando utilizou-se o nível superior do avanço e os níveis inferiores da profundidade de corte, do ângulo de saída da peça e do desgaste da ferramenta. A velocidade de corte foi a variável que menos interferiu no tamanho da rebarba. A rebarba secundária foi observada em um número insignificante de ensaios, tornando este acontecimento sem importância. A metodologia utilizada permitiu a modelagem da altura das rebarbas em função das principais variáveis e a otimização das condições que levam às dimensões mínimas das rebarbas.

Palavra Chave: *Rebarba, Fresamento, Aço Inoxidável PH 13 8Mo, PCC – Planejamento Composto Central*

Da Silva, L. C., **Behavior of the Burr in Face Milling of PH 13 8Mo Stainless Steel**. 2011. 154 pages. Doctoral Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

Abstract

This thesis aims to investigate the formation of burrs in face milling of PH 13 8Mo stainless steel. Cemented carbide inserts were used in a 63 mm of diameter milling cutter. The tests were divided into two stages. In the first stage the following variables were studied: application of cutting fluid, tool geometry, loading of the cutter (cutting width), depth of cut and milling with the remaining burrs from previous cut. The depth of cut was considered for studying the transition from primary to secondary burr. In the second stage of testing the best results encountered in the first part were applied, considering the conditions that gave the lowest burr height. A central composite design was used varying the cutting speed, the feed rate, the depth of cut, the flank wear and the exit angle of the cutter from the workpiece. The burrs were measured at six different points of the workpiece border using a system of reproduction of the burr with the help of a silicon mass that after frozen reveals the “negative” forms of the burrs with measurements in a stereomicroscopy. It was found that the application of a cutting fluid has not affected the dimensions of the burrs, but the same did not happen with the remaining burr from previous cut. Burr was also smaller when the higher level of the feed rate and the lower levels of the depth of cut, the exit angle and the tool wear were used. Variation of cutting speed was not statistically significant for determining the burr size. The secondary burr was observed in a few numbers of tests, making this event unimportant here. The methodology applied allowed the development of a model as a function of the main input variables and optimization targeting minimum burr sizes.

Keywords: Burr, Milling, Stainless Steel PH13 8Mo, Central Composite design (CCD),

LISTA DE FIGURAS

| Figuras | Páginas |
|---|---------|
| Figura 2.1 - Qualidade da borda das peças usinadas conforme a norma ISO 13715 . (A) - Estados da borda externa, (B) - Exemplos de rebarbas e (C) - Recomendação para o tamanho das bordas..... | 6 |
| Figura 2.2 - Dimensões da rebarba [adaptado de Kishimoto et al., (1981)]..... | 7 |
| Figura 2.3 - Modelo geométrico da rebarba e seus parâmetros [adaptado de Schäfer, (1978)]..... | 8 |
| Figura 2.4 - Princípio do método de interferometria a laser (KO; KIM, 2004)..... | 9 |
| Figura 2.5 - Medição da altura da rebarba, (b) Medição da espessura da rebarba (SHEFELBINE, 2004)..... | 9 |
| Figura 2.6 - Esquema da caracterização geométrica e medição da rebarba utilizado por Jinsoo (1999)..... | 10 |
| Figura 2.7 - Obtenção da imagem da rebarba a ser medida, a - borda com a rebarba, molde e a massa na forma pastosa, b - Molde com a massa fundida, c - massa preparada para o corte e d - modelo pronto para ser levado ao microscópio. (SILVA et al., 2006)..... | 11 |
| Figura 2.8 - Ilustração do início de formação da rebarba e o deslocamento da ferramenta de corte da posição A para a posição A' (adaptado de Ko e Dornfeld, 1996)..... | 12 |
| Figura 2.9 - Etapas A e B de formação das rebarbas sugeridas por Hashimura <i>et al</i> , [adaptado de Hashimura <i>et al.</i> , (1999b)]. (a) etapa do Corte Contínuo, (b) etapa do Pré Início da rebarba..... | 14 |
| Figura 2.10 - Etapas C e D de formação das rebarbas sugeridas por Hashimura <i>et al</i> , [adaptado de Hashimura <i>et al</i> (1999B)]. (a) - etapa de Início da Rebarba, (b) - etapa do Pivotamento..... | 15 |
| Figura 2.11 - Etapa E de formação das rebarbas sugeridas por Hashimura <i>et al</i> , [adaptado de Hashimura <i>et al</i> (1999B)] Desenvolvimento da zona de cisalhamento negativo..... | 16 |
| Figura 2.12 - Formação das rebarbas para materiais dúcteis, sugeridas por Hashimura <i>et al</i> , [adaptado de Hashimura <i>et al.</i> , (1999b)]..... | 16 |
| Figura 2.13 - Formação das rebarbas para materiais frágeis, sugeridas por Hashimura <i>et al</i> , [adaptado de Hashimura <i>et al.</i> , (1999b)]..... | 17 |
| Figura 2.14 - Formação da rebarba do tipo Poisson. (a) - Compressão da ferramenta sobre o material, (b) - avanço do cilindro (ferramenta de corte), [adaptado de Gillespie e Blotter (1976)]..... | 19 |
| Figura 2.15 - Rebarba do tipo <i>Rollover</i> . (a) - Mecanismo de formação da rebarba, (b) - Rebarba do tipo <i>Rollover</i> formada, (GILLESPIE; BLOTTER, 1976)..... | 20 |
| Figura 2.16 - Rebarba do tipo <i>Tear</i> , (GILLESPIE; BLOTTER, 1976)..... | 20 |
| Figura 2.17 - Formação da rebarba do tipo <i>Cut-off</i> , (GILLESPIE; BLOTTER, 1976)..... | 21 |
| Figura 2.18 - Tipos de rebarbas formadas no fresamento. a) - fresamento de faceamento, b) - fresamento tangencial discordante e c) - fresamento de topo (GILLESPIE 1975 e 1976)..... | 22 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 2.19 | - Tipos de rebarba formada em função do processo de usinagem, conforme Nakayama e Arai (1987)..... | 28 |
| Figura 2.20 | - Identificação das arestas principal e secundária no fresamento de faceamento..... | 29 |
| Figura 2.21 | - Transição da rebarba primária para rebarba secundária..... | 30 |
| Figura 2.22 | - Local de formação da rebarba na peça. a) Ordem de saída BCA, b) Ordem de saída ABC..... | 31 |
| Figura 2.23 | - Localização das rebarbas e superfícies utilizadas na classificação, (HASHIMURA <i>et al.</i> , 1999a)..... | 32 |
| Figura 2.24 | - Etapas de formação das rebarbas na furação (a) rebarba uniforme, (b) rebarba Transiente e (c) coroa (KIM <i>et al.</i> , 2000)..... | 33 |
| Figura 2.25 | - Tipos de rebarbas no processo de furação. a) Tipo I - Uniforme com Calota, b) Tipo I - uniforme sem Calota, c) Tipo II - transiente, d) Tipo III - Coroa (KIM <i>et al.</i> , 2000)..... | 34 |
| Figura 2.26 | Morfologia das rebarbas primárias. a) – Rebarba do tipo faca, b) – Rebarba do tipo caracol e c) – rebarba do tipo onda. [Adaptado de Chern (1993)]..... | 35 |
| Figura 2.27 | Morfologia e altura da rebarba em função do ângulo de saída da peça (CHERN, 2006b)..... | 35 |
| Figura 2.28 | Tipos de morfologia das rebarbas. a) – Rebarba do tipo caracol, b) – Rebarba do tipo onda e c) – Rebarba do tipo faca (LIN, 1999)..... | 36 |
| Figura 2.29 | - Efeito da dureza do material auxiliar na altura da rebarba (GILLESPIE, 1999)..... | 37 |
| Figura 2.30 | - Arranjo para a redução da rebarba através da diferença da dureza (GILLESPIE, 1999)..... | 37 |
| Figura 2.31 | - Deformação do material. a) - Para materiais encruados b) - Para materiais recozidos (GILLESPIE E BLOTTER, 1976)..... | 38 |
| Figura 2.32 | - Formação da rebarba em materiais dúteis. a) - Identificação dos elementos formadores da rebarba b) - Destacamento do cavaco e formação da rebarba..... | 39 |
| Figura 2.33 | - Ângulo de inclinação da superfície de saída da peça (φ_s). a) - Identificação do ângulo (φ_s), b) - Efeito do ângulo de inclinação da superfície de saída da peça no tamanho da rebarba (SCHÄFER, 1975 citado por GILLESPIE, 1999)..... | 41 |
| Figura 2.34 | - Influência do φ_s na formação da rebarba negativa para os seguintes materiais: (a) - cobre, (b) - alumínio 6061-T6 e (c) - alumínio 2024 -T4 (CHERN; DORNFELD, 1996)..... | 41 |
| Figura 2.35 | - Formação do <i>breakout</i> no ferro fundido cinzento..... | 42 |
| Figura 2.36 | - Representação geométrica do ângulo de saída da fresa..... | 43 |
| Figura 2.37 | - Variação da altura da rebarba (h) em função do ângulo de saída/entrada da peça, Aço AISI 1040, para as rebarbas 1 e 9 (OLVERA; BARROW, 1996)..... | 44 |
| Figura 2.38 | - Relação entre a profundidade de corte e a altura da rebarba, variando o ângulo de saída/entrada da peça, aço AISI 1045 (KISHIMOTO <i>et al.</i> , 1981)..... | 45 |
| Figura 2.39 | - Variação da altura (h) da rebarba 9 em função da profundidade de corte para o ângulo Ψ de 113,5 durante a usinagem do aço AISI 1040 (OLVERA E BARROW, 1996)..... | 46 |
| Figura 2.40 | - Pontos A, B e C nas arestas da ferramenta de corte, (HASHIMURA <i>et al.</i> , 1999a)..... | 47 |

| | | | |
|-------------|---|---|----|
| Figura 2.41 | - | Varição da altura da rebarba (h) em função do aumento da Velocidade de corte, para a rebarba 1 e rebarba 9 (OLVERA; BARROW, 1996)..... | 50 |
| Figura 2.42 | - | Efeito da velocidade de corte na espessura da rebarba formada no ferro fundido nodular, sendo a profundidade de corte de 0,5 mm (SHEFELBINE, 2004)..... | 50 |
| Figura 2.43 | - | Varição da altura da rebarba lateral em função do avanço para duas ferramentas de corte (OLVERA; BARROW, 1996)..... | 51 |
| Figura 2.44 | - | Espessura da rebarba em função da penetração de trabalho, da aplicação do fluido de corte e da vida da ferramenta. Sendo: fz = 0,15 mm/z, Vc = 1885 m/min (9525 rpm e ϕ fresa=63 mm) (SHEFELBINE; DORNFELD, 2004)..... | 53 |
| Figura 2.45 | - | Relação entre a altura da rebarba e os principais parâmetros de usinagem a seco e com fluido de corte. (a) - Velocidade de corte, (b) - avanço e (c) - profundidade (MENDES; SILVA, 2003)..... | 54 |
| Figura 2.46 | - | Tratamento térmico de solubilização e de envelhecimento dos aços inoxidáveis PH. (a) – Aquecimento da liga na solubilização, (b) – Resfriamento da liga na solubilização, (c) – Tratamento de envelhecimento da liga (Krabbe; Diniz, 2005)..... | 61 |
| Figura 2.47 | - | Tratamento de solubilização e de envelhecimento dos aços inoxidáveis PH..... | 61 |
| Figura 2.48 | - | Processo do sistema representado pelo planejamento de experimento..... | 64 |
| Figura 2.49 | - | Representação esquemática do PCC com os pontos do PFC, pontos centrais e pontos axiais..... | 71 |
| Figura 2.50 | - | Representação de uma superfície resposta..... | 74 |
| Figura 2.51 | - | Superfície resposta de um processo..... | 74 |
| Figura 3.1 | - | Fluxograma da metodologia adotada na realização dos ensaios..... | 77 |
| Figura 3.2 | - | Três tipos de carregamento da fresa a ser investigado..... | 78 |
| Figura 3.3 | - | Diagrama de bloco com a identificação das variáveis de entrada e de saída aplicadas no planejamento de experimentos – DOE..... | 80 |
| Figura 3.4 | - | Construção geométrica com o posicionamento da fresa de faceamento em relação ao corpo de prova, gerado pelo auto CAD. a)-CP 1 e b)-CP 2..... | 83 |
| Figura 3.5 | - | Construção geométrica para a obtenção do ângulo $\Psi(-\alpha)$. a) - penetração de trabalho para o ângulo de saída da peça de 47°, b) - ângulo de saída da peça para uma penetração de trabalho de 13 mm..... | 84 |
| Figura 3.6 | - | Processo de fresamento de faceamento e a borda de formação da rebarba..... | 86 |
| Figura 3.7 | - | Moldagem da borda com a sua rebarba. (a) - Moldagem da rebarba para os ensaios da primeira etapa, (b) - Moldagem da rebarba para os ensaios da segunda etapa..... | 86 |
| Figura 3.8 | - | Representação esquemática do sistema de medição adotado..... | 88 |
| Figura 3.9 | - | Pontos de medição da rebarba na borda..... | 89 |
| Figura 3.10 | - | Forma de cotação da altura rebarba revelada pelo sistema de aquisição de imagem adotado..... | 89 |
| Figura 3.11 | - | Microestrutura do aço inoxidável PH 13 8Mo, (ampliação x 1000 vezes, Reagente: Água Régia)..... | 90 |
| Figura 3.12 | - | Geometria do CP 1. Foram utilizados entre os ensaios 1 e 32 da segunda etapa, conforme Tab. 3.3. a) - Processo de fresamento com o sentido de avanço e rotação da fresa, b) - local da rebarba formada, c) - | |

| | | |
|-------------|--|-----|
| | Dimensões do CP 1 com as vistas..... | 91 |
| Figura 3.13 | - Geometria do CP 2. Foram utilizados entre os ensaios 33 e 45 da segunda etapa, conforme Tab. 3.3. a) - Processo de fresamento com o sentido de avanço e rotação da fresa, b) - local da rebarba formada, c) - Dimensões do CP 2 com as vistas..... | 92 |
| Figura 3.14 | - Local e seção de retirada dos corpos de prova da barra..... | 93 |
| Figura 3.15 | - Fresadora CNC utilizada nos ensaios..... | 93 |
| Figura 3.16 | - Microscópio ótico utilizado no sistema de medição..... | 93 |
| Figura 3.17 | - Ferramentas de corte utilizadas na abertura do sulco no CP1. (a) - Fresa de topo, (b) - inserto de metal duro..... | 94 |
| Figura 3.18 | - Fresa de topo utilizada na abertura do sulco no CP 2..... | 94 |
| Figura 3.19 | - Ferramenta I. (a) - Fresa de Faceamento R245-063Q22, (b) - Inserto de metal duro R245-12T3E-ML1030, (c) - Inserto de metal duro R245-12T3E-PM 4040..... | 94 |
| Figura 3.20 | - Ferramenta II. a) - Fresa de faceamento 490-063Q22, b) - Inserto de metal duro 490R-08T308M-MM 2030..... | 94 |
| Figura 3.21 | - Ferramenta III. a) - fresa de faceamento R210-063Q27-14M, b) - inserto de metal duro R210-14 05 12M-PM 1030..... | 95 |
| Figura 3.22 | - Medição do desgaste das ferramentas de corte utilizadas nos ensaios da segunda etapa..... | 97 |
| Figura 4.1 | - Tela do catálogo eletrônico de simulação de usinagem, Sandvik..... | 98 |
| Figura 4.2 | - Esquema ilustrando as marcas de avanço formadas após a recuperação elástica do material..... | 99 |
| Figura 4.3 | - Marcas de avanço deixadas na peça devido à recuperação elástica do material..... | 99 |
| Figura 4.4 | - Rebarba do tipo <i>Knife</i> , formada na borda de entrada da peça e observadas em todas as peças após os ensaios..... | 100 |
| Figura 4.5 | - Desgaste ocorrido nos insertos R245-12T3E- PM 4040. a) - Vista da superfície de folga, b) - Vista da superfície de saída cavaco..... | 101 |
| Figura 4.6 | - Desgaste observado durante o intervalo de cada passada. a) - 1º passada, $VC_N = 0,07$ mm; b) - 2º passada, $VC_N = 0,15$ mm; c) - 3º passada, $VC_N = 0,17$ mm; d) - 4º passada, $VC_N = 0,29$ mm; e) - 5º passada, $VC_N = 0,51$ mm; f) - 6º passada, $VC_N = 0,62$ mm e g) - 7º passada, $VC_N = 0,67$ mm..... | 103 |
| Figura 4.7 | - Forma do cavaco obtido durante o fresamento do aço inoxidável a) - Detalhe do cavaco, b) – Pontos de brassagem..... | 104 |
| Figura 4.8 | - Intervalo de confiança para média da altura das rebarbas em relação à atmosfera de usinagem com os métodos de aplicação de fluido de corte. Sendo: $V_c = 80$ m/min; $a_p = 0,8$ mm; $f_z = 0,112$ mm/dente e $\Psi = 144^\circ$ e a dimensão do material de $106 \times 106 \times 57$ mm ³ | 105 |
| Figura 4.9 | - Altura da rebarba para as fresas R245 e 490. a) - Dispersão da altura da rebarba para as duas fresas. b) - Intervalo de confiança para a média da altura da rebarba para as fresas R245 e 490. Sendo: $V_c = 80$ m/min; $a_p = 0,8$ mm; $f_z = 0,112$ mm/dente e $\Psi = 144^\circ$ e as dimensões do material de $106 \times 106 \times 57$ mm ³ | 108 |
| Figura 4.10 | Geometria da ferramenta de corte R 245-12T3E com a fase paralela | 109 |
| Figura 4.11 | - Ângulo de entrada positivo gerado pelo choque fresa-peça (Modern Metal Cutting, 1994)..... | 110 |
| Figura 4.12 | - Intervalo de confiança para a altura média da rebarba nos três carregamentos..... | 111 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figura 4.13 | - Profundidade de corte para a transição de rebarba primária para secundária..... | 113 |
| Figura 4.14 | - Formação da rebarba, conforme a profundidade de corte. (a) - rebarba primária, (b) - rebarba secundária..... | 114 |
| Figura 4.15 | - Destacamento do cavaco formador da rebarba de transição. (a) - Formação da fita gerada pelo corte da rebarba na borda de transição (b) - Fita aderida a peça devido ao final do corte..... | 115 |
| Figura 4.16 | - Altura média da rebarba em relação ao número de passadas para retirada da rebarba remanescente e com a rebarba remanescente..... | 116 |
| Figura 4.17 | - Exemplos de rebarbas, com a cota da sua altura, formadas na segunda etapa dos ensaios. a) - Provável rebarba secundária, b) - Rebarba primária..... | 118 |
| Figura 4.18 | - Tipos de rebarba primária formada nos ensaios. a) - Rebarba do tipo caracol, b) - Rebarba do tipo onda, c) - Rebarba do tipo faca..... | 119 |
| Figura 4.19 | - Nível da altura das rebarbas para os ensaios, a) - primeiros ensaios b) - 1º Réplica c) - 2º Réplica e d) - 3º Réplica..... | 121 |
| Figura 4.20 | - Comportamento da altura da rebarba para os dois níveis da velocidade de corte. Sendo: $f_z = 0,08$ mm/dente, $a_p = 0,7$ mm, $V_{BB} = 0,2$ mm e $\Psi = 94,5^\circ$ | 125 |
| Figura 4.21 | - Comportamento da altura da rebarba para os dois níveis do avanço por dente. Sendo: $V_c = 105$ m/min, $a_p = 0,7$ mm, $V_{BB} = 0,2$ mm e $\Psi = 94,5^\circ$... | 127 |
| Figura 4.22 | - Comportamento da altura da rebarba para os dois níveis da profundidade de corte. Sendo: $V_c = 105$ m/min, $f_z = 0,08$ mm/dente, $V_{BB} = 0,2$ mm e $\Psi = 94,5^\circ$ | 128 |
| Figura 4.23 | - Comportamento da altura da rebarba para os dois níveis do ângulo de saída da peça. Sendo: $V_c = 105$ m/min, $f_z = 0,08$ mm/dente, $V_{BB} = 0,2$ mm e $a_p = 0,7$ mm..... | 129 |
| Figura 4.24 | - Comportamento da altura da rebarba para os dois níveis do desgaste da ferramenta. Sendo: $V_c = 105$ m/min, $f_z = 0,08$ mm/dente, $\Psi = 94,5^\circ$ e $a_p = 0,7$ mm..... | 130 |
| Figura 4.25 | - Efeito das interações de segunda ordem. a) - interação $V_{BB}\Psi$, b) - interação $V_{BB}a_p$, c) - interação $V_{BB}V_c$, d) - interação Ψa_p | 131 |
| Figura 4.26 | - Resíduo entre os valores medidos e estimados. a) - Distribuição normal do resíduo, b) - Valor do resíduo para os 180 ensaios..... | 137 |
| Figura 4.27 | - Superfície resposta da interação entre $V_{BB}\Psi$, a) - Superfície resposta da interação entre $V_{BB}\Psi$ considerando o nível máximo e mínimo, b) - Superfície resposta da interação entre $V_{BB}\Psi$ para níveis onde forma a menor rebarba..... | 139 |
| Figura 4.28 | - Superfície resposta da interação $V_{BB}a_p$, a) - Superfície resposta da interação $V_{BB}a_p$ considerando o nível máximo e mínimo, b) - Superfície resposta da interação $V_{BB}\Psi$ para níveis onde forma a menor rebarba, c) - Superfície resposta da interação $V_{BB}\Psi$ para profundidades de corte próximas do nível superior..... | 140 |
| Figura 4.29 | - Superfície resposta da interação entre $V_{BB}V_c$, a) - Superfície resposta da interação entre $V_{BB}V_c$ considerando o nível máximo e mínimo..... | 141 |
| Figura 4.30 | - Superfície resposta da interação $a_p\Psi$. a) - Superfície resposta da interação $a_p\Psi$ considerando o nível máximo e mínimo, b) - Superfície resposta da interação $a_p\Psi$ para profundidades de corte próximas do nível mínimo, c) - Superfície resposta da interação $a_p\Psi$ para | |

| | | |
|-------------|---|-----|
| | profundidades de corte próximas do nível máximo..... | 142 |
| Figura 4.31 | - Superfície resposta da interação entre $fz\Psi$ | 143 |
| Figura 4.32 | - Gráfico da função Desejabilidade Global para o experimento proposto..... | 145 |
| Figura 4.33 | - Altura da rebarba formada nos doze ensaios da otimização e a altura da rebarba estimada pelo modelo matemático..... | 147 |

LISTA DE TABELA

| Tabelas | Páginas |
|--|---------|
| Tabela 2.1 - Etapas de formação das rebarbas sugeridas por Hashimura <i>et al</i> (1999B) | 13 |
| Tabela 2.2 - Mecanismos e tipos de rebarbas, segundo Gillespie e Blotter (1976)..... | 18 |
| Tabela 2.3 - Classificação e o tipo de rebarba, com seu respectivo mecanismo de formação..... | 23 |
| Tabela 2.4 - Classificação das rebarbas e suas representações, conforme Nakayama e Arai (1987)..... | 28 |
| Tabela 2.5 - Classificação das rebarbas formadas no processo de fresamento, conforme Hashimura <i>et al</i> (1999a)..... | 31 |
| Tabela 2.6 - Classificação das rebarbas no processo de furação (KIM <i>et al.</i> , 2000)..... | 33 |
| Tabela 2.7 - Classes, características, subclasses e aplicações dos aços inoxidáveis.... | 59 |
| Tabela 2.8 - Propriedades mecânicas do aço inoxidável PH 13 8Mo conforme a condição de tratamento de envelhecimento (HIGH TEMP METALS INC).. | 63 |
| Tabela 2.9 - Planejamento fatorial completo com matriz de contraste e matriz resposta..... | 67 |
| Tabela 3.1 - Matriz de contraste proposta..... | 82 |
| Tabela 3.2 - Variáveis de entrada com seus respectivos níveis..... | 83 |
| Tabela 3.3 - Número dos ensaios com os respectivos valores das variáveis de entrada..... | 85 |
| Tabela 3.4 - Composição do aço Inoxidável ABNT PH 13 8Mo (S13800) (Conforme catálogo de aços inoxidáveis da Villares Metals, 2008)..... | 90 |
| Tabela 3.5 - Propriedades mecânicas do aço Inoxidável ABNT (N4534) PH 13-8 Mo (HIGH TEMP METALS INC, 2010)..... | 90 |
| Tabela 3.6 - Tabela com intervalo de desgaste de flanco médio - VB _B das ferramentas de corte..... | 96 |
| Tabela 4.1 - Média da altura da rebarba, em mm, para as quatro condições (três métodos de aplicação de fluido de corte e a seco)..... | 105 |
| Tabela 4.2 - Tabela de ANOVA para o teste de hipótese sobre os métodos de aplicação do fluido de corte..... | 106 |
| Tabela 4.3 - Média da altura da rebarba, em mm, para as Ferramentas I (R245) e II (490)..... | 108 |
| Tabela 4.4 - Média da altura da rebarba (mm) para os três carregamentos da fresa.... | 110 |
| Tabela 4.5 - Altura da rebarba (mm) em relação à profundidade de corte para uma penetração de trabalho de 57 e 40 mm..... | 112 |
| Tabela 4.6 - Altura da rebarba (mm) posterior, sem a retirada da rebarba remanescente e com a com a retirada da rebarba remanescente..... | 116 |
| Tabela 4.7 - Níveis normalizados das variáveis a serem utilizadas..... | 120 |
| Tabela 4.8 - Média da altura da rebarba, em mm, e o desvio padrão, em mm, para os primeiros ensaios e as réplicas 1, 2 e 3..... | 122 |
| Tabela 4.9 - Níveis codificados das cinco variáveis e as suas interações..... | 123 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Tabela 4.10 | - Efeitos das variáveis e suas interações..... | 124 |
| Tabela 4.11 | - Coeficiente para o modelo matemático devido a regressão..... | 133 |
| Tabela 4.12 | - Análise de variância para o ajuste do modelo..... | 134 |
| Tabela 4.13 | - Altura da rebarba com valores medidos, estimados e os resíduos..... | 135 |
| Tabela 4.14 | - Teste de homocedasticidade para verificação da variância dos resíduos | 137 |
| Tabela 4.15 | - Intervalo das variáveis de entrada onde serão formadas menores rebarbas..... | 143 |
| Tabela 4.16 | - Valores dos parâmetros aplicados na otimização pelo método da Função Desejabilidade Global..... | 144 |
| Tabela 4.17 | - Número dos ensaios com os respectivos níveis das variáveis..... | 145 |
| Tabela 4.18 | - Altura da rebarba estimada e medida com intervalos de confiança..... | 146 |

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Letras Romanas

| | |
|---------------|--|
| a_e | Penetração de trabalho |
| a_p | Profundidade de corte |
| a_{pt} | Profundidade de corte de transição |
| f | Avanço de corte |
| f_z | Avanço por dente |
| gl | Grau de liberdade |
| h | Altura da rebarba |
| $h_{médio}$ | Altura média da rebarba |
| \hat{h} | Altura estimada da rebarba |
| k | Número de fatores do planejamento experimental |
| N | Quantidade de ensaios a ser realizados |
| n_2 | Número de ensaios realizados no ponto central |
| n_n | Número de repetições dos ensaios |
| r | Raio da ferramenta de corte |
| r_η | Raio de arredondamento da ponta da ferramenta de corte |
| S_{efeito} | Erro padrão dos efeitos |
| s^2 | Variância |
| t | Espessura da rebarba |
| tb | Espessura de raiz da rebarba |
| t_{min} | Espessura mínima da rebarba |
| t_{max} | Espessura máxima da rebarba |
| VB_B | Desgaste de Flanco da Ferramenta |
| $VB_{Bmédio}$ | Desgaste de Flanco Médio da Ferramenta |
| V_c | Velocidade de corte |
| VC_N | Desgaste de entalhe |
| V_f | Velocidade de avanço |
| X | Matriz de contraste |
| X_i | Nível original da variável |
| \bar{X} | Nível médio original da variável independente |
| $X_{i_{máx}}$ | Nível máximo original da variável independente |

| | |
|---------------|--|
| $X_{i_{min}}$ | Nível mínimo original da variável independente |
| Y_n | Valor numérico do efeito |
| y | Valor numérico da significância |
| Z | Número de insertos da fresa |

Letras gregas

| | |
|--------------|--|
| α | Rotabilidade dos fatores no PCC |
| α_o | Ângulo de folga da ferramenta |
| χ_r | Ângulo de posição da ferramenta |
| ϵ | Ângulo de saída da ferramenta |
| ϵ_A | Deformação plástica do material |
| ϵ_e | Erro experimental |
| ϵ_f | Deformação crítica a fratura |
| ϕ'_o | Ângulo de cisalhamento negativo inicial |
| ϕ' | Ângulo de cisalhamento negativo final |
| η | Rotação do eixo árvore da máquina operatriz |
| η_x | Número de passadas |
| φ_s | Ângulo de inclinação da superfície livre da peça |
| ν | Graus de liberdade da variância |
| ξ | Nível da variável de entrada codificada |
| ω | Distância do início da rebarba ate a borda da peça |
| Ψ | Ângulo de saída da peça |

Abreviaturas

| | |
|-------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AISI | Instituto Americano do Ferro e Aço |
| APC | Aresta Postiça de Corte |
| ASTME | Sociedade americana de ferramentas e engenharia de manufatura |
| CAD | Desenho Assistido por Computador |
| CCD | Dispositivo de Carga acoplada |
| CNC | Comando Numérico Computadorizado |
| CODEF | Consórcio de Bebarbação e Acabamento da borda |

| | |
|-------------|--|
| CP..... | Corpo de Prova |
| DOE..... | Planejamento de Experimentos |
| DIN..... | Instituto Alemão de Normalização |
| EOS..... | Seqüência da Ordem de saída da aresta de corte |
| ISO | Organização Internacional para Padronização |
| HRC | Dureza Rockwell C |
| HP | Endurecido por Precipitação |
| LMAS..... | Laboratório de Manufatura Automação e Sustentabilidade |
| MQF..... | Mínima Quantidade de Fluido de corte |
| RSM | Metodologia de Superfície de Resposta |
| MT-CVD..... | Média Temperatura – Deposição Química de Vapor |
| MQ..... | Média Quadrática |
| PCBN..... | Nitreto Cúbico de Boro Policristalino |
| PCC..... | Planejamento Composto Central |
| PFC..... | Planejamento Fatorial Completo |
| SQ..... | Soma Quadrática |

SUMÁRIO

| | |
|--|--------------|
| Resumo | v |
| Abstract | vi |
| Lista de figuras | vii |
| Lista de tabelas | xiii |
| Lista de símbolos e abreviaturas | xv |
| Sumário | xviii |
| I – Introdução | 01 |
| II – Revisão Bibliográfica | 04 |
| 2.1 – Definições e Normas | 04 |
| 2.2 – Problemas causados pela presença da rebarba..... | 05 |
| 2.3 – Dimensões das rebarbas | 07 |
| 2.4 – Os sistemas aplicados na medição da rebarba | 08 |
| 2.5 – Histórico..... | 11 |
| 2.6 – O processo de formação das rebarbas | 12 |
| 2.6.1 – Etapas de formação da rebarba | 13 |
| 2.7– Classificações das rebarbas | 17 |
| 2.7.1 – Classificação das rebarbas conforme o seu mecanismo de formação | 18 |
| 2.7.2 – Classificação das rebarbas quanto à borda de formação no fresamento | 21 |
| 2.7.3 – Classificação da rebarba em função da direção da aresta de corte e da direção da deformação do material..... | 27 |
| 2.7.4 – Classificação da rebarba quanto a sua dimensão, na borda de saída da peça | 29 |
| 2.7.5 – Classificação da rebarba em função da geometria de saída da ferramenta de corte no processo de fresamento..... | 30 |
| 2.7.6 – Classificação da rebarba pela sua forma geométrica quando da saída da broca, no processo de furação..... | 32 |
| 2.7.7 – Classificação da rebarba conforme a sua morfologia | 34 |
| 2.8 – Propriedades das rebarbas | 37 |
| 2.9 – O efeito do material da peça na formação da rebarba..... | 38 |
| 2.9.1 – Formação da rebarba em materiais dúcteis | 39 |
| 2.9.2 – Formação da rebarba em materiais frágeis | 40 |
| 2.10 – O efeito das condições de corte na formação da rebarba | 42 |
| 2.10.1 – Fatores geométricos da peça/ ferramenta na formação da rebarba | 43 |

| | |
|---|-----------|
| 2.10.2 – Efeito das variáveis de usinagens como: Velocidade de corte, avanço e profundidade de corte..... | 48 |
| 2.10.3 – O efeito do fluido de corte na formação da rebarba | 52 |
| 2.11 – Aços Inoxidáveis..... | 55 |
| 2.11.1 – Classificação..... | 55 |
| 2.11.2 – Subclasses dos aços inoxidáveis conforme as normas técnicas..... | 57 |
| 2.11.3 – Aplicação dos aços inoxidáveis..... | 58 |
| 2.11.4 – Aço inoxidável endurecido por precipitação..... | 58 |
| 2.11.5 – Tratamento Térmico realizado no aço inoxidável PH 13-8Mo | 62 |
| 2.12 – Planejamento de Experimentos..... | 63 |
| 2.12.1 – Introdução..... | 63 |
| 2.12.2 – Planejamento Fatorial..... | 65 |
| 2.12.3 – Planejamento Fatorial completo 2^k | 66 |
| 2.12.4 – Análise de significância dos efeitos..... | 67 |
| 2.12.5 – Construção de um modelo capaz de prever a magnitude da variável resposta..... | 68 |
| 2.12.6 – Planejamento Fatorial fracionário 2^{k-p} | 68 |
| 2.12.7 – Planejamento Fatorial 3^k | 70 |
| 2.12.8 – Planejamento Composto Central (PCC)..... | 71 |
| 2.12.9 – Metodologia da Superfície Resposta (MSR)..... | 73 |
| III – Procedimentos Experimentais..... | 76 |
| 3.1 – Metodologia | 76 |
| 3.1.1. – Primeira etapa dos ensaios..... | 77 |
| 3.1.2. – Segunda etapa dos ensaios..... | 79 |
| 3.1.3 – Planejamento Composto Central do experimento. | 81 |
| 3.1.4 - Realização dos ensaios | 84 |
| 3.1.5 – Sistema de medição das rebarbas..... | 87 |
| 3.2 – Materiais e Equipamentos Utilizados | 89 |
| 3.2.1 – Material a ser usinado..... | 89 |
| 3.2.2 – Equipamentos Utilizados..... | 92 |
| IV – Resultados e Discussões..... | 98 |
| 4.1 – Informações gerais sobre os pré testes | 99 |
| 4.2 – Condições dos testes da primeira etapa | 104 |
| 4.2.1 – Aplicação do fluido de corte | 104 |
| 4.2.2 – Geometria da fresa/ferramenta | 107 |
| 4.2.3 – Carregamento da fresa | 109 |
| 4.2.4 – Profundidade de corte de transição | 111 |
| 4.2.5 – Dimensão da rebarba remanescente..... | 115 |
| 4.3 – Segunda etapa dos ensaios..... | 117 |

| | |
|--|------------|
| 4.3.1 – Informações gerais sobre os resultados | 117 |
| 4.3.2 – Análise dos resultados dos ensaios conforme o planejamento composto central | 120 |
| 4.3.3 – Análise de significância entre os efeitos | 123 |
| 4.3.4 – Modelo matemático para predição da altura da rebarba | 132 |
| 4.3.5 – Otimização do processo de formação da rebarba..... | 138 |
| V – Conclusões..... | 148 |
| VI – Propostas para trabalhos futuros | 150 |
| VII – Referências Bibliográficas..... | 151 |
| VIII – Anexos | 161 |
| 8.1 – Anexo I – Imagens das rebarbas obtidas com o auxílio do sistema da aquisição para os primeiros ensaios | 161 |
| 8.2 – Anexo II – Altura da rebarba nos seis pontos da borda. Para todos os ensaios | 176 |
| 8.3 – Anexo III – Altura da rebarba nos seis pontos da borda. Para os do processo de otimização..... | 177 |

CAPÍTULO I

1 - Introdução

Mesmo com a crescente evolução tecnológica que envolve os processos de manufatura, ainda são diversos os problemas ligados a qualidade do produto final. A situação não é diferente para com os produtos usinados, pois o controle dimensional e geométrico dos mesmos depende de fatores como a qualidade da máquina ferramenta, sistemas de medições, ferramentas de corte e outros impostos pelas limitações do projeto. Dentre os problemas causados pela deficiência destes fatores pode ser citada a falta da qualidade dimensional dos usinados, limitações na integridade superficial das peças e a falta da qualidade nas bordas das peças, sendo que neste último leva em consideração a formação da rebarba.

A rebarba é um resíduo indesejado que surge nas bordas das peças obtidas durante a manufatura, principalmente dos usinados. A sua dimensão depende do processo e da operação de usinagem, do material, das condições de corte, do material da ferramenta de corte, entre outros. É de responsabilidade da engenharia mecânica, em especial da área de fabricação, o estudo da rebarba. O seu estudo envolve os fenômenos que ocorrem durante a sua formação, sua caracterização e classificação, efeitos das variáveis envolvidas e a possibilidade da sua eliminação ou minimização. A sua retirada recebe o nome de rebarbação e é realizada por processos que vão desde a utilização de ferramentas manuais até ferramentas abrasivas em operações automatizadas, instaladas na própria linha de produção.

Os trabalhos que reportam o assunto têm grande interesse, principalmente, sobre os processos de rebarbação, enquanto que os mecanismos de formação das rebarbas, análise do comportamento de suas dimensões e a normalização das mesmas ainda precisam ser investigados.

Os primeiros trabalhos científicos relevantes sobre os mecanismos de formação das rebarbas e rebarbação foram publicados por volta da década de setenta, dentre eles, *Deburring Processes in Perspective* publicado por Schäfer F. em 1975 e *The Formation and Properties of Machining Burrs*, publicado por L. K. Gillespie e P. T. Blotter, em fevereiro de 1976. Várias outras publicações surgiram, principalmente sobre a influência dos parâmetros de usinagem, dos materiais das ferramentas e das peças nas dimensões das mesmas, todas com a mesma importância.

O estudo sobre a análise e a formação de rebarbas faz parte de uma das linhas de pesquisas implantada no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem-LEPU da UFU. O primeiro trabalho sobre o assunto foi o artigo „Estudo sobre Rebarbas Formadas na Usinagem do Aço Carbono ABNT 1045“ apresentado por A. K. Kaminise em 2001. Desde então vários outros surgiram, incluindo a dissertação de mestrado do autor desta tese, intitulada: “ESTUDO DA REBARBA NO FRESAMENTO DE FACEAMENTO EM BLOCOS DE MOTORES DE FERRO FUNDIDO CINZENTO UTILIZANDO INSERTOS DE CERÂMICA e PCBN” defendida em abril de 2004.

A obtenção de superfícies usinadas isenta de rebarbas, ou com rebarba de dimensões reduzidas, são fatores que motivaram a elaboração deste trabalho. O objetivo é estudar o comportamento das rebarbas na usinagem do aço inoxidável PH 13 8Mo, utilizando ferramentas de metal duro. Foi analisada a influência do fluido de corte, da geometria da ferramenta, do carregamento da fresa e da profundidade de transição de rebarba primária para secundária. Ainda foram variados os parâmetros velocidade de corte, avanço por dente, profundidade de corte, desgaste de flanco das ferramentas e ângulo de saída da peça.

Considera-se o fresamento como sendo um dos mais importantes processos de usinagem, dentre os demais. O alto índice de remoção do cavaco com pequenas dimensões, o bom acabamento superficial e a geração de superfície com alta complexidade tornou o processo muito utilizado. Este fator proporcionou o grande interesse pela utilização do fresamento neste trabalho.

A seleta aplicação do aço PH 13-8Mo é percebida, principalmente, na indústria aeronáutica. A sua elevada resistência mecânica, boa tenacidade e considerável resistência a corrosão em altas temperaturas justificam a sua aplicação em peça que encontra-se expostas a ambientes agressivos e que estão sujeitas a carregamentos dinâmicos. Estes fatores foi o grande motivador para a utilização deste material nos ensaios.

Os próximos capítulos deste trabalho serão apresentados conforme a seguinte estrutura:

No segundo capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica do assunto, no qual foram abordados os seguintes tópicos: definições, problemas causados pelas rebarbas, dimensões das rebarbas, sistemas de medições, histórico, processos de formação das rebarbas, etapas de formação, classificação das rebarbas, propriedades das rebarbas efeito das condições de corte. Objetivo deste capítulo é proporcionar o embasamento teórico necessários ao restante do trabalho.

No terceiro capítulo será apresentado o procedimento experimental. Neste capítulo será abordado a metodologia, o planejamento composto central, sistema de medição adotado, material usinado (geometria e propriedades), os equipamentos e as ferramentas de corte utilizada nos ensaios.

No quarto capítulo serão apresentados os resultados, juntamente com a análise e discussões, dos ensaios iniciais, da primeira e da segunda etapa. A otimização do modelo experimental também será apresentado neste capítulo.

No quinto capítulo serão apresentadas às conclusões baseadas nos resultados e nas discussões dos ensaios.

No sexto capítulo apresentam-se as sugestões para trabalhos futuros.

No sétimo capítulo foi apresentado às referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

Por último, no capítulo oito, são apresentados dois anexos, sendo um com todos os valores medidos da rebarba. No segundo anexo serão mostradas algumas fotos com as medições.

CAPITULO II

2 - Revisão Bibliográfica

Rebarbas são resíduos indesejáveis que sempre irão aparecer nos produtos usinados. Seu surgimento compromete a qualidade das peças, pois altera suas dimensões e dificulta a montagem dos conjuntos mecânicos, elevando, portanto, o custo do produto manufaturado. O estudo da sua formação tem grande importância, pois a partir dele torna-se possível obter condições favoráveis a minimização das suas dimensões.

O desenvolvimento da rebarba é mais crítico na usinagem de materiais dúteis, porém elas estão presentes também na usinagem de materiais frágeis. Quando no processo de formação da rebarba, antes de sua completa projeção da peça, ocorrer a fratura de sua raiz, resultará em um dano na aresta da peça, similar a um processo de desbarrancamento. A este fenômeno, Ko e Dornefeld (1996) deram o nome de *Breakout* ou rebarba negativa, salientando que os materiais frágeis estão mais propensos a este processo.

A operação de retirada da rebarba de sua borda recebe o nome de rebarbação. São vários os processos de rebarbação. Quando automáticos os equipamentos são instalados na planta da linha de produção. Outros recursos como ferramentas abrasivas operadas manualmente são muito utilizadas na manufatura.

2.1 - Definições e Normas

Conforme a ASTM E (American Society of Tool and Manufacturing Engineers), rebarbas são projeções indesejáveis do material da peça formada na frente da aresta de corte devido à

deformação plástica durante a usinagem. Olvera e Barrow (1996) definiram rebarba como sendo uma projeção indesejável do material que aparece depois da borda da peça, devido à deformação plástica da peça durante o processo de usinagem. Já Gillespie (1999) cita que rebarba é uma pequena saliência ou uma zona irregular obtida durante a usinagem ou conformação plástica do metal. A norma ISO 13715 (2000) define rebarba como sendo o “restante de material encontrado fora da forma geométrica nominal de uma borda externa, deixado como resíduo de usinagem ou de outro processo de fabricação”. Uma definição geral e completa muito utilizada “É uma projeção indesejável formada na borda da peça devido à deformação plástica ocorrida nos processos de fabricação, sejam por conformação ou usinagem” (AVILA; DORNFELD, 2004A).

A norma ISO 13715 (2000) ainda define a qualidade das bordas das peças. Nela são mostrados os tipos e dimensões de borda externa, envolvendo a tolerância, e os exemplos das rebarbas. A Fig. 2.1 faz parte da norma, onde são mostrados os tipos e dimensões de borda externa, envolvendo, neste caso, a tolerância para a dimensão e os exemplos das rebarbas.

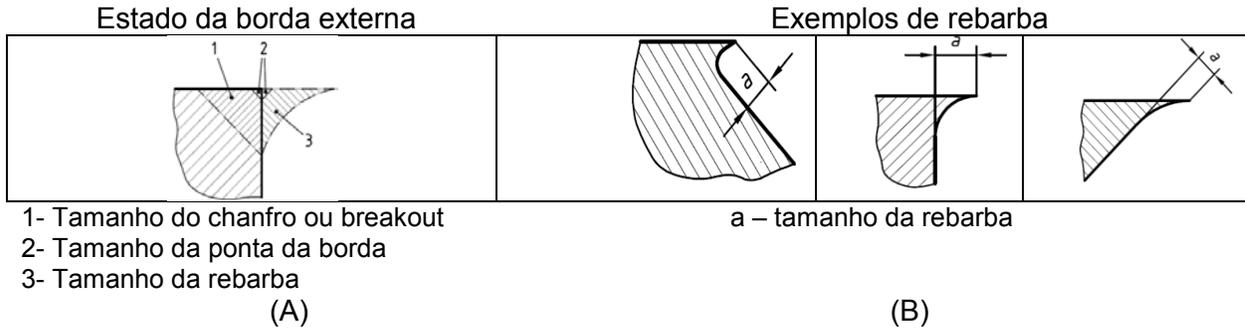
A norma ISO 13715 (2000) tem sido usada como uma boa referência na análise da qualidade das bordas. Ela permite criar condições de determinar a existência ou não da rebarba nas peças, como mostra a Fig. 2.1 (c). No entanto, não são feitas referências sobre a aplicação da peça portadora da rebarba, pois, em muitas indústrias, é esse o critério adotado para decidir se a peça é portadora ou não de rebarba. Observa-se ainda que a norma não faz referências à altura ou espessura da rebarba, mas sim ao tamanho da mesma.

As normas ISO 13715 (2000), DIN 6784 (1982), WBTC-STD14.1997 e algumas propostas de padronização, classificam as bordas das peças quanto a formação e a dimensão da rebarba, apesar de prevalecerem as normas estabelecidas por cada segmento industrial.

Torna-se necessário realizar a operação de rebarbação de uma peça quando a altura da rebarba interfere nas suas dimensões. Para a norma DIN 6784 (1982) a “rebarba tolerável” irá depender do projeto da peça, e essa dependerá da função, da montagem, segurança e outros fatores que poderão surgir.

2.2 - Problemas causados pela presença da rebarba

Uma série de problemas são causados com a presença das rebarbas nas peças obtidas pelos processos de usinagem. Os principais são (GILLESPIE, 1999):



a -Tamanho recomendado das bordas, em mm.

| a | Aplicação |
|--------|---|
| a | Borda com rebarba permitida ou não é permitido chanfros ou breakout |
| + 2,5 | |
| + 1 | |
| + 0,5 | |
| + 0,3 | |
| + 0,1 | |
| + 0,05 | Topo ou ponta da borda |
| + 0,02 | |
| - 0,02 | |
| - 0,05 | Borda com chanfro permitido ou não é permitido rebarba |
| - 0,1 | |
| - 0,3 | |
| - 0,5 | |
| - 1 | |
| - 2,5 | |
| a | Tamanho adicional se for necessário |

(C)

Figura 2.1 - Qualidade da borda das peças usinadas conforme a norma **ISO 13715**. (A) - Estados da borda externa, (B) - Exemplos de rebarbas e (C) - Recomendação para o tamanho das bordas.

- Acidentes com operadores na montagem e desmontagem dos conjuntos mecânicos;
- Interferência no ajuste das montagens;
- Travamento dos mecanismos;
- Marcas ou riscos nas peças com superfícies já acabadas;
- Aumento do atrito nos conjuntos mecânicos, em alguns casos não admissíveis;
- Aumento do desgaste dos conjuntos quando solicitado o movimento;
- Curto-circuito ou mau contato nos sistemas elétricos;

- Entupimento de filtros devido ao acúmulo de rebarbas;
- Danificação dos anéis de vedação dos sistemas fluidodinâmicos;
- Grandes concentrações de tensão, interferindo no tratamento térmico da peça;
- Desenvolvimentos de arestas cortantes nas chapas estampadas;
- Irregularidades nas arestas, tornando as mesmas não retilíneas;
- Turbulência em escoamento de fluidos;
- Redução da deformação plástica, na região da mesma;
- Peças com dimensões não confiáveis.

2.3 - Dimensão das rebarbas

Dentre as duas grandezas que identificam a rebarba, altura (h) e espessura (t), ilustradas na Fig. 2.2, considera-se a espessura (t) mais importante do ponto de vista da rebarbação, pois o esforço necessário para fazer a sua retirada é proporcional a espessura da base (t_b). Do ponto de vista da dimensão da peça a altura (h) da rebarba tem promovido consideráveis distorções e torna-se, portanto, a principal dimensão.



- h : Altura da rebarba
- t_b : Espessura da raiz da rebarba
- t_{min} : Espessura mínima da rebarba
- t_{max} : Espessura máxima da rebarba

Figura 2.2 - Dimensões da rebarba [adaptado de Kishimoto et al., (1981)]

Outro modelo geométrico foi criado por Schäfer (1978). Nele é descrita a grandeza raio de arredondamento da rebarba na sua raiz, além da altura e espessura. Estas grandezas foram exaustivamente manipuladas durante o cálculo da força necessária ao processo de rebarbação. A Fig. 2.3 mostra o modelo geométrico e os parâmetros da rebarba criados por Schäfer.

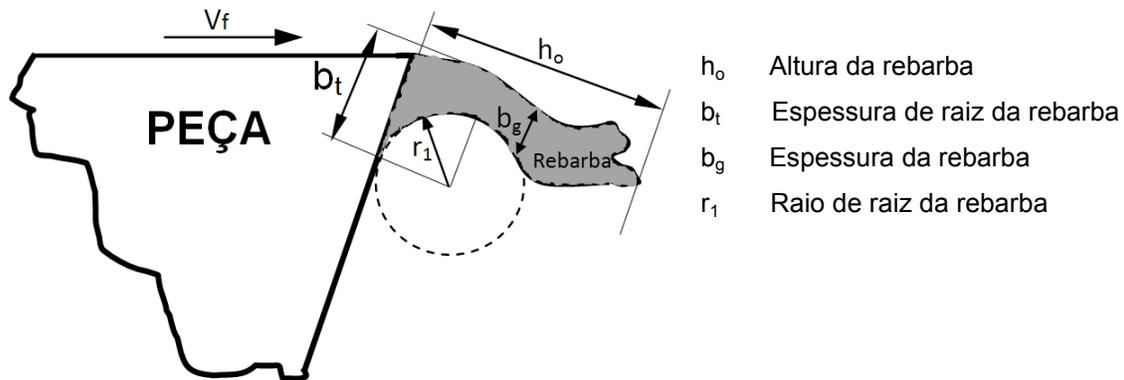


Figura 2.3 - Modelo geométrico da rebarba e seus parâmetros [adaptado de Schäfer, (1978)]

2.4 - Os sistemas aplicados na medição da rebarba

Os sistemas aplicados na medição da rebarba geralmente são equipados com instrumentos de contato ou sensores de proximidade. Dentre os instrumentos de contato comumente utilizados num sistema de medição estão os paquímetros, os micrômetros e, principalmente, os relógios comparadores e os relógios apalpadores. Estes últimos são muito utilizados na medição da rebarba, principalmente no chão de fábrica. Destaca-se também a própria experiência do operador em fazer a inspeção da rebarba a partir do tato ou visão, (MEUM, 2000).

A medição da rebarba utilizando instrumentos equipados com sensores de contato, como os citados anteriormente, sempre irão introduzir algum tipo de erro na medição. A compressão aplicada pelos sensores dos instrumentos poderá causar uma possível redução na altura da rebarba, pois a resistência elástica armazenada é sensível à pequena compressão dos instrumentos de medida (KO; KIM, 2004).

Quanto aos sistemas de medição linear com sensores de proximidade, são destacados os microscópios ópticos, microscópios ferramenteiros, método de interferometria a laser, método da triangulação a laser e conoscopia holográfica.

Estes sistemas de medição têm custos elevados e muitas vezes impróprios na aplicação industrial, pois são sensíveis e exigem ambientes especiais. Portanto, é com bastante sucesso que a sua aplicação ocorre nos laboratórios de pesquisas, principalmente o método de interferometria a laser. A interferometria a laser é um sistema de medição bastante utilizado na

medição da rebarba, e o funcionamento do equipamento pode ser representado pelo diagrama mostrado na Fig. 2.4.

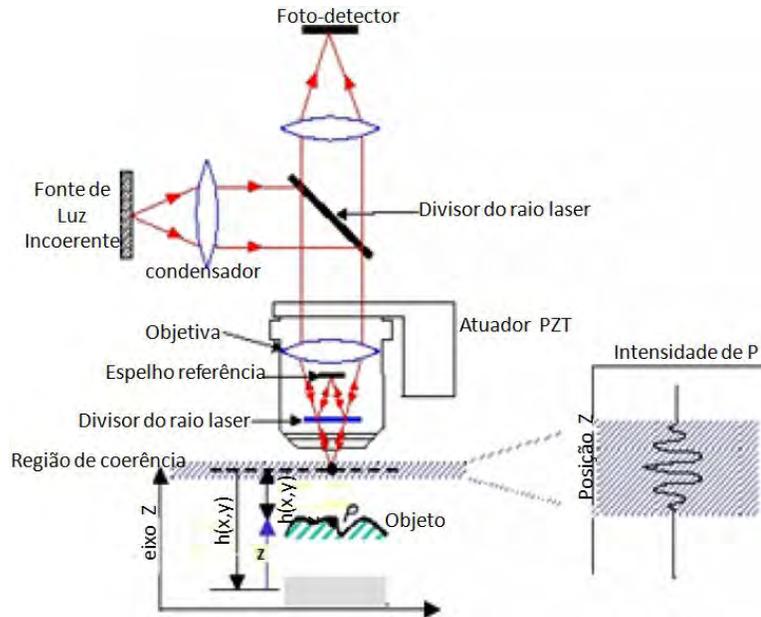


Figura 2.4 - Princípio do método de interferometria a laser (KO; KIM, 2004)

A medição da altura e da espessura da rebarba também pode ser feita através da microscopia ótica. No microscópio ótico mede-se a distância entre a borda da peça, onde formou a rebarba, até o topo da rebarba. A Fig. 2.5 mostra a altura e a espessura da rebarba vista pelo microscópio ótico. As medições feitas por este método às vezes são consideradas imprecisas, devido à dificuldade de localização da borda da peça, onde formou-se a rebarba, pois devido à ampliação do microscópio essa referência será perdida (MANJUNATHA, 2007).

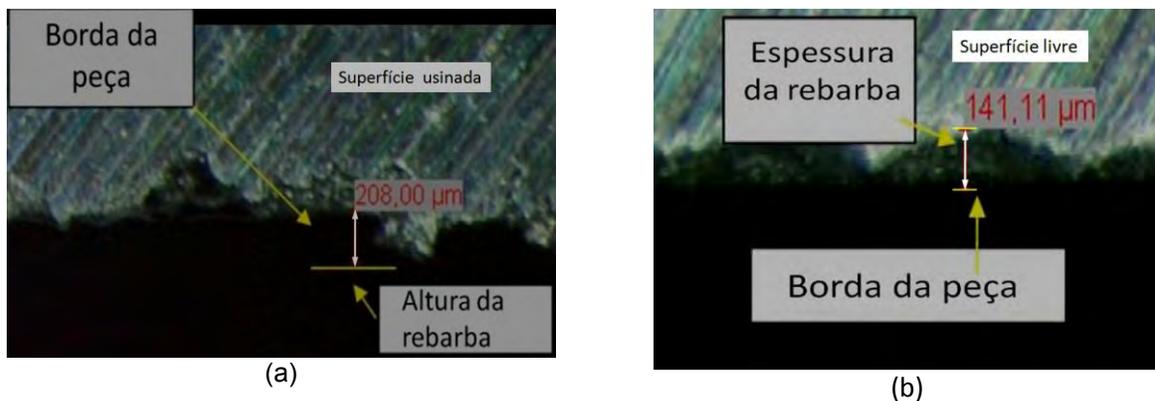


Figura 2.5 - (a) Medição da altura da rebarba, (b) Medição da espessura da rebarba (SHEFELBINE, 2004)

Outro processo de medição das rebarbas foi utilizado por Jinsoo (2000). Na investigação das características geométricas da rebarba formada na furação do aço inoxidável, o autor utilizou uma espécie de silicone para moldar a rebarba. Após a moldagem da geometria da rebarba no silicone, o molde era então preparado e levado ao microscópio, conforme pode ser observado na Fig. 2.6

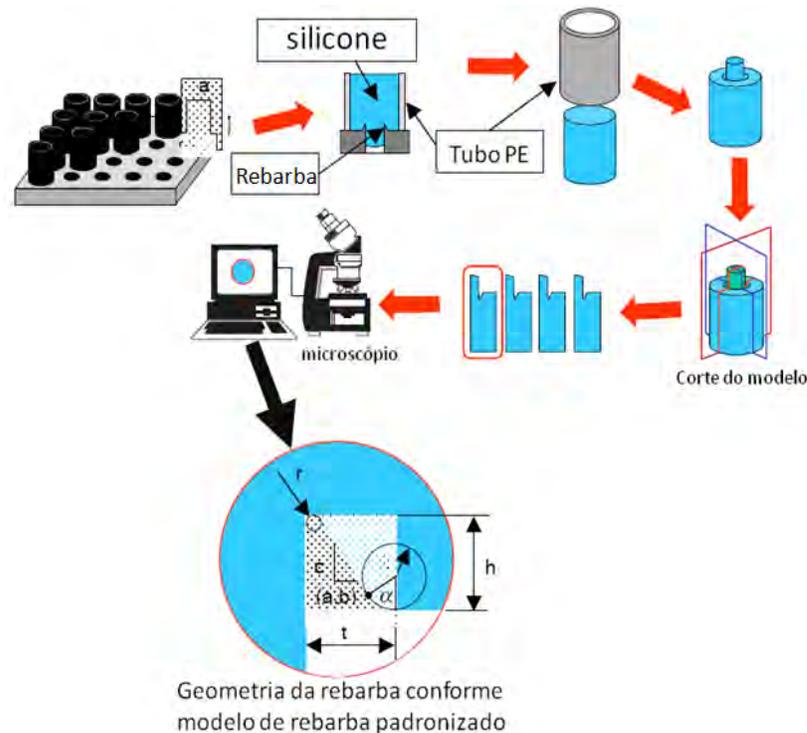


Figura 2.6 - Esquema da caracterização geométrica e medição da rebarba utilizado por Jinsoo (2000)

A imagem da seção transversal da rebarba foi adquirida por um processador de imagem. Com seu auxílio tornou-se possível a obtenção da altura, espessura, área e o volume.

Procedimento semelhante foi utilizado por Silva et al., (2006). Neste processo aplicou-se uma massa para moldagem odontológica, marca Kerr, de média viscosidade à base de polissulfeto. Sua aplicação deve ser feita sobre a borda onde foi formada a rebarba. Após a sua fusão no molde metálico, essa massa fundida, com o “negativo” da rebarba, deve ser cortado em pequenas espessuras e levado ao microscópio. Através da imagem observada no microscópio torna-se possível medir a altura e a espessura da rebarba, conforme mostra a seqüência da Fig. 2.7.

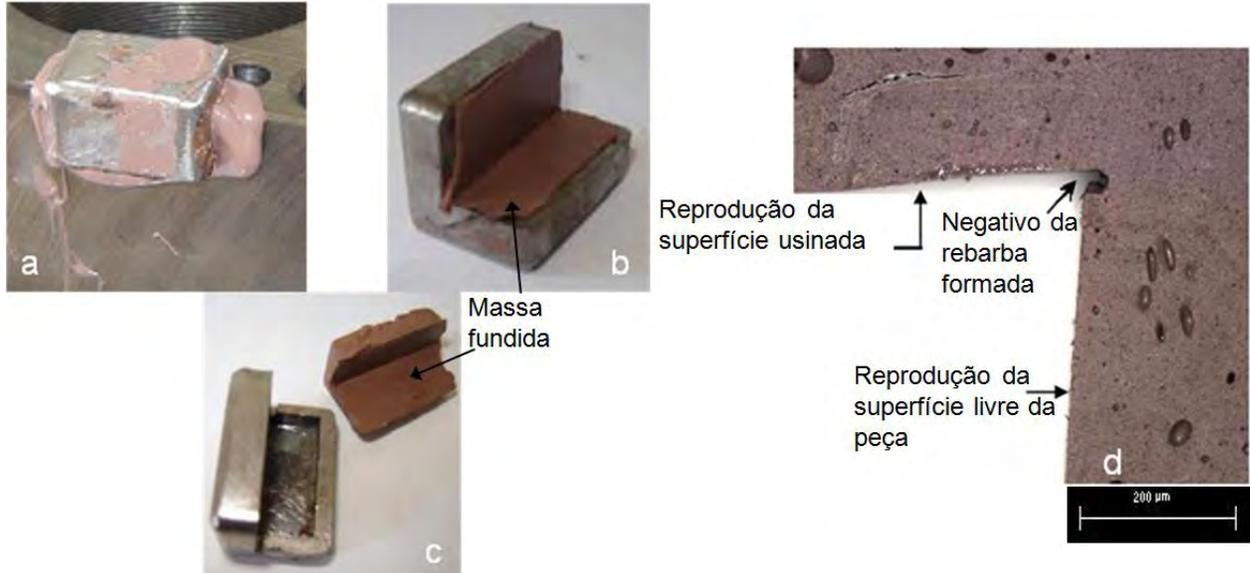


Figura 2.7 - Obtenção da imagem da rebarba a ser medida, **a** - borda com a rebarba, molde e a massa na forma pastosa, **b** - Molde com a massa fundida, **c** - massa preparada para o corte e **d** - modelo pronto para ser levado ao microscópio. (SILVA et al., 2006)

2.5 Histórico

Os primeiros trabalhos (estudos) importantes publicados sobre rebarbas datam de 1975 com Schäfer F. sob o título de *Entgraten, Krausskopfverlag, Mainz*. Informações sobre a geometria da rebarba e sugestões sobre a rebarbação foram apresentadas neste trabalho. Em fevereiro de 1976, Gillespie e Blotter o trabalho com o título de “*The Formation and Properties of Machining Burrs*”. Neste trabalho os autores identificaram quatro tipos de rebarbas, conforme os seus mecanismos de formação, independente do processo de usinagem.

Existem várias instituições que se dedicam ao estudo da formação da rebarba, bem como a forma de minimizá-la ou eliminá-la. É o caso do Laboratório de Manufatura Automação e Sustentabilidade (LMAS) da Universidade da Califórnia, Berkeley – USA, onde atua o grupo CODEF (*Consortium on Deburring and Edge Finishing*), reunindo um número considerável de pesquisadores. Essa instituição tem publicado diversos trabalhos sobre o referido assunto com propostas de minimização da altura e da espessura da rebarba, principalmente nos processos de furação e fresamento. O desenvolvimento de equipamentos utilizados na rebarbação constitui outra importante linha de pesquisa do LMAS.

No Brasil o Laboratório de Ensino Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia tem como uma linha de pesquisa o estudo da formação da rebarba e da sua dimensão em função das principais variáveis de corte. Vários trabalhos de iniciação científica e dissertações de mestrados já foram concluídos nesta instituição.

2.6 - O processo de formação das rebarbas

A grande quantidade de publicações sobre rebarbas retrata o seu perfil, sua morfologia, a sua inconveniência, custos para promover a sua retirada entre outros fatores. Quanto ao fenômeno da sua formação, do ponto de vista do conhecimento, ainda é considerado insatisfatório, (HASHIMURA et al., 1999a).

Utilizando o corte ortogonal torna-se possível analisar os mecanismos e etapas de formação das rebarbas, conforme mostra Fig. 2.8, proposta por Ko e Dornfeld (1996).

A formação da rebarba inicia-se quando a ferramenta de corte aproxima-se do final da peça, proporcionando nesta região grandes deformações na borda da peça. Essa deformação vai causar o escoamento do material da peça, gerando uma saliência, ou o destacamento total ou parcial da borda, dependendo das propriedades do material.

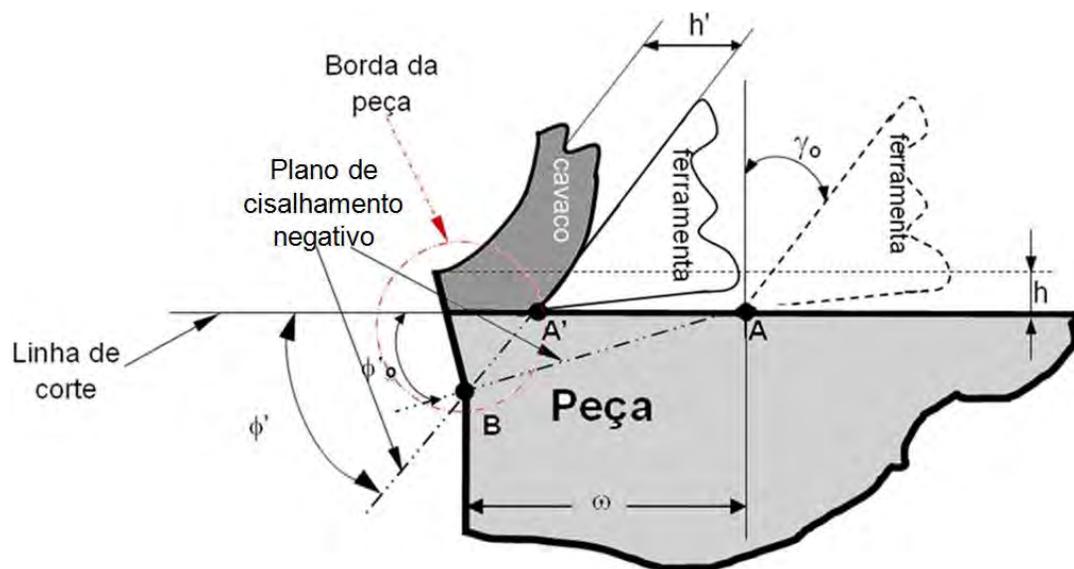


Figura 2.8 - Ilustração do início de formação da rebarba e o deslocamento da ferramenta de corte da posição **A** para a posição **A'** (adaptado de Ko e Dornfeld, 1996)

Na Fig. 2.8 pode-se identificar:

- Ponto (**A**): Chamado de ponto de transição entre o cavaco e a rebarba;
- Ponto (**A'**): Ponto onde inicia-se o pivotamento (dobramento) da rebarba.
- Distância (ω): Distância entre o ponto **A** e a extremidade da peça (borda);
- Ponto (**B**): Chamado de ponto de pivotamento da rebarba;
- Segmento **AB**: Este segmento representa o plano de cisalhamento negativo inicial;
- Segmento **A'B**: Este segmento representa o plano de cisalhamento negativo final;
- Ângulo de cisalhamento negativo inicial (ϕ'_o). É o ângulo formado pela linha de corte e o segmento **AB**;
- Ângulo de cisalhamento negativo final (ϕ'). É o Ângulo formado pela linha de corte e o segmento **A'B**.

Dá-se o início da formação da rebarba quando a ferramenta de corte, durante o percurso, atinge o ponto **A**. Neste mesmo instante a formação do cavaco se encerra. Toda energia utilizada para a formação do cavaco será transferida para formação da rebarba. Neste ponto também é identificado o vértice do ângulo de cisalhamento negativo inicial (ϕ'_o).

O deslocamento da ferramenta de corte do ponto **A** para o ponto **A'** promove a rotação do plano de cisalhamento negativo, com o ponto de pivotamento **B** fixo. Como consequência há a transformação do ângulo de cisalhamento negativo inicial (ϕ'_o) em final (ϕ'). A partir do instante em que ocorre a mudança desse ângulo, ou quando a ferramenta se desloca de **A** para **A'**, haverá a movimentação de material para se formar a rebarba.

2.6.1 - Etapas de formação da rebarba

A maioria das publicações sobre a formação das rebarbas descreve o seu mecanismo em função dos parâmetros de usinagem, mas principalmente pelas propriedades dos materiais das peças. Hashimura *et al* (1999B) propuseram um modelo que divide o processo de formação da rebarba em cinco etapas, conforme Tab. 2.1 e descrições a seguir.

Tabela 2.1 - Etapas de formação das rebarbas sugeridas por Hashimura *et al* (1999B)

| Etapas | Para Materiais Dúcteis e Frágeis |
|---------------|--|
| Etapa A | Corte Contínuo |
| Etapa B | Pré-início da Rebarba |
| Etapa C | Início da Rebarba |
| Etapa D | Pivotamento |
| Etapa E | Desenvolvimento da zona de cisalhamento negativa |

Descrição das Etapas:

• Etapa A

Chamada de Corte Contínuo. Nesta primeira etapa ainda não aparece a formação da rebarba, mas sim, o processo cíclico da formação do cavaco. Nesse estágio, tem-se cavaco contínuo para materiais dúcteis e cavaco descontínuo para materiais frágeis. A Fig. 2.9a mostra essa etapa.

As tensões e as deformações do material da peça estão bem distribuídas na zona de cisalhamento primária e secundária. O término dessa etapa ocorre quando a ferramenta de corte atinge o ponto **A**, conforme mostrado na Fig. 2.8.

• Etapa B

A etapa conhecida com Pré-início da rebarba dá-se quando a ferramenta de corte passa pelo ponto **A**. A partir desse ponto o campo elástico à frente da região plástica da zona de cisalhamento primário atinge a borda de saída da peça, influenciando o processo de tensão e deformação presentes. A aresta da peça começa a ser envolvida pela deformação elástica. A abrangência dessa deformação irá depender dos parâmetros de usinagem que atuam no processo. A Fig. 2.9b mostra esta etapa e as deformações que ocorrem na aresta da peça.

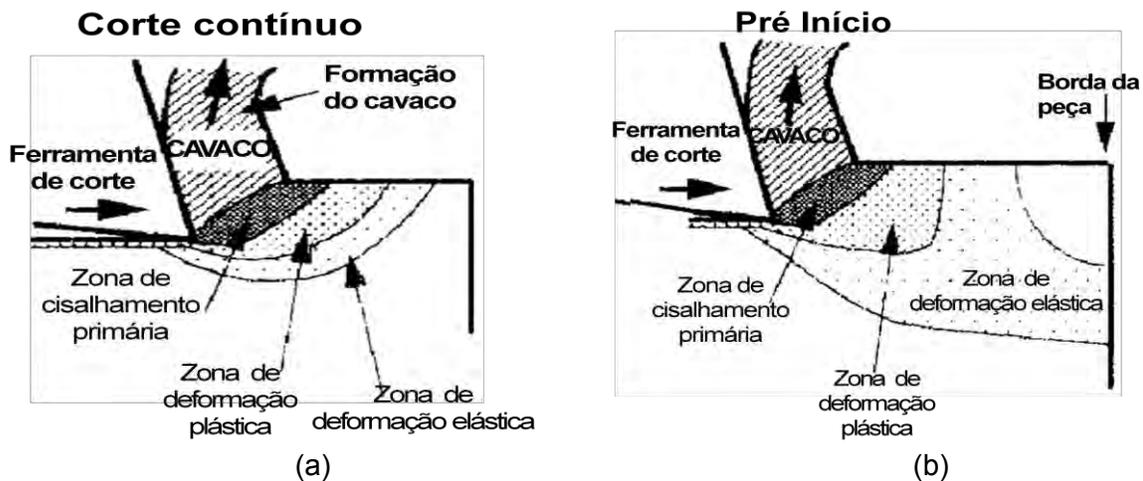


Figura 2.9 - Etapas A e B de formação das rebarbas sugeridas por Hashimura *et al*, [adaptado de Hashimura *et al.*, (1999b)]. (a) etapa do Corte Contínuo, (b) etapa do Pré Início da rebarba

• Etapa C

Na etapa conhecida como Início da Rebarba, o campo plástico que circunda a zona de cisalhamento primário é aumentado e a borda da peça se inclina. A Fig. 2.10a ilustra esta etapa.

- Etapa D

Na etapa conhecida como Pivotamento ocorre grandes deformações na borda da peça. Identificando-se uma inclinação desta em torno do ponto de pivotamento. Nesse estágio as forças de corte reduzem a sua intensidade devido às grandes deformações ocorridas. A Fig. 2.10(b) apresenta essa etapa da formação da rebarba.

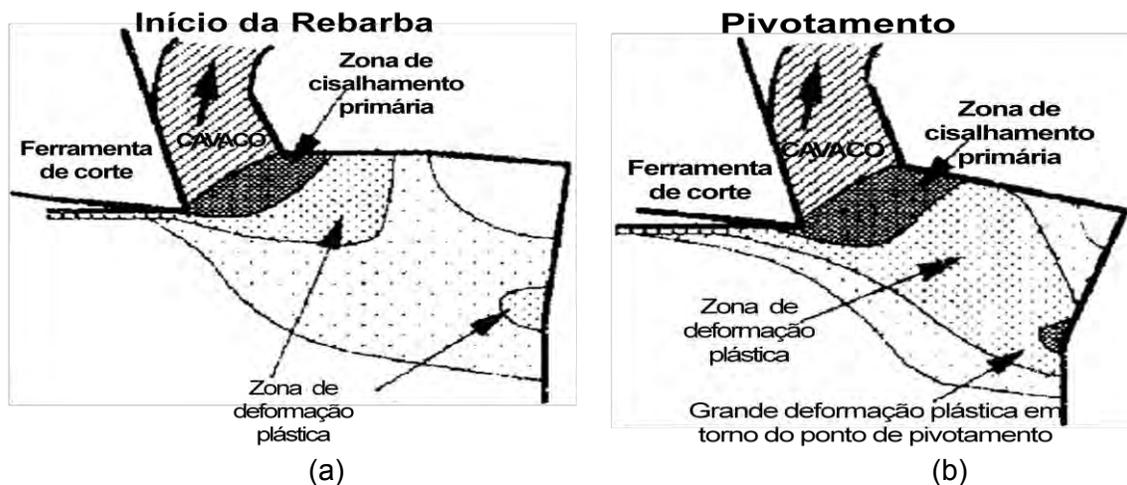


Figura 2.10 - Etapas C e D de formação das rebarbas sugeridas por Hashimura *et al*, [adaptado de Hashimura *et al* (1999B)]. (a) - etapa de Início da Rebarba, (b) - etapa do Pivotamento

- Etapa E

O surgimento da zona de cisalhamento negativa acontece nesta etapa. À medida que a ferramenta de corte desloca-se no sentido da borda da peça a deformação plástica torna-se mais intensa. Essa deformação envolve por completo o “ponto de pivotamento”, ligando o mesmo à zona de cisalhamento primária. A região de deformação imediatamente abaixo da linha de corte (Fig. 2.11) é chamada de Zona de Cisalhamento Negativo. À medida que a ferramenta de corte se movimenta, o pivotamento do cavaco continua.

Nas etapas **A** a **E** descreveu-se o desenvolvimento da rebarba apenas pela deformação plástica, sem considerar fratura alguma. Neste processo as tensões e deformações ocorrem intensamente nas zonas de cisalhamento primário e de cisalhamento negativo, com a rebarba sendo formada até a saída total da ferramenta.

Para materiais dúcteis, a deformação crítica à fratura, ε_f , aparece no plano de cisalhamento primário, promovendo a abertura de uma trinca na ponta da ferramenta sobre este plano. A sua propagação caminha na direção da linha de corte, destacando o cavaco da peça.

Abaixo da linha de corte a deformação continua até a ferramenta de corte perder o contato com a peça. O excesso de material retido na peça recebe o nome de rebarba positiva, conforme pode ser mostrado na Fig. 2.12.

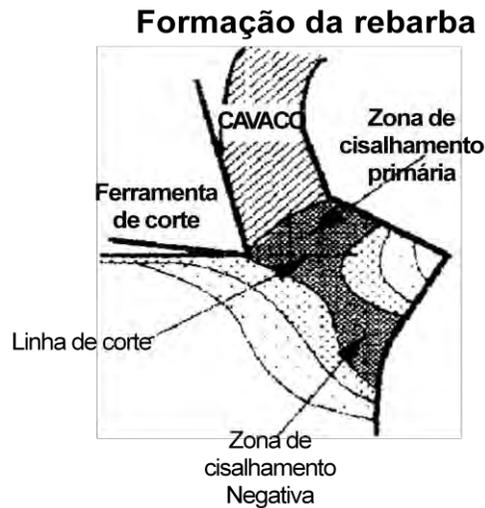


Figura 2.11 - Etapa E de formação das rebarbas sugeridas por Hashimura *et al*, [adaptado de Hashimura *et al* (1999B)] Desenvolvimento da zona de cisalhamento negativo

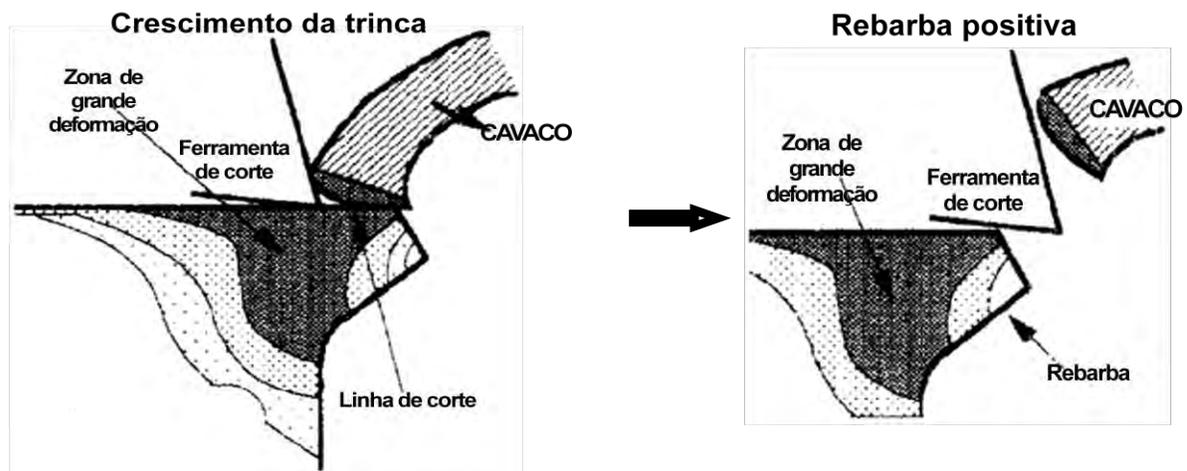


Figura 2.12 - Formação das rebarbas para materiais dúcteis, sugeridas por Hashimura *et al*, [adaptado de Hashimura *et al*, (1999b)]

Para materiais frágeis, apesar da deformação ser maior na zona de cisalhamento primário, a deformação crítica à fratura ϵ_f aparece no plano de cisalhamento negativo, com separação de material se desenvolvendo no sentido do ponto de pivotamento. Assim, todo o

material que se encontra sobre o plano de cisalhamento negativo será destacado da peça. Ao fenômeno que promove o destacamento de material, conforme descrito, é chamado de *breakout*, ou formação do pé (*foot forming*) segundo Pekelharing (1978). A borda da peça assim deixada é conhecida como rebarba negativa. A Fig. 2.13 ilustra esta rebarba.

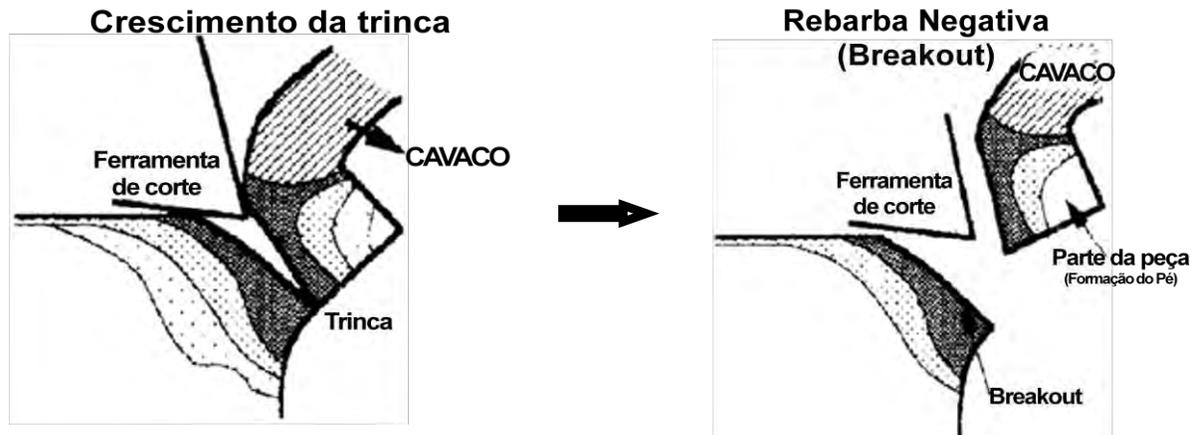


Figura 2.13 - Formação das rebarbas para materiais frágeis, sugeridas por Hashimura *et al.*, [adaptado de Hashimura *et al.*, (1999b)]

2.7 - Classificação das rebarbas

A inexistência de uma classificação normalizada para as rebarbas levou cada um dos pesquisadores desse assunto a criar a sua própria classificação. Critérios como a sua geometria, incluindo a altura, processos de fabricação, mecanismos de formação, morfologias e outros foram responsáveis pelo aparecimento de várias propostas de classificação para as rebarbas.

Algumas das principais classes de rebarbas serão apresentadas a seguir.

- Pelos mecanismos de formação, (GILLESPIE; BLOTTER, 1976)
- Quanto à borda de formação no fresamento (local de formação na peça), (GILLESPIE, 1975 e 1976)
- Em função da combinação entre a direção da aresta de corte envolvida e a direção da deformação no movimento da ferramenta, (NAKAYAMA; ARAI, 1987).

- Quanto à dimensão da rebarba no fresamento (KISHIMOTO., et al 1981)
- Em função da geometria de saída da ferramenta de corte (relação entre borda da peça e a aresta da ferramenta corte), (HASHIMURA et al., 1999).
- Pela sua forma geométrica quando da saída da broca, no processo de furação, (KIM et al., 2000).
- Pela morfologia da rebarba (CHERN, 1993)

Estas classificações serão discutidas individualmente na seqüência.

2.7.1 - Classificação das rebarbas conforme o seu mecanismo de formação

A classificação da rebarba a partir de seus mecanismos de formação foi apresentada por Gillespie e Blotter (1976). Quatro mecanismos básicos foram destacados e, a partir deles, foram classificadas quatro tipos diferentes de rebarbas. Um único tipo de rebarba poderá envolver mais de um mecanismo. Os mecanismos e os tipos de rebarbas estão expostos na Tab. 2.2 e abrangem todos os processos.

Tabela 2.2 - Mecanismos e tipos de rebarbas, segundo Gillespie e Blotter (1976)

| Mecanismos | Tipos de rebarbas |
|---|----------------------|
| Deformação plástica lateral. O fluxo do material escoará para a superfície livre da peça. | Tipo <i>Poisson</i> |
| Dobramento e flexão do cavaco na direção do corte, quando a ferramenta de corte atinge a borda da peça. | Tipo <i>Rollover</i> |
| Tracionamento seguido de ruptura do material localizado entre a peça e o cavaco. | Tipo <i>Tear</i> |
| A separação da peça do seu material antes da conclusão do corte. | Tipo <i>Cut-off</i> |

a) - Rebarba do tipo *Poisson*

Dois fatores são responsáveis por esse tipo de rebarba: a área de contato da ponta da ferramenta de corte com a peça e a força de avanço promovida pelo deslocamento da ferramenta de corte.

Sobre a ponta da ferramenta de corte atuam grandes tensões proporcionadas pela força de avanço e pela superfície da ponta da ferramenta, que mesmo pequena, apresenta um raio de arredondamento.

Estas tensões comprimem o material a ser usinado, surgindo uma deformação plástica nas laterais, deslocando parte deste material deformado para a superfície livre da peça. A Fig. 2.14a mostra a compressão da ferramenta sobre o material.

Em seu trabalho Gillespie e Blotter (1976) comparam a ferramenta de corte a um cilindro imaginário e à medida que o mesmo desloca-se no sentido do avanço, penetra na peça, conforme mostra Fig. 2.14b Dependendo do raio de arredondamento (diâmetro do cilindro imaginário) e da força de avanço, tem-se as dimensões do material deformado, neste caso o tamanho da rebarba.

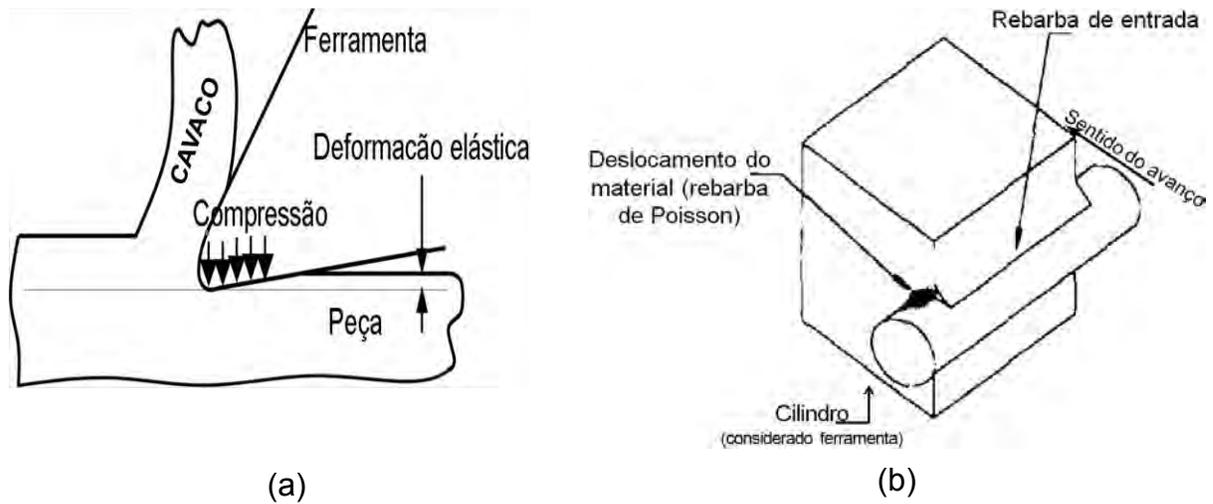


Figura 2.14 - Formação da rebarba do tipo Poisson. (a) - Compressão da ferramenta sobre o material, (b) - avanço do cilindro (ferramenta de corte), [adaptado de Gillespie e Blotter (1976)]

Na Fig. 2.14b além da rebarba do tipo *Poisson*, outra rebarba também aparece, conhecida como rebarba de entrada. Devido à pequena dimensão destas rebarbas, na grande maioria dos casos, as bordas podem ser consideradas isentas de rebarbas. A sua dimensão e geometria dependerão do grau de encruamento ou recozimento do material e será discutida posteriormente.

b) – Rebarba do tipo *Rollover*

Diferente da rebarba anterior esta é formada com a saída da ferramenta, no final do corte. Na saída da ferramenta, antes que ocorra o cisalhamento do cavaco este será dobrado no

sentido do avanço e sobre a borda de saída da ferramenta, conforme mostra a Fig. 2.15(a). A Fig. 2.15 (b) mostra a rebarba do tipo *Rollover*, (GILLESPIE; BLOTTER, 1976).

Esse tipo de rebarba sempre irá aparecer nas bordas que compõem a superfície livre das peças. São consideradas rebarbas de dimensões elevadas e o seu comprimento é semelhante a profundidade de corte axial do processo. Ocorrem principalmente nos processos de fresamento, furação e brochamento.

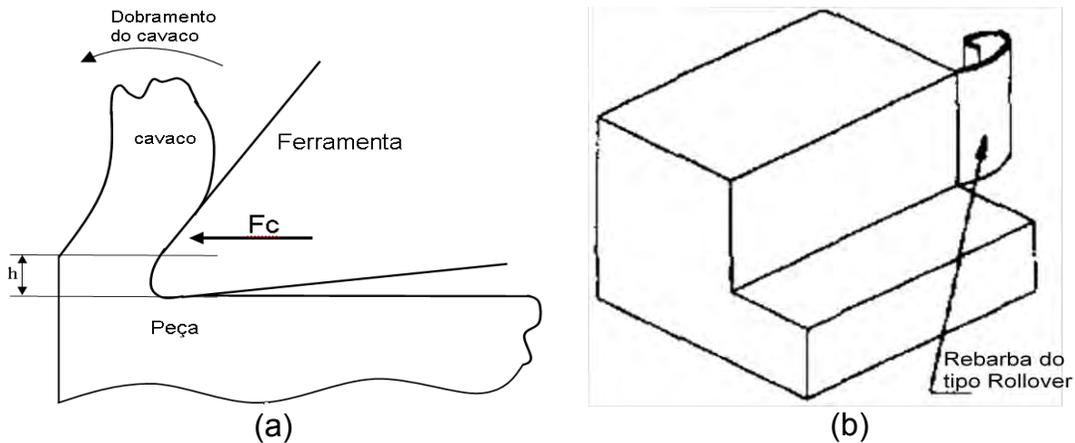


Figura 2.15 - Rebarba do tipo *Rollover*. (a) - Mecanismo de formação da rebarba, (b) - Rebarba do tipo *Rollover* formada, (GILLESPIE; BLOTTER, 1976)

c) - Rebarba do tipo *Tear*

Esse tipo de rebarba ocorre quase sempre no processo de fresamento. Ela será formada quando o cavaco é tracionado da peça, situação imposta pelo cisalhamento. Após a ruptura, uma parte do material já deformado, permanecerá na peça. A Fig. 2.16 mostra a formação da rebarba do tipo *Tear*.

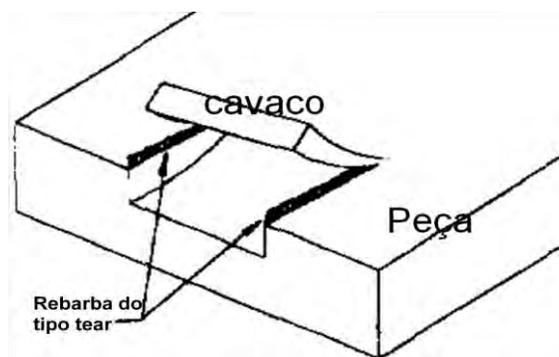


Figura 2.16 - Rebarba do tipo *Tear*, (GILLESPIE; BLOTTER, 1976)

d) - Rebarba do tipo *Cut-off*

O mecanismo de formação dessa rebarba não tem nenhuma semelhança com aquelas até aqui descritas, uma vez que a sua formação acontece antes mesmo do cisalhamento ou da deformação plástica. Nos processos de serramento ou sangramento radial é comum o seu aparecimento. A Fig. 2.17 apresenta os locais de surgimento da rebarba do tipo *Cut-off* na operação de torneamento radial (sangramento).

Apesar de comum, o interesse pela investigação desse tipo de rebarba é pequeno, uma vez que é possível prever o seu desaparecimento total ou parcial, dependendo da escolha adequada dos dispositivos de fixação peças.

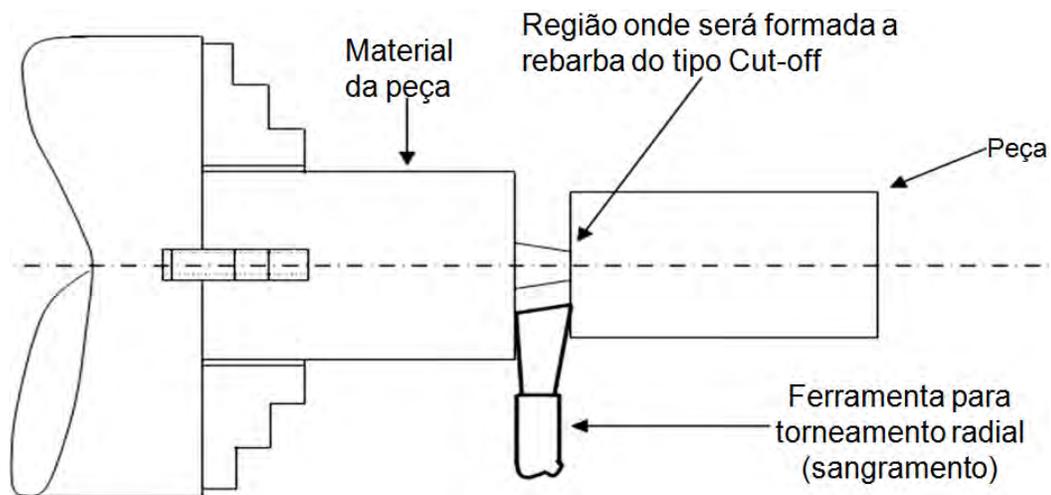


Figura 2.17 – Formação da rebarba do tipo *Cut-off*, (GILLESPIE; BLOTTER, 1976)

2.7.2 - Classificação das rebarbas quanto à borda de formação no fresamento

As rebarbas formadas nas bordas das peças fresadas foram investigadas e apresentadas por Gillespie (1975 e 1976). Também foi analisada a influência dos parâmetros de usinagem, nas suas dimensões e definido os mecanismos de formação das mesmas. A identificação das rebarbas na sua referida borda é mostrada nas Figs. 2.18a, 2.18b e 2.18c.

A Tab. 2.3 relaciona a classificação da rebarba, proposta por Gillespie e Blotter (1976), o seu mecanismo de formação e o tipo da rebarba formada na borda, dependendo da operação de fresamento.

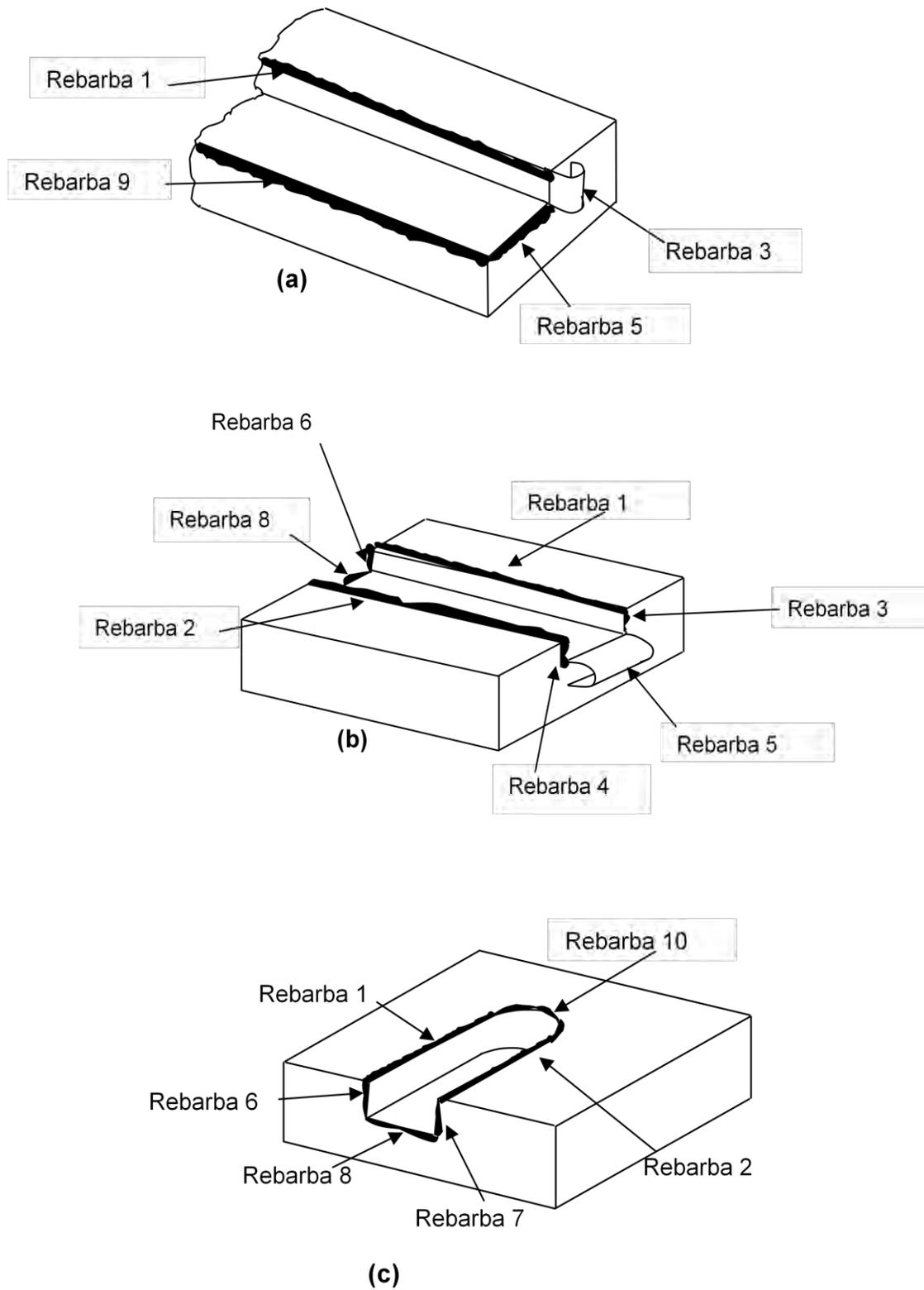


Figura 2.18 - Tipos de rebarbas formadas no fresamento. a) - fresamento de faceamento, b) - fresamento tangencial discordante e c) - fresamento de topo (GILLESPIE 1975 e 1976)

Tabela 2.3 - Classificação e o tipo de rebarba, com seu respectivo mecanismo de formação

| Classificação rebarba | Tipo de operação no fresamento. | Mecanismo de formação e tipo de rebarba. |
|-----------------------|---|--|
| Rebarba 1 | Fresamento tangencial discordante. A rebarba aparece no topo da borda. | Assemelha-se ao mecanismo do tipo <i>Tear</i> . Rebarba de saída. |
| | Fresamento tangencial concordante. A rebarba aparece no topo da borda. | Assemelha-se ao mecanismo do tipo <i>Poisson</i> . Rebarba de entrada. |
| | Fresamento frontal de topo. A rebarba sempre aparece no topo da borda. | Poderá ter mecanismos do tipo <i>Tear</i> ou <i>Poisson</i> dependendo da rotação da fresa, podendo ser rebarba de entrada ou de saída. |
| | Fresamento frontal de faceamento. A rebarba sempre aparece no topo da borda. | Poderá ter mecanismos do tipo <i>Tear</i> ou <i>Poisson</i> dependendo da rotação da fresa, podendo ser, da mesma forma, rebarba de entrada ou de saída. |
| Rebarba 2 | Fresamento tangencial discordante. A rebarba aparece no topo da borda. | Assemelha-se à rebarba 1. |
| | Fresamento tangencial concordante. A rebarba aparece no topo da borda. | Assemelha-se à rebarba 1. |
| | Fresamento frontal de topo. A rebarba sempre aparece no topo da borda. | Poderá ter mecanismos do tipo <i>Tear</i> ou <i>Poisson</i> dependendo da rotação da fresa, podendo ser, da mesma forma, rebarba de entrada ou de saída |
| | Fresamento frontal de faceamento. Não aparece. | Não será formado rebarba do tipo 2. |

| | | |
|-----------|---|--|
| Rebarba 3 | Fresamento tangencial discordante. A rebarba aparece na borda lateral vertical. | Assemelha-se ao mecanismo do tipo <i>Tear</i> . Rebarba de saída. |
| | Fresamento tangencial concordante. A rebarba aparece na borda lateral vertical. | Assemelha-se ao mecanismo do tipo <i>Poisson</i> . Rebarba de entrada. |
| | Fresamento frontal de topo. Não aparece. | Não será formado rebarba do tipo 3. |
| | Fresamento frontal de faceamento. A rebarba aparece na borda lateral vertical. | Assemelha-se ao mecanismo do tipo <i>Rollover</i> . Rebarba de saída. |
| Rebarba 4 | Fresamento tangencial discordante. A rebarba aparece na borda lateral vertical. | Assemelha-se a rebarba 3. |
| | Fresamento tangencial concordante. A rebarba aparece na borda lateral vertical. | Assemelha-se a rebarba 3. |
| | Fresamento frontal de topo. Não aparece. | Não será formado rebarba do tipo 4. |
| | Fresamento frontal de faceamento. Não aparece. | Não será formado rebarba do tipo 4. |
| | Fresamento tangencial discordante. A rebarba aparece na borda central transversal. | Assemelha-se ao mecanismo do tipo <i>Rollover</i> . Rebarba de saída. |

| | | |
|-----------|---|---|
| Rebarba 5 | Fresamento tangencial concordante. A rebarba aparece na borda central transversal. | Poderá ter mecanismos do tipo <i>Poisson</i> . Rebarba de entrada. |
| | Fresamento frontal de topo. Não aparece. | Não será formado rebarba do tipo 5. |
| | Fresamento frontal de faceamento. A rebarba aparece na borda central transversal. | Poderá ter mecanismos do tipo <i>Tear</i> ou <i>Poisson</i> dependendo da rotação da fresa. Rebarba de saída. |
| Rebarba 6 | Fresamento tangencial discordante. A rebarba aparece na borda lateral vertical. | Poderá ter mecanismos do tipo <i>Poisson</i> <i>Rebarba</i> de entrada. |
| | Fresamento tangencial concordante. A rebarba aparece na borda lateral vertical. | Poderá ter mecanismos do tipo <i>Tear</i> . Rebarba de saída. |
| | Fresamento frontal de topo. A rebarba aparece na borda lateral vertical. | Poderá ter mecanismos do tipo <i>Tear</i> ou <i>Poisson</i> dependendo da rotação da fresa, podendo ser, da mesma forma rebarba de entrada ou de saída. |
| | Fresamento frontal de faceamento. A rebarba aparece na borda lateral vertical. | Poderá ter mecanismos do tipo <i>Tear</i> ou <i>Poisson</i> dependendo da rotação da fresa, podendo ser, da mesma forma rebarba de entrada ou de saída. |
| | Fresamento tangencial discordante. A rebarba aparece na borda lateral vertical. | Assemelha-se a rebarba 6. |
| | Fresamento tangencial concordante. | Assemelha-se a rebarba 6. |

| | | |
|-----------|---|--|
| Rebarba 7 | A rebarba aparece na borda lateral vertical. | |
| | Fresamento frontal de topo. A rebarba aparece na borda lateral vertical. | Assemelha-se à rebarba 6. |
| | Fresamento frontal de faceamento. Não aparece. | Não será formado rebarba do tipo 7. |
| Rebarba 8 | Fresamento tangencial discordante. A rebarba aparece na borda central transversal. | Assemelha se ao mecanismo de <i>Poisson</i> . Rebarba de entrada. |
| | Fresamento tangencial concordante. A rebarba aparece na borda central transversal. | Poderá ter mecanismos do tipo <i>Tear</i> e <i>Rollover</i> ao mesmo tempo, rebarba de saída. |
| | Fresamento frontal de topo. A rebarba aparece na borda central transversal. | Será formada dois tipos de rebarbas. Dependendo do sentido da rotação da fresa, na metade da borda têm o mecanismo do tipo <i>Poisson</i> , enquanto que na outra metade predomina-se o mecanismo do tipo <i>Tear</i> , pode ser rebarba de entrada ou de saída. |
| | Fresamento frontal de faceamento. A rebarba aparece na borda transversal. | Poderá ter mecanismos do tipo <i>Poisson</i> ou do tipo <i>Tear</i> dependendo do sentido de rotação da fresa, será formada rebarba de entrada ou de saída. |
| | Fresamento tangencial discordante. Não aparece. | Não será formado rebarba do tipo 9. |
| | Fresamento tangencial concordante. Não aparece. | Não será formado rebarba do tipo 9. |

| | | |
|------------|--|--|
| Rebarba 9 | Fresamento frontal de topo. Não aparece. | Não será formado rebarba do tipo 9. |
| | Fresamento frontal de faceamento. Aparece na borda lateral. | Poderá ter mecanismos do tipo <i>Tear</i> ou <i>Poisson</i> dependendo da rotação da fresa, será formada rebarba de entrada ou de saída. |
| Rebarba 10 | Fresamento tangencial discordante. Não aparece. | Não será formada rebarba do tipo 10. |
| | Fresamento tangencial concordante. Não aparece. | Não será formada rebarba do tipo 10. |
| | Fresamento frontal de topo. Aparece na borda de topo. | É uma rebarba formada pelo mecanismo do tipo <i>Tear</i> em conjunto o mecanismo de <i>Poisson</i> , a metade da borda é formada por rebarba de saída enquanto que a outra metade será formada por rebarba de entrada. |
| | Fresamento frontal de faceamento. Não aparece. | Não será formada rebarba do tipo 10. |

2.7.3 - Classificação da rebarba em função da direção da aresta de corte e da direção da deformação do material.

A classificação das rebarbas proposta por Nakayama e Arai (1987) envolve a combinação entre a direção da aresta de corte em questão e a direção da deformação, formadora da rebarba, no movimento da ferramenta. Nesta classificação, torna-se necessário conhecer os processos de usinagem e a geometria das ferramentas de corte. A Fig. 2.19 mostra o processo de usinagem e respectiva borda da peça com a rebarba formada.

Inicialmente as rebarbas foram identificadas e classificadas pela aresta principal de corte, pela aresta secundária de corte e pela aresta transversal. Também foram identificadas e classificadas como rebarbas de entrada, rebarbas laterais, rebarbas de saída e rebarbas

inclinadas na direção do avanço. Como representações simbólicas das rebarbas foram utilizadas letras. A Tab. 2.4 apresenta o critério de identificação e a sua respectiva representação simbólica.

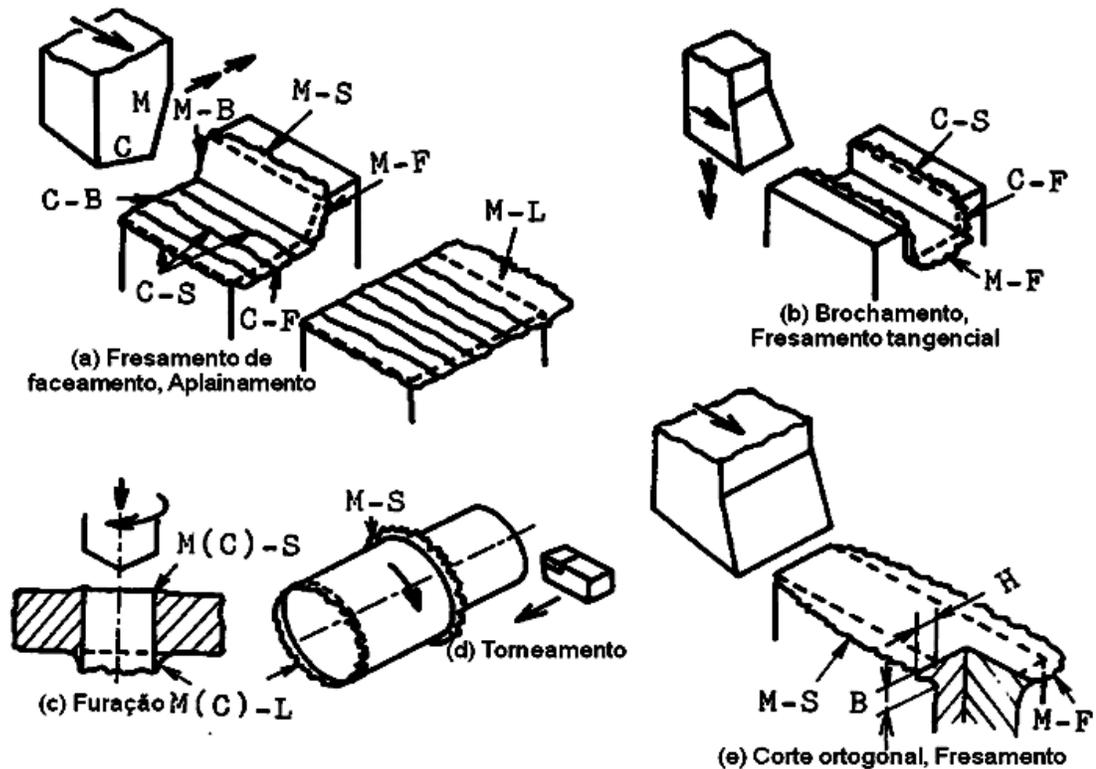


Figura 2.19 - Tipos de rebarba formada em função do processo de usinagem, conforme Nakayama e Arai (1987)

Tabela 2.4 - Classificação das rebarbas e suas representações, conforme Nakayama e Arai (1987)

| | Critério de identificação das rebarbas | Representação |
|----|---|---------------|
| 1) | Função da aresta de corte diretamente envolvida | |
| | Aresta principal de corte | M |
| | Aresta secundária de corte | C |
| 2) | Decorrente da forma e direção de formação | |
| | Rebarba de entrada | B |
| | Rebarba lateral | S |
| | Rebarba de saída | F |
| | De inclinação ou rebarba inclinada | L |

2.7.4 - Classificação da rebarba quanto a sua dimensão, na borda de saída da peça

Esse tipo de classificação foi elaborado por Kishimoto et al. (1981). Ela prevê a dimensão da rebarba na borda de saída da peça. No fresamento de faceamento, a classificação depende da geometria de saída da ferramenta de corte, da profundidade de corte e do raio de arredondamento do inserto. A geometria de saída da ferramenta envolve o ângulo formado pela borda de saída, onde será formada a rebarba e a direção da velocidade de corte.

Essa classificação prevê o aparecimento de dois níveis de rebarbas, sendo elas a rebarba primária e a rebarba secundária. A dimensão das mesmas depende da atuação das duas arestas de corte da fresa. A Fig. 2.20 mostra a aresta principal e secundária da fresa.

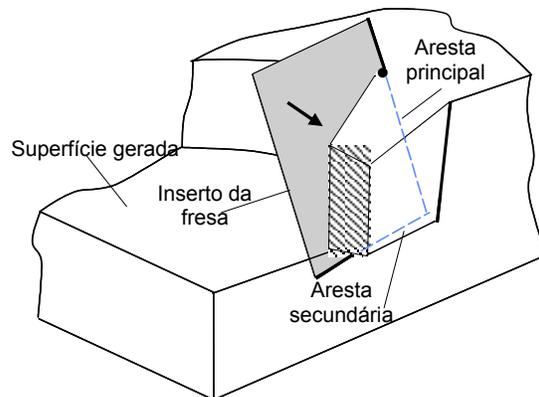


Figura 2.20 - Identificação das arestas principal e secundária no fresamento de faceamento

Durante o fresamento de faceamento a profundidade de corte define qual aresta de corte tem maior atuação na formação do cavaco. Essa intervenção da profundidade de corte na aresta da ferramenta irá determinar o tipo da rebarba, se primária ou secundária.

A rebarba em questão é a mesma rebarba 5 ou 9, da Fig. 2.18a. A rebarba 9 terá altura constante em toda extensão da borda, pois o ângulo formado pela borda de saída e a direção da velocidade de corte não sofre alterações. Quanto a rebarba 5, essa tem altura variável, uma vez de o ângulo formado pela borda de saída, e a direção da velocidade de corte é alterado desde a chegada da ferramenta à borda até a sua saída.

Devido a grande importância da rebarba 9 nos processos de usinagem, observou-se que é possível reduzi-la a valores mínimos. O aumento da profundidade de corte é o grande responsável por esse fato, transformando a rebarba primária em rebarba secundária. A Fig. 2.21 mostra um gráfico que relaciona a profundidade de corte com o tipo da rebarba, se primária ou secundária.

Nota-se que existe uma região de transição onde torna-se impossível afirmar o tipo de rebarba formada. Para esse intervalo as profundidades de corte são chamadas de profundidade de transição.

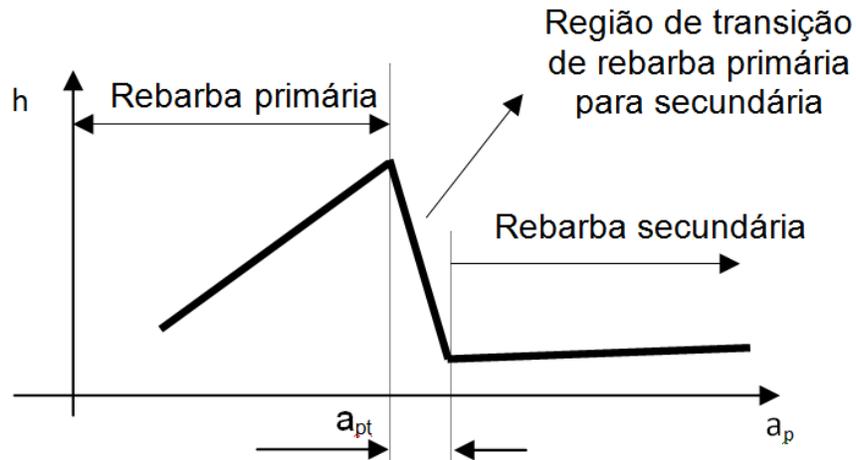


Figura 2.21- Transição da rebarba primária para rebarba secundária

2.7.5 - Classificação da rebarba em função da geometria de saída da ferramenta de corte no processo de fresamento

Devido à grande importância do processo de fresamento, várias propostas de classificação da rebarba gerada por esse processo apareceram. A classificação da rebarba em função da geometria de saída da ferramenta de corte (relação entre borda da peça e a aresta da ferramenta corte) foi apresentada por Hashimura et al (1999a). Segundo estes autores, três fatores determinam a classificação da rebarba. São eles: sua localização, a sua forma e o mecanismo de formação.

Em função da localização na borda da peça elas são identificadas por rebarba de saída, rebarba lateral e rebarba de topo. A rebarba de entrada não desperta grandes interesses, uma vez que apresenta dimensões reduzidas.

A identificação da rebarba em função da localização é completada a partir do envolvimento da aresta da ferramenta de corte na formação do cavaco. A ordem de saída da aresta de corte é de grande importância na classificação e na dimensão das rebarbas. A Fig. 2.22 mostra duas ordens de saída da aresta e o provável local de formação da rebarba.

O tipo da rebarba pode ser observado de forma macroscópica e microscópica. A Tab. 2.5 mostra a classificação completa da rebarba no fresamento, conforme Hashimura et al (1999a). As superfícies e os nomes das rebarbas citadas na classificação podem ser vistos na Fig. 2.23.

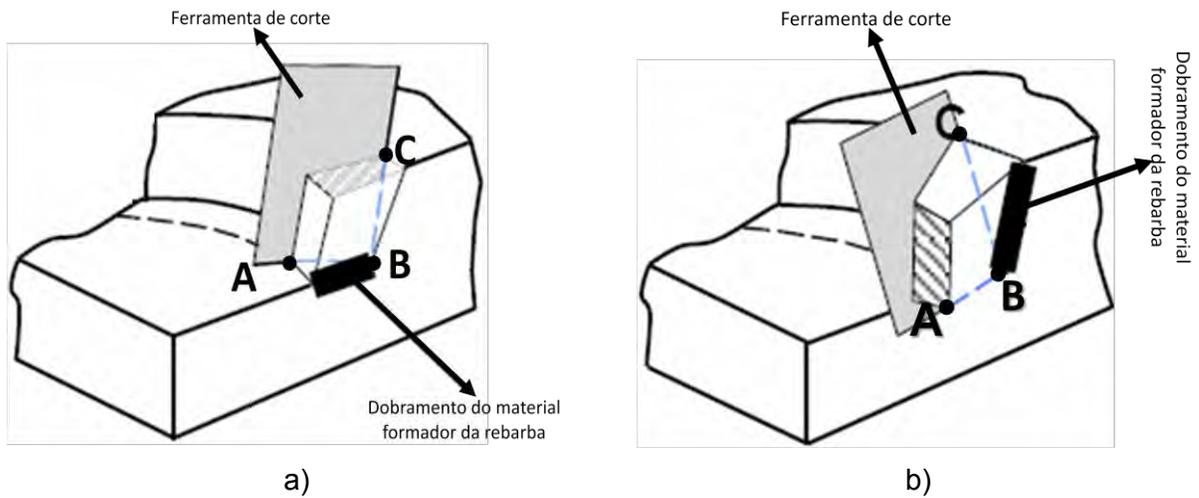


Figura 2.22 - Local de formação da rebarba na peça. a) Ordem de saída BCA, b) Ordem de saída ABC

Tabela 2.5 - Classificação das rebarbas formadas no processo de fresamento, conforme Hashimura et al (1999a)

| Localização | | Tipo | |
|--|------------------|----------------------------|--|
| Superfície | Nome | Forma (vista macroscópica) | Mecanismo (vista microscópica) |
| Sup. usinada (Rebarba gerada pela menor aresta de corte) | Rebarba de saída | Descontínua | Dúctil mais Frágil (DF) Frágil mais Dúctil (FD) Frágil (F) |
| | | Contínua | Completamente Dúctil (DC) |
| Sup. de Transição (Rebarba gerada pela maior aresta de corte) | Rebarba lateral | Descontínua | |
| | | Espiral | |
| | | Contínua | |
| Sup. de Topo | Rebarba de topo | Descontínua | |
| | | Cilíndrica/áspera | |
| | | Longitudinal | |

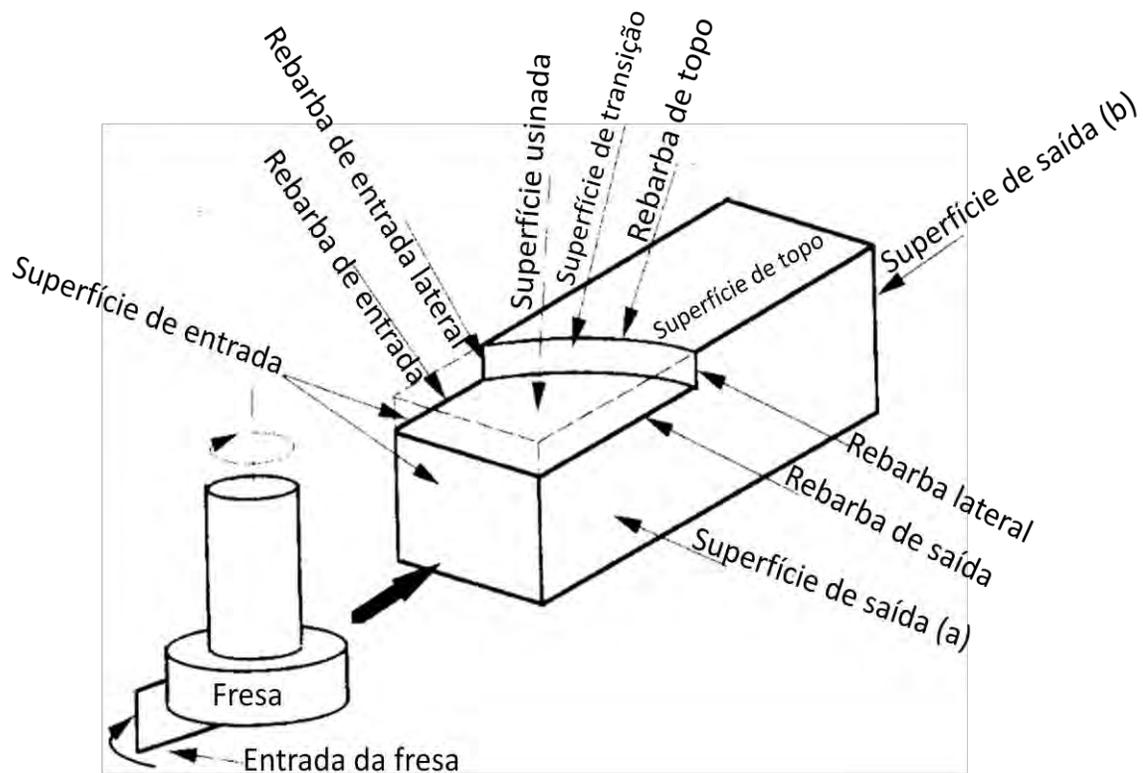


Figura 2.23 - Localização das rebarbas e superfícies utilizadas na classificação, (HASHIMURA *et al.*, 1999a)

2.7.6 - Classificação da rebarba pela sua forma geométrica quando da saída da broca, no processo de furação.

A classificação da rebarba no processo de furação foi apresentada por Kim *et al.*, (2000). Devido à grande importância e elevada aplicação, as rebarbas formadas na furação são exaustivamente investigadas. O processo de formação e suas dimensões dependem de parâmetros como materiais a ser usinado, geometria da ferramenta e, principalmente, da forma de execução da furação.

Basicamente duas formas de execução da furação para furo passante são destacadas:

- Furação em cheio,
- Furação com pré-furo.

Merecem destaques às rebarbas formadas na superfície de saída, enquanto que aquelas formadas na superfície de entrada são de pequenas dimensões e não trazem maiores

problemas. As rebarbas formadas na superfície de saída resultam em três tipos diferentes, classificadas em função da sua geometria e dimensão, conforme mostrado na Tab. 2.6.

As rebarbas do tipo I, com aspecto uniforme, com ou sem calota, são consideradas rebarbas de pequenas dimensões, enquanto as do tipo III, denominadas de Coroa, são consideradas grandes e de altura irregular. A Fig. 2.24 mostra a formação dos três tipos de rebarbas. As fotos das Fig. 2.25 apresentam, de forma clara, os três tipos de rebarbas existentes no processo de furação.

Tabela 2.6 - Classificação das rebarbas no processo de furação (KIM *et al.*, 2000)

| Tipos de rebarbas | Tipo I | Tipo II | Tipo III |
|-------------------|----------------------------|------------|----------|
| | Uniforme com ou sem calota | Transiente | Coroa |

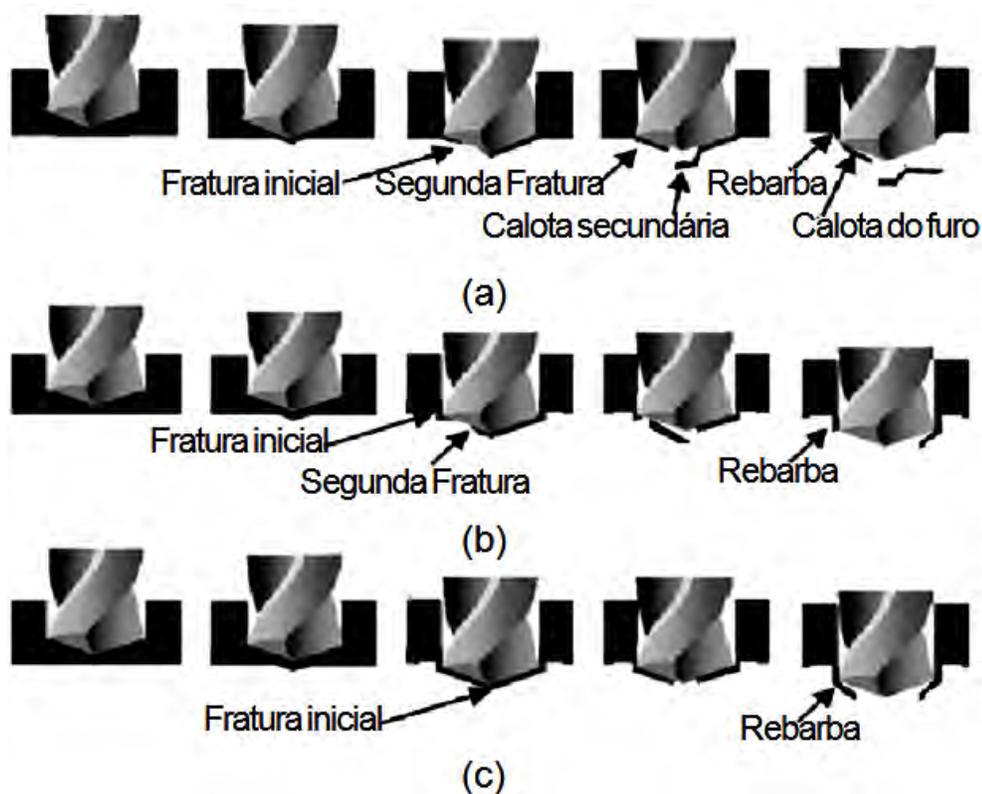


Figura 2.24 - Etapas de formação das rebarbas na furação (a) rebarba uniforme, (b) rebarba Transiente e (c) coroa (KIM *et al.*, 2000)

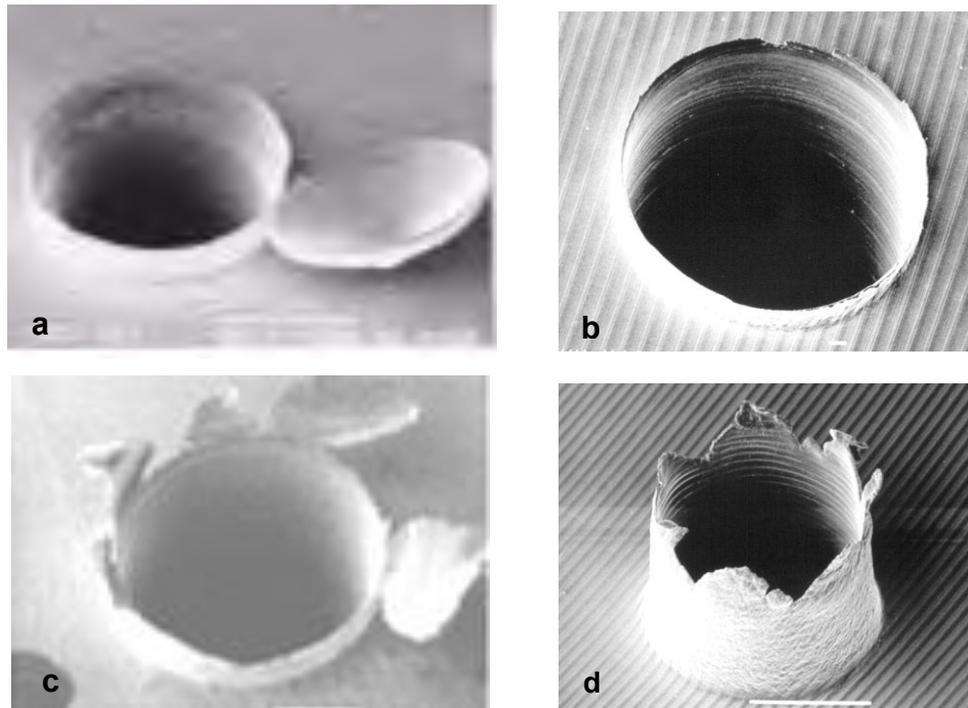


Figura 2.25 - Tipos de rebarbas no processo de furação. a) Tipo I - Uniforme com Calota, b) Tipo I - uniforme sem Calota, c) Tipo II - transiente, d) Tipo III - Coroa (KIM et.al., 2000)

2.7.7 - Classificação da rebarba conforme a sua morfologia

A classificação da rebarba a partir da sua morfologia foi apresentada por Chern em 1993. A mesma prevê aparecimento de três tipos diferentes para as rebarbas primárias, sendo elas a rebarba do tipo faca, tipo onda e do tipo caracol. A Fig. 2.26 mostra os três tipos. O surgimento destas rebarbas foi notado durante o fresamento de faceamento das ligas de alumínio Al 1100, Al 2024-T4 e Al 6061-T6. Foi manipulado, principalmente, o ângulo de saída da peça e a profundidade de corte.

A rebarba do tipo faca apresenta-se com altura constante e a sua espessura é muito menor, quando comparada com sua altura. Descreve-se a sua formação como sendo um processo onde o material do cavaco irá acumular, de forma parcial, na borda de saída da peça. Esse acúmulo é de responsabilidade da superfície de folga da ferramenta de corte que promove o rolamento do referido material a cada passada (Avila e Dornefeld, 2004a).

Acredita-se que o mecanismo de formação da rebarba do tipo onda, assemelha-se ao da rebarba do tipo faca. A característica do seu perfil é de responsabilidade da deformação plástica que causa o seu alongamento. Sendo o comprimento do material deformado, no caso a

rebarba, maior que a borda da peça, esse será forçado a tomar a forma de uma onda para que se possa acomodar em um espaço menor disponível (LIN, 1999).

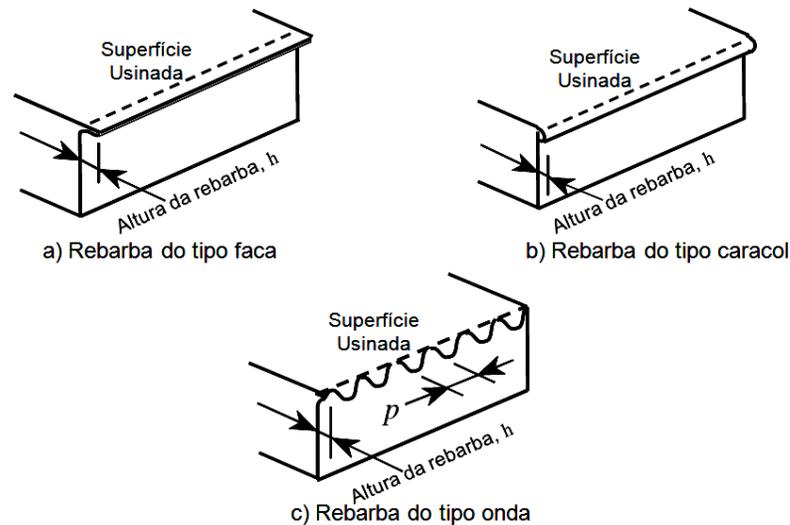


Figura 2.26 – Morfologia das rebarbas primárias. a) – Rebarba do tipo faca, b) – Rebarba do tipo caracol e c) – rebarba do tipo onda. [Adaptado de Chern (1993)]

Variáveis como o ângulo de saída da peça, profundidade de corte, dentre outras menos influentes, definem o tipo da morfologia da rebarba gerada na borda da peça. Chern (2006b), durante o fresamento de faceamento da liga Al 1100 verificou uma considerável dependência da morfologia da rebarba em relação ao ângulo de saída da peça, conforme é mostrado na Fig. 2.27. Para a obtenção dos referidos resultados utilizou-se as seguintes condições: $V_c = 149$ m/min; $a_p = 0,78$ mm e $f_z = 0,03$ mm/z.

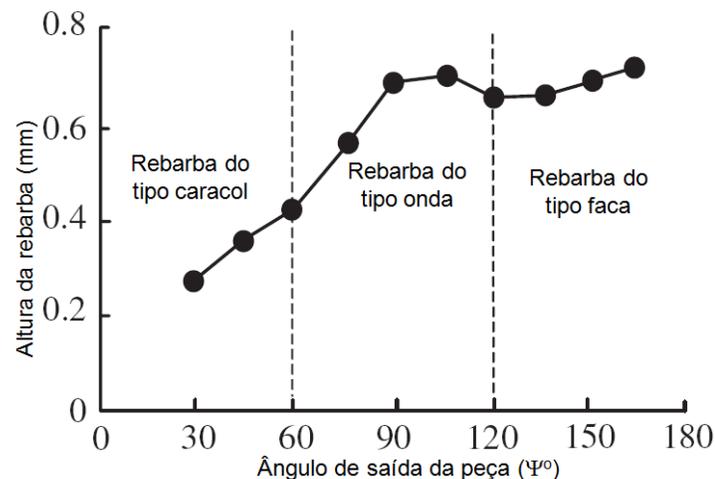
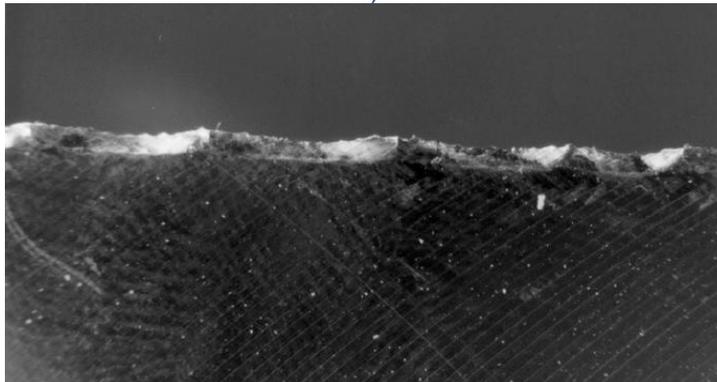


Figura 2.27 – Morfologia e altura da rebarba em função do ângulo de saída da peça (CHERN, 2006b)

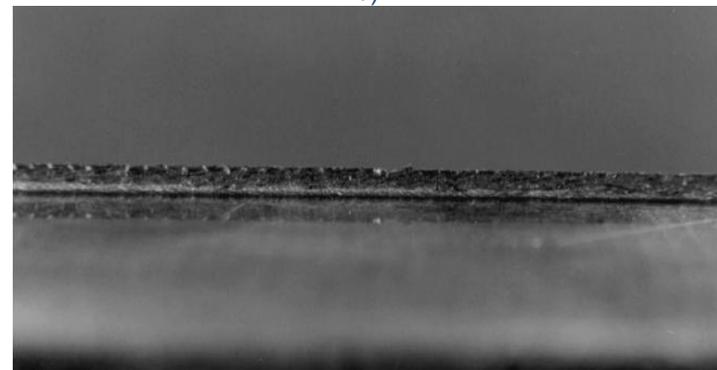
Nesta figura observam-se três intervalos diferentes para o ângulo de saída da peça. Em cada um destes intervalos formou-se rebarbas com morfologias diferentes. A imagem das três morfologias das rebarbas aparece nas imagens da Fig. 2.28. A rebarba com morfologia do tipo caracol, Fig. 2.28a, ocorreu em condições onde o ângulo de saída da peça ficou entre 0 e 60°. Nas condições em que o ângulo de saída ficou entre 60 a 120°, formou-se rebarbas maiores com morfologia do tipo onda, mostrada na Fig.2.28b. Rebarbas com morfologia do tipo faca, na Fig. 2.28c, foram formadas no intervalo onde o ângulo de saída da peça ficou entre 120 a 180°.



a)



b)



c)

Figura 2.28 – Tipos de morfologia das rebarbas. a) – Rebarba do tipo caracol, b) – Rebarba do tipo onda e c) – Rebarba do tipo faca (LIN, 1999)

2.8 - Propriedades das rebarbas

O endurecimento superficial de um material metálico reduz a sua capacidade de deformar plasticamente. Esta redução irá influenciar as dimensões da rebarba, promovendo a sua diminuição ou até mesmo evitando a sua formação (GILLESPIE, 1999).

Dependendo da necessidade, os processos de endurecimento de uma superfície metálica podem ser: por tratamento térmico, trabalho mecânico a frio, tratamento químico entre outros.

Pesquisas têm mostrado que no tratamento químico, utilizando o mercúrio líquido, ocorre a melhora da usinagem e pode reduzir as dimensões da rebarba, pois esse tratamento elimina a superfície dúctil do material e auxilia na fratura do cavaco (GILLESPIE, 1999).

Montagens ou arranjos experimentais envolvendo materiais com durezas diferentes proporcionam redução da rebarba. A peça a ser produzida, terá a deformação da sua na borda reduzida. Da mesma forma o material de sacrifício ou auxiliar, também terá as dimensões da sua rebarba reduzida. O gráfico da Fig. 2.29 mostra a relação entre as dimensões da rebarba e a dureza do material, no caso o auxiliar.

Os arranjos intercalando materiais de diferentes durezas são utilizados nos diversos processos de usinagem. O desenho da Fig. 2.30 mostra o um arranjo para a minimização da rebarba no fresamento de engrenagens.

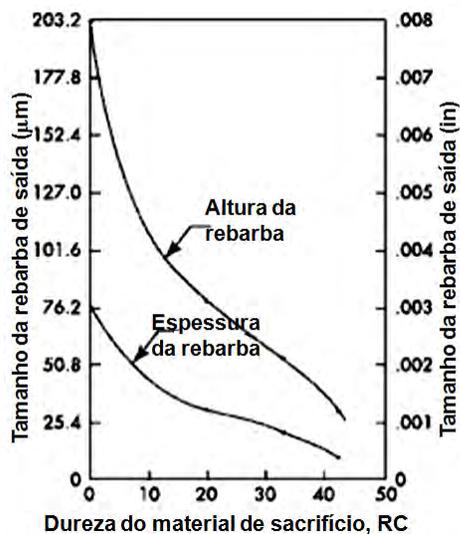


Figura 2.29 - Efeito da dureza do material auxiliar na altura da rebarba (GILLESPIE, 1999)

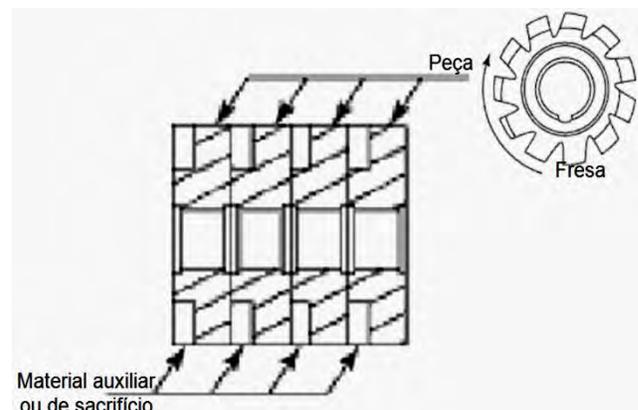


Figura 2.30 - Arranjo para a redução da rebarba através da diferença da dureza (GILLESPIE, 1999)

As dimensões das rebarbas dependem consideravelmente do trabalho mecânico em que o material da peça foi exposto. O grau de encruamento ou do recozimento do material poderá influenciar significativamente no volume da rebarba.

Para casos onde o material tem elevado grau de encruamento, durante a usinagem, a operação da ferramenta de corte promove um deslocamento do material com perfil externo, chamado de *piling up*. A rebarba formada, neste caso terá um perfil semelhante ao mostrado na Fig. 2.31a, (GILLESPIE; BLOTTER, 1976).

Para materiais considerados recozidos, nota-se a presença de uma deformação com perfil interno, sendo esta conhecida por *sinking in*. A Fig. 2.31b mostra a formação da referida rebarba (GILLESPIE E BLOTTER , 1976).

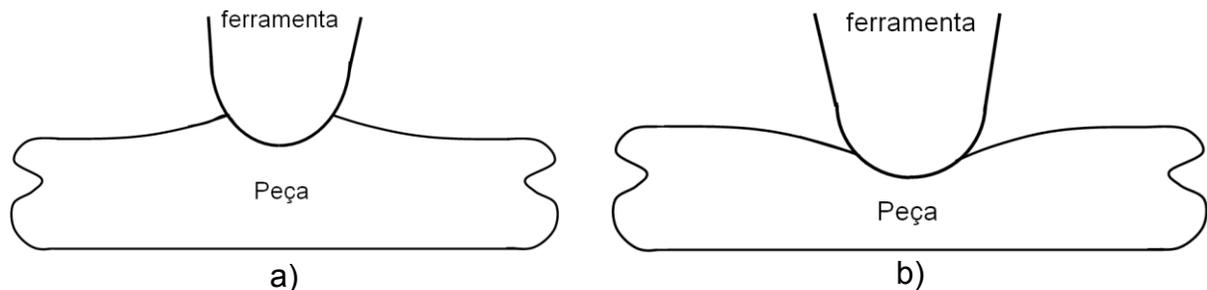


Figura 2.31 - Deformação do material. a) - Para materiais encruados b) - Para materiais recozidos (GILLESPIE E BLOTTER , 1976)

2.9 - O efeito do material da peça na formação da rebarba

Durante o processo de usinagem é de fundamental importância conhecer as propriedades mecânicas do material a ser trabalhado, pois delas dependem não só os parâmetros de usinagem, mas também será possível prever a qualidade geométrica das bordas de saídas das peças.

A ductilidade e a fragilidade são propriedades mecânicas que interferem de forma significativa na dimensão e geometria das rebarbas.

Durante o processo de usinagem, a trinca formadora do cavaco inicia-se na ponta da ferramenta de corte, na zona de cisalhamento primária, a sua propagação irá depender da

deformação crítica à fratura (ϵ_f) que por sua vez irá depender das propriedades do material, se dúctil ou frágil.

A máxima deformação plástica que o material suporta antes que ocorra a fratura é chamada de deformação crítica à fratura (ϵ_f). A geometria da borda da peça dependerá então da relação entre a deformação plástica do material (ϵ_A) e a (ϵ_f).

2.9.1 - Formação da rebarba em materiais dúcteis

Durante o processo de corte os materiais sofrem uma deformação (ϵ_A). Para que haja a ruptura esta deformação deve atingir um valor crítico (ϵ_f), que depende das propriedades dos materiais da peça.

Os materiais dúcteis, quando usinados, são grandes formadores de rebarbas. Isto acontece porque a deformação crítica (ϵ_f) desses materiais é elevada, significando que as deformações necessárias para promover a ruptura raramente são atingidas, ou seja, $\epsilon_f > \epsilon_A$.

A trinca iniciada na ponta da ferramenta, letra **F** da Fig. 2.32a, tende a se propagar na direção do plano de cisalhamento primário. Devido ao deslocamento da ferramenta e à grande deformação na borda da peça, o cavaco, ou parte dele, ficará solidário à peça, conforme mostrado na Fig. 2.32b.

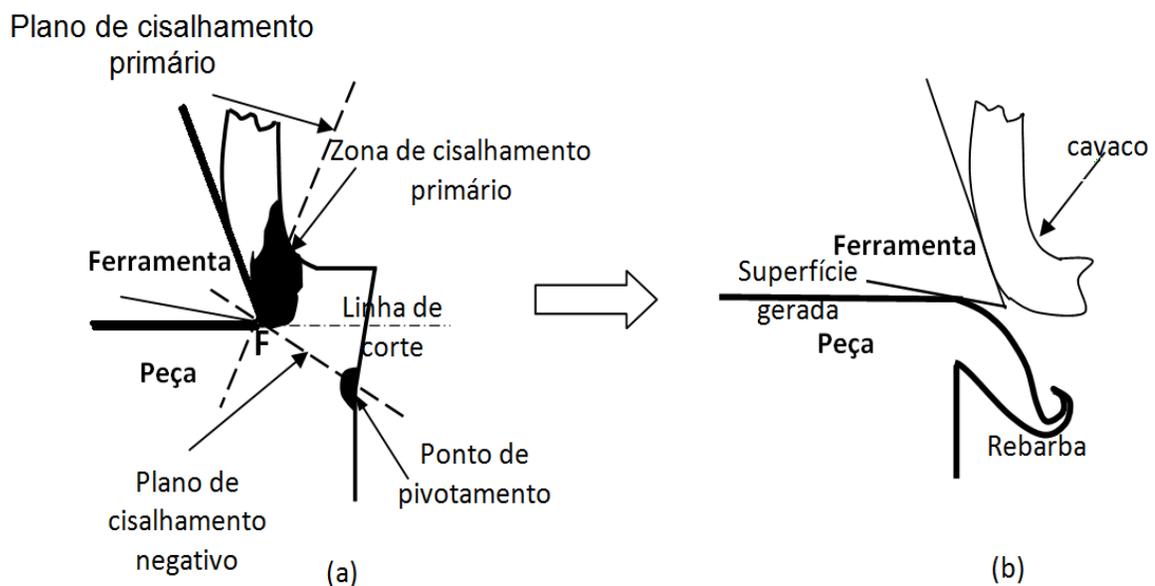


Figura 2.32 - Formação da rebarba em materiais dúcteis. a) - Identificação dos elementos formadores da rebarba b) - Destacamento do cavaco e formação da rebarba

Shefelbine e Dornfeld (2004) observaram o aumento da rebarba no processo de fresamento a seco de uma liga de Al-Si. Durante a usinagem a temperatura foi aumentada, elevando de forma considerável a ductilidade do material. Em consequência disto, o aumento na altura e na espessura da rebarba foi claramente notado por eles.

2.9.2 - Formação da rebarba em materiais frágeis

Até a etapa de iniciação da rebarba, isto é, até a posição em que a ferramenta se encontra conforme Fig. 2.32a, o material frágil irá se comportar de maneira similar aos materiais dúcteis. A trinca inicia na ponta da ferramenta, na zona de cisalhamento primária. A sua propagação caminha no sentido do ponto de pivotamento, sobre o plano de cisalhamento negativo. Isto acontece devido a pequena tensão de deformação crítica à fratura que os materiais frágeis suportam. Sendo a tensão na zona de cisalhamento negativa maior que a tensão de deformação crítica a fratura suportada pelo material, o cavaco será separado da peça (ruptura) acima da zona de cisalhamento negativa, formando o *Breakout*.

FORMAÇÃO DO *BREAKOUT*

A grande quantidade de tensões e deformações, geradas no corte contínuo, concentram-se nas zonas de cisalhamento primárias e secundárias. Com a aproximação da ferramenta de corte à borda da peça, essas tensões e deformações atingem a zona de cisalhamento negativa.

As tensões suportadas na zona de cisalhamento negativa são menores que aquelas das zonas de cisalhamento primária e secundária, e seu comportamento foi intensamente pesquisado por Pekelharing (1978) em trabalhos sobre a formação das trincas de origem mecânica, quando na saída da ferramenta da peça, no corte interrompido.

Quando a deformação plástica do material (ε_A), na ponta da ferramenta, representado pela letra **F** da Fig. 2.32a, for superior a deformação crítica à fratura (ε_f), ou seja $\varepsilon_A > \varepsilon_f$, acontecerá a formação do *breakout*, também chamado de rebarba negativa.

A possibilidade de evitar a formação do *breakout* está também diretamente ligada à geometria da peça a ser usinada. Schäfer (1975), citado por Gillespie, (1999), analisou o comportamento da rebarba e do *breakout* com a variação do ângulo de inclinação da superfície livre da peça (φ_s), sendo este ângulo, medido na peça, entre a superfície gerada pela usinagem e a superfície livre da peça, perpendicular à direção do avanço, conforme mostra a Fig. 2.33(a)

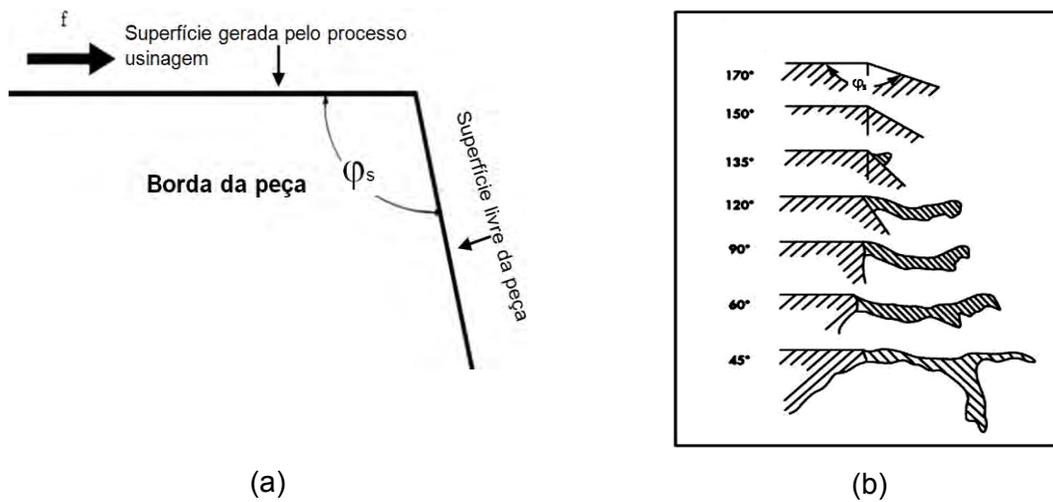


Figura 2.33 - Ângulo de inclinação da superfície de saída da peça (φ_s). a) - Identificação do ângulo (φ_s), b) - Efeito do ângulo de inclinação da superfície de saída da peça no tamanho da rebarba (SCHÄFER, 1975 citado por GILLESPIE, 1999)

No fresamento do aço, com baixa porcentagem de carbono, Schäfer (1975) notou a redução no tamanho da rebarba quando o ângulo φ_s foi aumentado. Conforme mostra a Fig. 2.33(b), ângulos maiores que 150° não ocorreu à formação da rebarba.

Chern e Dornfeld (1996) analisaram a formação da rebarba e do *breakout* no corte ortogonal dos alumínio 2024-T4 e 6061-T6 e do cobre. Durante os ensaios, os ângulos de inclinação da superfície (livre) de saída da peça (φ_s) foram variados, conforme mostra a Fig. 2.34.

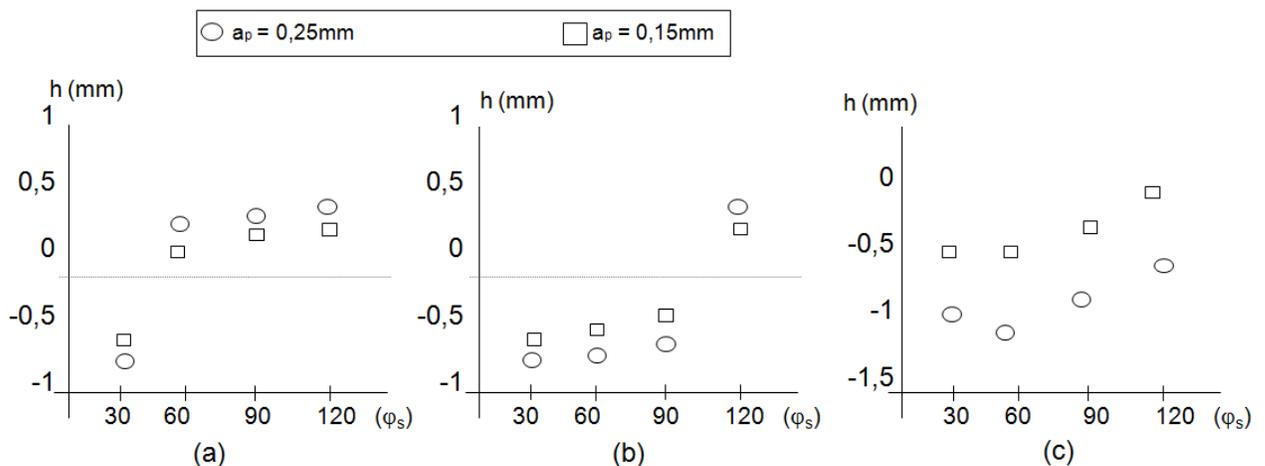


Figura 2.34 - Influência do φ_s na formação da rebarba negativa para os seguintes materiais: (a) - cobre, (b) - alumínio 6061-T6 e (c) - alumínio 2024 -T4 (CHERN; DORNFELD, 1996)

Pequenos valores de φ_s produzem pequenos planos de cisalhamento negativos (a partir do ponto **F** da Fig. 2.32a). As deformações ultrapassam o valor de ε_f , gerando uma rebarba negativa. As Figs. 2.34(a), (b), e (c) mostram a influência deste ângulo φ_s nas dimensões da rebarba. Aumentando-se os valores de φ_s , as deformações na ponta da ferramenta reduzirão, podendo não mais atingir o valor ε_f , nem o aparecimento da fratura. Para o cobre, Fig. 2.34(a), quando este ângulo é superior a 60° , já se evita o *breakout*, enquanto para a liga de alumínio 6061-T6 o *breakout* só é evitado para ângulos superiores a 120° Fig. 2.34(b) e para a liga 2024-T4 o *breakout* é observado até mesmo para o ângulo $\varphi_s = 120^\circ$, Fig. 2.34 (c).

Da Silva (2004), durante o fresamento do ferro fundido cinzento do tipo GH190, verificou uma deformação plástica do material maior que a deformação crítica à fratura. A trinca iniciada na ponta da ferramenta de corte, propagou-se na direção da zona de cisalhamento negativa, surgindo o *breakout*. A Fig. 2.35 identifica a formação do *breakout* no FoFo cinzento.

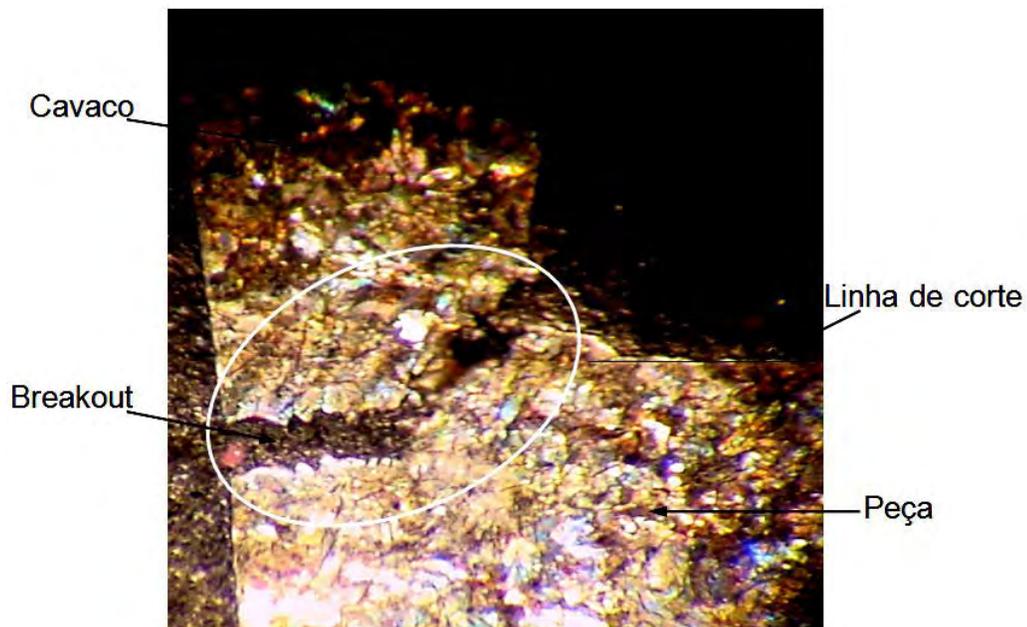


Figura 2.35 - Formação do *breakout* no ferro fundido cinzento

2.10 - O efeito das condições de corte na formação da rebarba

As influências dos parâmetros de corte na formação da rebarba foram e ainda são exaustivamente pesquisados, pois eles estão diretamente ligados a dimensão das mesmas. Fatores como material, geometria da peça, velocidade de corte, avanço, profundidade de corte,

material da ferramenta de corte juntamente com a geometria e o seu estado de afiação e o processo de usinagem podem determinar as dimensões e a morfologia das rebarbas. Os efeitos destes parâmetros sobre a formação da rebarba podem aparecer de forma isolada ou em conjunto.

2.10.1- Fatores geométricos da peça/ferramenta na formação da rebarba

A formação da rebarba pode ser determinada por vários fatores relacionados à geometria peça/ferramenta dentre eles: ângulo de saída/entrada da peça, a seqüência da ordem de saída da aresta de corte, contato radial entre o material e a fresa e condições da penetração de trabalho da fresa no material.

A - Ângulo de saída da peça

O ângulo de saída/entrada da peça (Ψ) tem grande influência na formação das rebarbas. Ele é definido como sendo ângulo entre o vetor velocidade de corte e a borda da peça. O seu vértice encontra-se no ponto onde a ferramenta de corte coincide com a borda da peça, medido no plano de trabalho, mostrado na Fig. 2.36

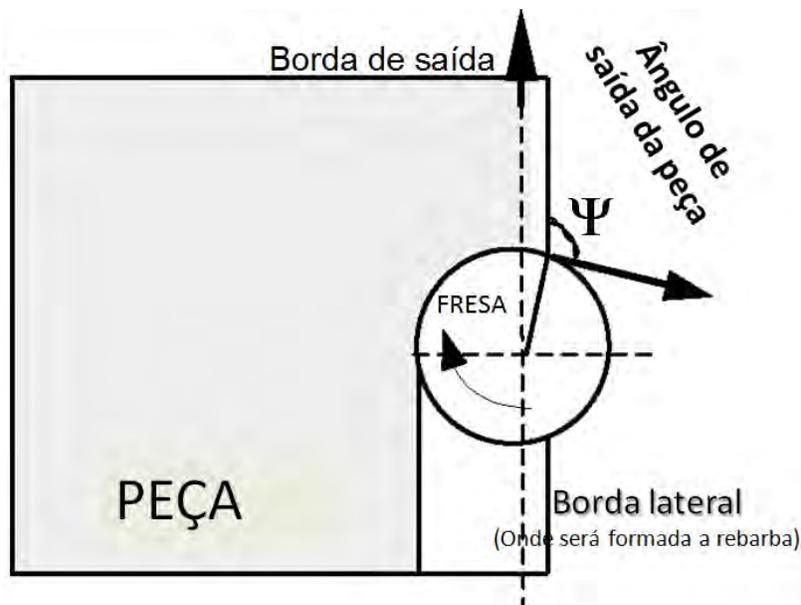


Figura 2.36 - Representação geométrica do ângulo de saída da fresa

Tripathi e Dornfeld (2004) observaram uma grande dependência das dimensões da rebarba em função do ângulo da saída/entrada da peça. A sua altura pode ser reduzida quando utilizado um ângulo Ψ com valores menores que o valor crítico (aproximadamente 120°), para

uma dada condição de corte. Para ângulos menores que 30° a dimensão da rebarba passa a ser desconsiderada.

A rebarba formada na borda de saída, identificada na Fig. 2.36, tem a sua altura variável, pois nesta borda o ângulo Ψ tem o seu valor variável. O mesmo não ocorre com a rebarba formada na borda lateral, identificada na Fig. 2.36, pois o ângulo Ψ tem valor constante em toda extensão da borda. Estas rebarbas foram identificadas por rebarba 5 e rebarba 9 respectivamente, em Gillespie e Blotter (1975).

O gráfico da Fig. 2.37 mostra a altura da rebarba 1 e 9, (GILLESPIE; BLOTTER, 1975) em função do ângulo de saída da fresa, para o fresamento de faceamento do aço AISI 1040. Na figura é possível observar o comportamento da rebarba nas bordas de topo e lateral (OLVERA; BARROW, 1996).

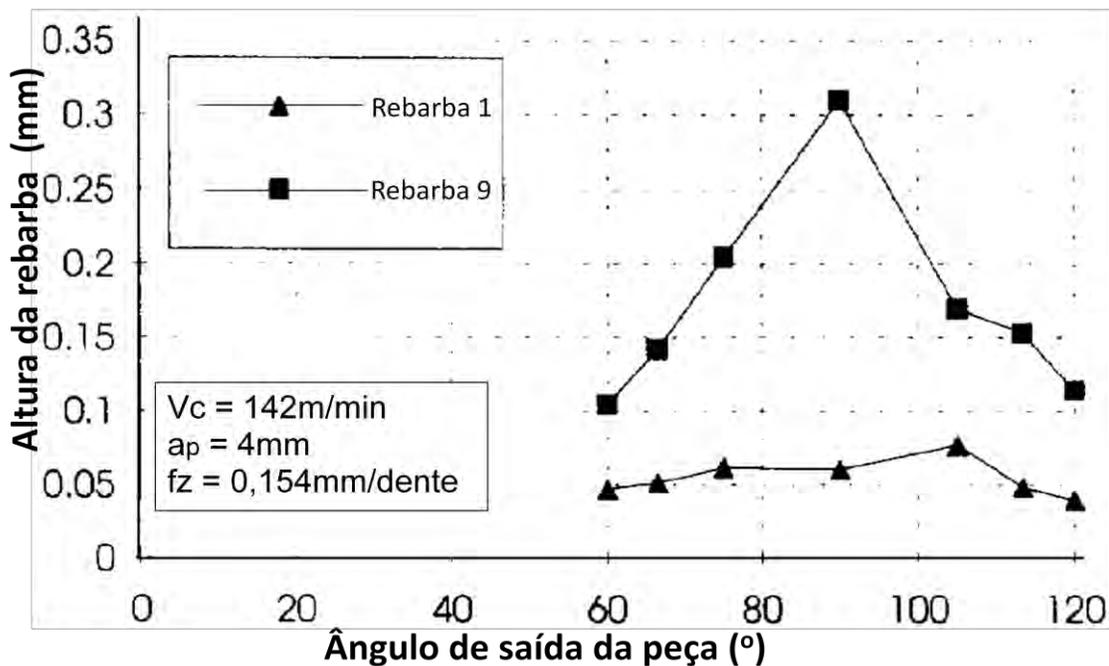


Figura 2.37 - Variação da altura da rebarba (h) em função do ângulo de saída/entrada da peça, Aço AISI 1040, para as rebarbas 1 e 9 (OLVERA; BARROW, 1996)

Outras variáveis como profundidade de corte e o raio da ponta da ferramenta, em conjunto com ângulo Ψ , atuam no sentido de controlar as dimensões da rebarba formada na borda de saída e na borda lateral. Nota-se que para um dado ângulo de saída/entrada da peça, existe um determinado intervalo de profundidade de corte responsável pela transição da rebarba primária para secundária, chamado de profundidade de corte de transição (a_{pt}), a Fig.

2.38 mostra a relação entre o ângulo de saída/entrada da peça e a profundidade de corte, (KISHIMOTO et al., 1981).

Em seu trabalho, Kishimoto et al. (1981) utilizaram o ângulo da direção de saída (ε), a sua relação com o ângulo de saída/entrada da peça é dado por: $\Psi = \varepsilon + 90^\circ$ sendo então o ângulo da direção de saída.

Para um dado ângulo Ψ , a rebarba tem a sua altura aumentada em função do aumento da profundidade de corte, para esse intervalo de profundidade de corte a rebarba é chamada de primária. A partir de um determinado valor da profundidade de corte, a altura da rebarba começa a diminuir, chamada rebarba secundária. Surge um intervalo, indefinido, entre a profundidade de corte que define a rebarba primária e a profundidade de corte que define a rebarba secundária. Nesse intervalo aparece a profundidade de corte de transição. A rebarba formada no intervalo de profundidade de corte de transição é chamada de rebarba de transição.

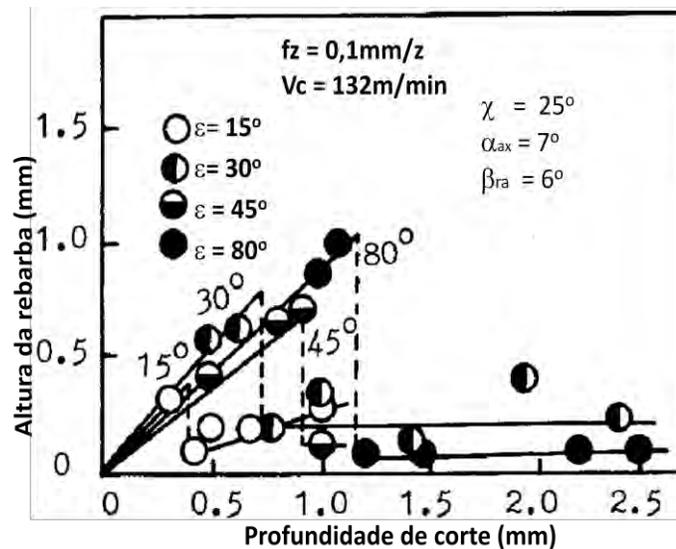


Figura 2.38 - Relação entre a profundidade de corte e a altura da rebarba, variando o ângulo de saída/entrada da peça, aço AISI 1045 (KISHIMOTO et al., 1981)

Conforme Olvera e Barrow (1996), no fresamento de faceamento do aço (AISI 1040) e ângulo Ψ de $113,5^\circ$, nota-se a formação da rebarba primária, para uma profundidade de corte menor que 0,6 mm, aproximadamente, sendo a mesma de tamanho aproximadamente proporcional à profundidade de corte, conforme a Fig. 2.39

Para uma profundidade de corte entre $0,6\text{mm} < a_p < 0,8\text{mm}$ ocorre o intervalo entre a profundidade de corte formadora da rebarba primária e a secundária. A partir de $0,8\text{ mm}$ de profundidade de corte surgirá na borda em questão apenas rebarba secundária.

No fresamento de faceamento, quando utilizado pequenas profundidades de cortes, a ação do corte ocorrerá principalmente pela aresta secundária da ferramenta de corte, gerando então a rebarba primária. Quando a profundidade de corte aumenta, a participação da aresta secundária de corte é reduzida formando a rebarba de transição. O surgimento da rebarba secundária ocorre quando a ação do corte ocorre principalmente pela aresta principal da ferramenta de corte.

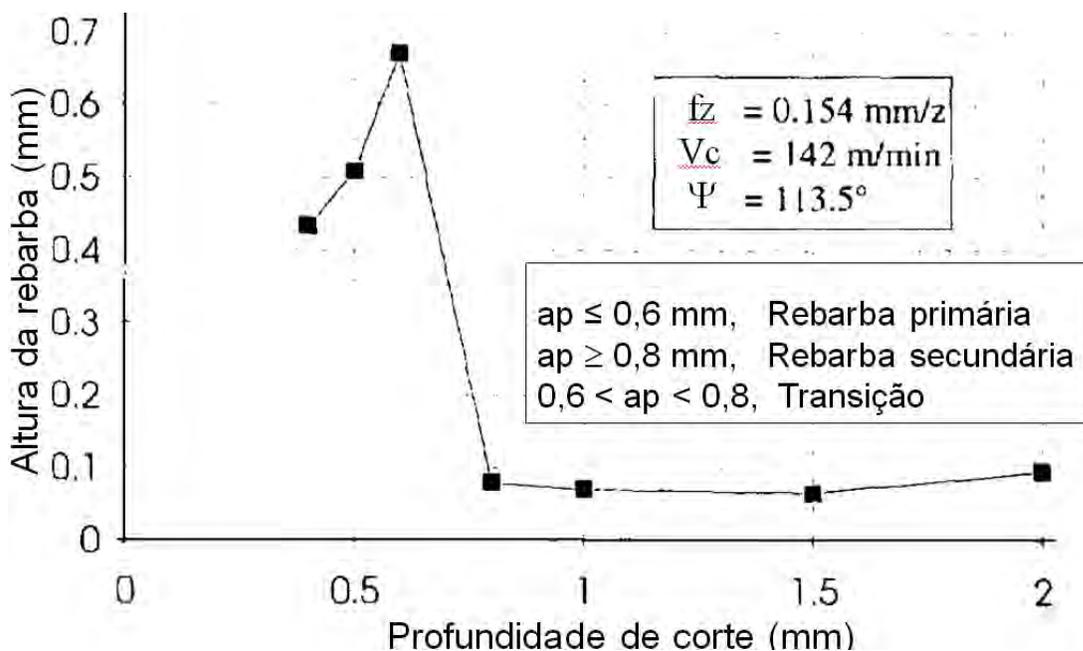


Figura 2.39 - Variação da altura (h) da rebarba 9 em função da profundidade de corte para o ângulo Ψ de $113,5$ durante a usinagem do aço AISI 1040 (OLVERA E BARROW, 1996)

B – Seqüência da ordem de saída da aresta de corte (EOS)

A formação da rebarba está relacionada com a direção e o ângulo do fluxo de cavaco. Infelizmente a sua estimativa é difícil, principalmente para o processo de fresamento. Porém pode ser aproximado, com uma grande parcela de acerto, pela orientação em que as arestas de corte da ferramenta passam pela borda da peça, onde será formada a rebarba em análise. Essa

orientação corresponde à seqüência da ordem de saída da ferramenta (EOS) (HASHIMURA et al., 1999a).

A teoria da seqüência da ordem de saída (EOS) determina a direção do fluxo de cavaco sobre a borda de saída no fresamento de faceamento, onde será formada a rebarba. Dependendo da direção tomada pelo fluxo de cavaco na saída da ferramenta, torna-se possível prever a dimensão da rebarba formada sobre a borda.

A teoria da EOS leva em consideração três pontos característicos presentes no inserto da fresa. A seqüência da ordem de saída (EOS) destes três pontos depende das variáveis da geometria da ferramenta como o ângulo de posição, ângulo axial e ângulo radial e de parâmetros de usinagens como velocidade de corte, avanço e a profundidade de corte.

Para a análise da seqüência da ordem de saída da aresta da ferramenta, deve se fazer as seguintes considerações: Será considerada aresta de corte principal, aquela onde encontra-se o ponto **C**. Na aresta de corte secundária encontra-se o ponto **A** e na interseção das duas arestas localiza-se o ponto **B**. A Fig. 2.40 mostra as arestas com os respectivos pontos. (HASHIMURA et al., 1999a).

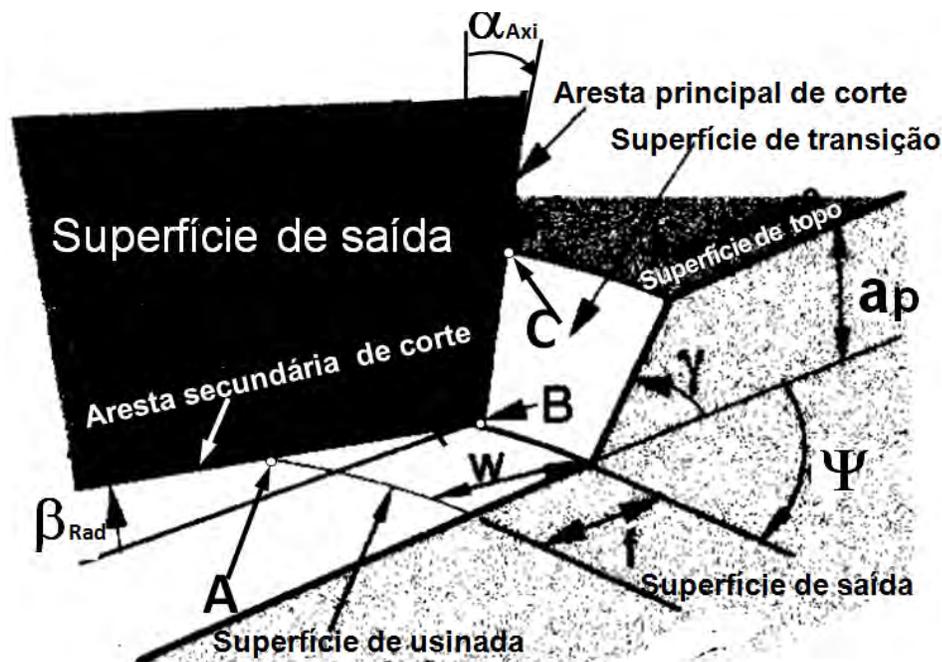


Figura 2.40 - Pontos A, B e C nas arestas da ferramenta de corte, (HASHIMURA et al., 1999a)

ABC, ACB, BAC, BCA, CAB e CBA são as seis possibilidades de EOS que podem ser formadas. O fluxo de saída do cavaco irá depender de qual combinação, das seis, está sendo

utilizada no processo. Portanto a dimensão da rebarba na borda de saída dependerá da combinação que irá ocorrer no momento da saída do cavaco.

No processo de fresamento de faceamento onde é utilizada uma EOS do tipo CBA onde, o ponto **C** sai primeiro, em seguida o ponto **B** e finalmente o ponto **A**, nota-se o dobramento do cavaco sobre a borda lateral, formando nesta borda uma rebarba de elevada dimensão. Seu mecanismo de formação é misto, onde inicialmente, próximo do ponto **B** é do tipo *tear* e logo em seguida do tipo *rollover*. A sua dimensão é próximo da espessura de corte. A Fig. 2.22a mostra a EOS e a borda de dobramento do cavaco, onde será formada a rebarba.

Se for utilizada uma EOS do tipo ABC, sendo que o ponto **A** sai primeiro, em seguida o ponto **B** e finalmente o ponto **C**. Nota-se o dobramento do cavaco sobre a borda transitória, formando uma rebarba também transitória. Portanto a rebarba formada na borda lateral poderá ser desprezada, pelo seu tamanho reduzido. A Fig. 2.22b mostra a borda de dobramento do cavaco, onde será formada a rebarba.

No EOS do tipo ABC a rebarba formada na borda transitória tem tamanho elevado, tendo aproximadamente, a mesma dimensão da profundidade de corte, essa rebarba é do tipo *rollover*. Sendo ela formada numa borda de transição, o seu aparecimento também será transitório, pois pelo próprio movimento de avanço da fresa ela será cortada.

Estudos experimentais mostram que a EOS tem excelente relação entre o tamanho da rebarba para pequena penetração trabalho ($a_e < \text{raio da fresa}$). Para a alta penetração trabalho ($a_e > \text{raio da fresa}$) a relação é menos consistente com a teoria da EOS. Isto pode ser explicado pelas mudanças nos mecanismos de formação das rebarbas e pela mudança no tamanho da zona de deformação a frente do material a ser usinado (AVILA; DORNFELD, 2004b).

2.10.2 - Efeito das variáveis de usinagens como: velocidade de corte, avanço e profundidade de corte

O ponto de partida para as investigações sobre os mecanismos de formação e das dimensões das rebarbas a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte sempre foram às principais variáveis de usinagem. Através destes procedimentos torna-se possível prever a redução das dimensões das rebarbas, tornando mais fácil a sua remoção, uma vez que a usinagem sem a formação da rebarba é praticamente impossível. Devido à importância de variáveis como velocidade de corte, avanço de corte e profundidade de corte será apresentado uma abordagem da influência das mesmas na formação da rebarba.

A - Influência da velocidade de corte na formação das rebarbas

Através da velocidade de corte é possível prever o modelo ou tipo da rebarba formada, e ainda alterar as suas dimensões, dependendo do processo de usinagem aplicado.

No fresamento radial do aço AISI 1040 foi observado à redução da altura da rebarba, com o aumento da velocidade de corte. O mesmo não ocorreu com a espessura, pois foi verificado o seu aumento, com a elevação da velocidade de corte (Olvera e Barrow ,1996). Na Fig. 2.41 nota-se a redução da altura rebarba até a metade enquanto a velocidade de corte foi dobrada.

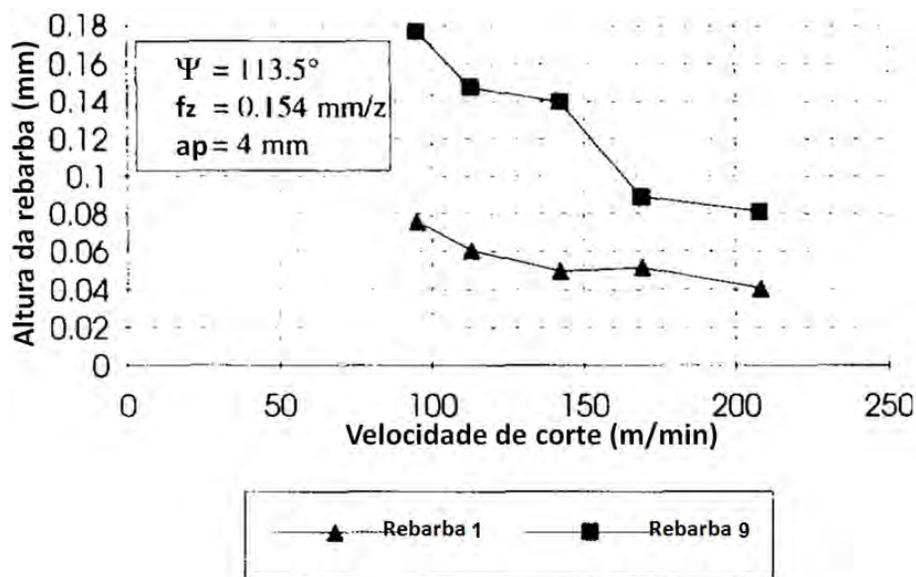


Figura 2.41 - Variação da altura da rebarba (h) em função do aumento da Velocidade de corte, para a rebarba 1 e rebarba 9 (OLVERA; BARROW, 1996)

O aumento da velocidade de corte reduz o atrito na interface cavaco ferramenta. A redução desse atrito proporciona, da mesma forma, um correspondente aumento do ângulo de cisalhamento primário, reduzindo o grau de recalque e conseqüentemente a deformação plástica no plano de cisalhamento primário.

O material da peça, entretanto parece ter grande influência no processo. Shefelbine (2004), no fresamento do ferro fundido nodular GGG 40, observou o aumento da rebarba em função do crescimento da velocidade de corte, conforme observa-se na Fig. 2.42. O aumento da rebarba acontece principalmente entre 250 a 300 m/min. São resultados opostos aos encontrados por Olvera e Barrow (1996) no aço AISI 1040. A velocidade de corte aumenta e com ela a temperatura de corte. Isto pode estar aumentando a ductilidade do ferro fundido

nodular, favorecendo a formação da rebarba, mas observa-se que se trata de rebarbas com espessuras reduzidas. Isso deve-se ao fato de ser utilizado um material relativamente frágil.

Independente da velocidade de corte a EOS do tipo BAC forma uma rebarba com dimensões intermediárias, quando comparado com a EOS do tipo ABC, formadora da menor rebarba, e CBA, formadora da maior rebarba. Nos dois casos onde a foi utilizado à penetração de trabalho de 51,5 mm formaram rebarbas maiores. Os resultados de Olvera e Barrow (1996) não levaram em consideração a EOS e a penetração de trabalho.

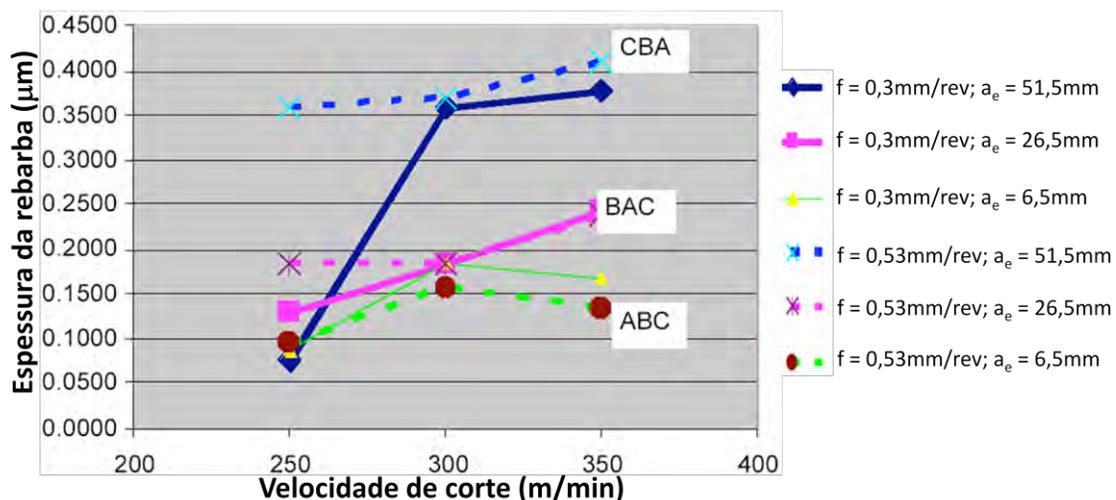


Figura 2.42 - Efeito da velocidade de corte na espessura da rebarba formada no ferro fundido nodular, sendo a profundidade de corte de 0,5 mm (SHEFELBINE, 2004)

B - Influência do avanço na formação das rebarbas

Como ocorre com a velocidade de corte, o avanço tem uma reduzida influência na formação da rebarba, quando comparado com outros fatores como EOS, desgaste da ferramenta, profundidade de corte, penetração trabalho e outros. Apesar desse fato, considera-se o efeito do avanço sobre as dimensões da rebarba semelhante ao da velocidade de corte, pois as alterações do avanço proporcionam mudanças na força de corte, temperatura e na deformação plástica do material.

Olvera e Barrow (1996), no fresamento do aço AISI 1040, notaram a pequena participação do avanço na formação da rebarba de saída. Foi observada uma redução na altura da rebarba quando o avanço aumenta. Principalmente para a ferramenta dois que tem maior raio de arredondamento que a ferramenta um, conforme é mostrado na Fig. 2.43.

Durante o fresamento, para pequenos avanços, a compressão gerada pelas arestas de corte sobre o material, irá gerar uma grande deformação plástica. Essa deformação proporciona

o aumento da rebarba, que tem o mecanismo de formação identificado pelo tipo *Poisson*. Na medida em que o avanço aumenta, torna nítido o aumento da espessura do cavaco cisalhado, proporcionando à redução da deformação plástica e em consequência a altura da rebarba. O mecanismo de formação dessa rebarba é identificado pelo tipo *Tear*.

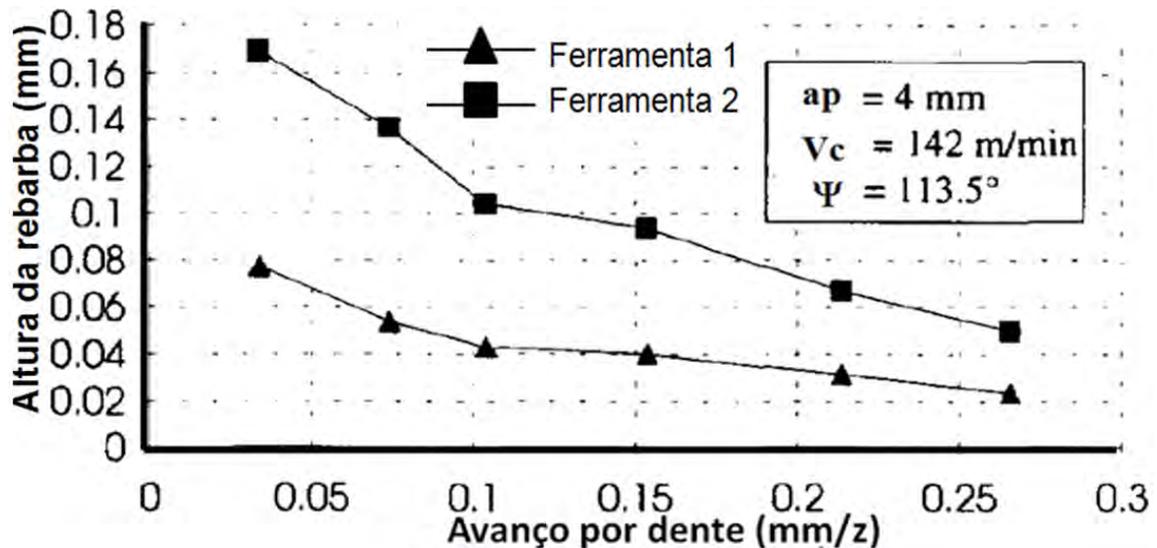


Figura 2.43 – Variação da altura da rebarba lateral em função do avanço para duas ferramentas de corte (OLVERA; BARROW, 1996)

C - Influência da profundidade de corte na formação das rebarbas

Dentre as diversas variáveis do processo de usinagem a profundidade de corte é de grande importância, pois ela interfere de forma direta na altura da rebarba. Através da sua variação torna-se possível modificar as dimensões das rebarbas, prevendo a sua minimização.

A partir da variação da profundidade de corte, para um dado ângulo de saída da peça e um raio de arredondamento da ferramenta, a altura da rebarba sofre alterações consideradas importante, pois estas alterações são responsáveis pela formação da rebarba primária e secundária que ocorre no fresamento de faceamento.

A rebarba primária formada no processo de fresamento de faceamento é de dimensão elevada, e a sua altura é linearmente proporcional à profundidade de corte.

A partir de uma determinada profundidade de corte, surge um intervalo considerado de transição. As rebarbas formadas durante as profundidades de corte maiores que aquelas do intervalo de transição, recebem o nome de rebarba secundária, conforme foi mostrado na Fig. 2.21, e são de dimensões reduzidas.

Kishimoto et al, (1981), identificaram de forma pioneira a formação da rebarba primária e secundária para o fresamento de faceamento do aço AISI 1045 normalizado e dureza de 174 a 179 HB. O ângulo de saída da fresa foi variado, conforme foi mostrado no gráfico da Fig. 2.38.

Inicialmente, com a participação, proporcionalmente elevada, da aresta secundária, a ação da ferramenta tem grande influência na formação da rebarba primária, pois o fluxo de cavaco tende a sair em uma direção perpendicular à aresta secundária de corte. Quando a profundidade de corte aumentar, a ação do corte não sofrerá tantas influências da aresta secundária, mas da aresta primária de corte, e a rebarba terá seu tamanho reduzido. No intervalo de transição de rebarba primária para secundária, será notado um fluxo de cavaco inclinado, podendo este gerar tanto uma rebarba primária como rebarba secundária.

A formação da rebarba apresenta uma forte ligação com a força de usinagem, portanto qualquer fator que venha interferir no seu valor irá atuar de forma direta nas dimensões da rebarba (GUO, 1995). Sendo a profundidade de corte e o avanço as variáveis que determinam a área de cisalhamento, torna-se possível observar a sua participação na força de corte e conseqüentemente as suas influências nas dimensões da rebarba.

2.10.3 - O efeito do fluido de corte na formação da rebarba

A formação da rebarba, principalmente no fresamento, é considerada um fenômeno com elevado grau de liberdade, pois ela depende de fatores como propriedades do material a ser trabalhado, geometria peça/ferramenta, parâmetros de corte, desgaste da ferramenta de corte, e outros com menor importância (ÁVILA, DORNFELD, 2004a).

As funções do fluido de corte no processo de usinagem, dentre outras, é lubrificar e refrigerar o conjunto peça/ferramenta. A elevada temperatura atingida pela peça poderá proporcionar alterações nas suas propriedades, pois com a elevação da temperatura a deformação plástica do material será aumentada.

Sendo a rebarba uma projeção indesejável, nas bordas da peças, devido à deformação plástica ocorrida nos processo de usinagem, espera-se existir uma relação entre as dimensões das rebarbas e a aplicação do fluido de corte na usinagem.

O uso do fluido de corte eleva o custo do produto usinado em até 16% comparado com os 4% das ferramentas de corte. Os métodos de aplicação, armazenamento e descarte são os grandes responsáveis pelo seu elevado custo. Os seus efeitos contra o meio ambiente ainda não são totalmente conhecidos, conforme afirma Graham Dry, citado por Shefelbine e Dornfeld (2004).

São diversas as publicações que apresentam resultados da relação entre as dimensões das rebarbas e a aplicação dos fluidos de corte. Dentre elas, vários afirmam não encontrar diferenças significativa que venha a justificar a aplicação do fluido de corte para minimizar a formação das rebarbas.

O gráfico da Fig. 2.44 apresenta as dimensões das rebarbas no fresamento do AlSi9MgWa (liga de alumínio silício) quando usinado a seco e quando aplicado o fluido de corte para dois estados de afiação da ferramenta de corte e duas profundidade de corte.

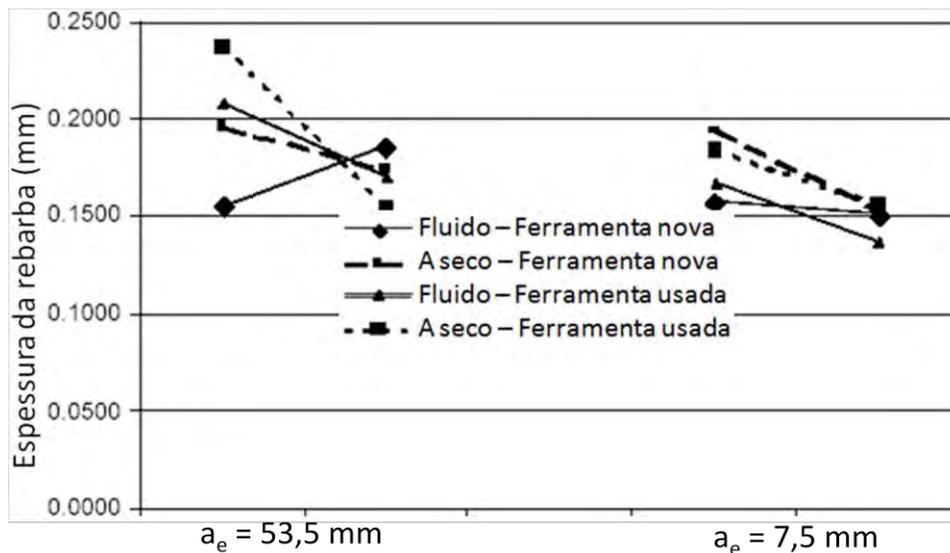


Figura 2.44 – Espessura da rebarba em função da penetração de trabalho, da aplicação do fluido de corte e da vida da ferramenta. Sendo: $f_z = 0,15$ mm/z, $V_c = 1885$ m/min (9525 rpm e $\phi_{fresa} = 63$ mm) (SHEFELBINE; DORNFELD, 2004)

O gráfico não apresenta diferenças significativas entre as rebarbas formadas durante a usinagem a seco e aquelas formadas pela usinagem com a aplicação do fluido de corte, principalmente para baixa penetração de trabalho. Nos ensaios onde a penetração de trabalho são maiores foi notado uma maior dimensão para a espessura da rebarba (SHEFELBINE; DORNFELD (2004).

Conforme o gráfico, as rebarbas formadas na usinagem a seco são por volta de 9% maior que aquelas formadas na usinagem com fluido de corte. A maior rebarba obtida na usinagem a seco é aproximadamente 11% maior que aquela também considerada maior na usinagem com fluido de corte, (SHEFELBINE; DORNFELD, 2004).

No fresamento com baixa penetração de trabalho observa-se uma reduzida diferença entre as dimensões das rebarbas formadas no processo a seco e com a aplicação do fluido de

corde, portanto não justificando a utilização do fluido de corte para reduzir a formação da rebarba.

Mendes e Silva (2003) notaram um comportamento semelhante na relação entre a altura da rebarba e a aplicação do fluido de corte. Os gráficos das Figs. 2.45(a), (b) e (c) mostram a relação entre a altura da rebarba em função dos principais parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço e profundidade) quando do torneamento do aço carbono ABNT 1045. Foram realizados ensaios aplicando fluido de corte e ensaios a seco.

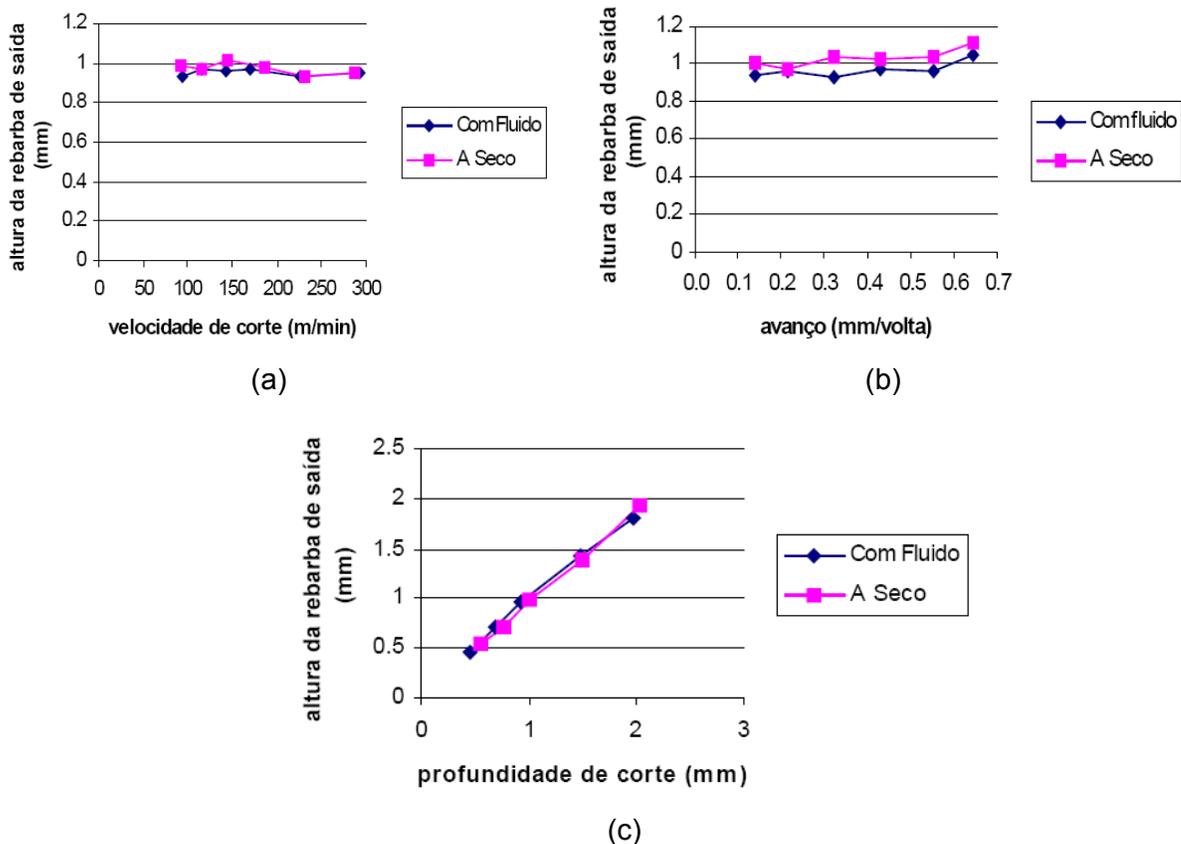


Figura 2.45 – Relação entre a altura da rebarba e os principais parâmetros de usinagem a seco e com fluido de corte. (a) - Velocidade de corte, (b) - avanço e (c) - profundidade (MENDES; SILVA, 2003)

Observando-se os gráficos da Fig. 2.45 (a) não foi possível perceber diferenças significativas entre as alturas das rebarbas com o aumento da velocidade de corte. Mesmo com a aplicação do fluido de corte, não foram notadas alterações possíveis de ser comentada. (MENDES; SILVA, 2003).

Quanto à relação entre a altura da rebarba e o avanço, gráfico da Fig. 2.45(b), da mesma forma que a análise anterior, percebe-se pequenas alterações na altura das rebarbas quando o avanço é aumentado. Uma reduzida tendência para a formação de rebarbas maiores na usinagem a seco foi notada, mas mesmo assim pouco significativa.

A profundidade de corte interfere de forma significativa na altura da rebarba, conforme mostra o gráfico da Fig. 2.45(c), e pode se observar que a altura da rebarba aumenta de forma linear com o crescimento da profundidade de corte. Quanto à aplicação do fluido de corte, é possível afirmar que o mesmo não interfere nas dimensões das rebarbas.

Embora apareça um pequeno aumento da altura da rebarba para a usinagem a seco em relação à usinagem com fluido de corte, não justifica a utilização do fluido de corte para reduzir a formação da rebarba (MENDES; SILVA, 2003).

A aplicação do fluido de corte para a redução da rebarba é um fator que pode ser levado em conta no momento de decidir sobre a aplicação do fluido de corte no processo de usinagem, pois nesse instante deve ser considerado o custo do óleo, problemas ambientais, armazenamento, descarte e outros fatores que poderão surgir.

2.11 – Aços Inoxidáveis

Aços inoxidáveis são ligas compostas principalmente por níquel e cromo, possuindo no mínimo 11% de cromo. Outros elementos de ligas como o nióbio, nitrogênio, molibdênio, cobre, alumínio, selênio, titânio, silício podem ser acrescentados quando se pretende obter propriedades mecânicas especiais. Os aços inoxidáveis são caracterizados como ligas de elevada resistência a corrosão aliada à resistência mecânica. Uma fina camada de óxido crômico (Cr_2O_3) será formada na superfície do metal, garantindo-lhe a elevada resistência aos ataques eletroquímico-físicos dos ambientes corrosivos. Esta propriedade recebe o nome de passividade e o seu aparecimento ocorre devido à maior afinidade do oxigênio ao cromo, em relação ao ferro. Esta fina camada é transparente, aderente, impermeável, estável e de rápida recomposição.

2.11.1 – Classificação

Os aços inoxidáveis estão disponíveis em mais de 250 tipos diferentes, divididos em cinco grandes classes (AK Steel Corporation, 2004), sendo elas: os austeníticos, martensíticos,

ferríticos, duplex e endurecidos por precipitação. Os quatro primeiros grupos estão fundamentados na suas características microestruturais enquanto o último grupo no tratamento térmico (ASM Handbook, 1997). As propriedades mecânicas e a resistência a corrosão são fatores que determinam a escolha da classe do aço inoxidável. Será feito, a seguir, a descrição das principais características de cada classe.

Austeníticos

Apresentam uma microestrutura cúbica de face centrada (cfc). São ligas não-magnéticas na condição recozida. Não são endurecíveis por tratamento térmico, mas pelo trabalho a frio. Constituem a maior classe de aços inoxidáveis, inclusive na utilização. Geralmente possuem elevada resistência mecânica e à corrosão quando utilizados em altas temperaturas. São aços que possuem grande ductilidade. Os aços inoxidáveis austeníticos estão divididos em duas categorias: as ligas de cromo-níquel e as ligas cromo-manganês-nitrogênio. O níquel tem a função de estabilizar a austenita, quando na temperatura ambiente das ligas de cromo-níquel. Nestas ligas o teor de cromo poderá variar de 15 a 25%, enquanto que o teor de níquel pode ficar entre 5 a 30%. As ligas de cromo-manganês-nitrogênio, caracterizadas pelo baixo teor níquel, têm como estabilizador da austenita o elevado teor de nitrogênio. O manganês tem a função de aumentar a solubilidade do nitrogênio na austenita. Com o objetivo de melhorar ainda mais à resistência a oxidação das duas categorias, podem ainda ser adicionados elementos como: molibdênio, cobre, silício, alumínio, titânio e nióbio.

Martensíticos

São aços inoxidáveis que apresentam uma microestrutura tetragonal compacta, conhecida por estrutura cristalina martensítica, são ligas Fe-Cr-C e ao contrário da classe anterior, são magnéticos e podem ser endurecidos por tratamento térmico. Dentre os aços inoxidáveis, são considerados de maior resistência mecânica, portanto com menores ductilidade e tenacidade. O teor de cromo gira em torno de 10 a 18% e o carbono não deve ultrapassar 1,2%. Em elevados teores de carbonos torna se inevitável a formação de carbonetos de cromo, causadores da redução da vida útil das ferramentas de corte durante a usinagem, devido à sua considerável abrasividade. A tenacidade e a ductilidade da liga também ficam comprometidas, apesar do aumento da resistência. Sendo os aços inoxidáveis martensíticos uma liga de Fe-Cr-C, o carbono presente torna se um importante elemento. A sua quantidade é responsável pela subclassificação seguinte: Aços inoxidáveis martensíticos de baixo carbono, aços inoxidáveis martensíticos de médio carbono e aços inoxidáveis martensíticos de alto carbono. Para

melhorar a resistência a corrosão, quantidades reduzidas de níquel podem ser adicionadas. Da mesma forma o nióbio, silício, vanádio, tungstênio e outros podem alterar o comportamento do revenimento destas ligas.

Ferríticos

Apresentam uma microestrutura cristalina cúbica de corpo centrado (ccc). São ligas de Fe-Cr sendo que o teor de cromo pode variar entre 11 a 30% e baixíssimo teor de carbono, menor que 0,1%. São magnéticos, de boa ductilidade e conformabilidade. A sua resistência a altas temperaturas é baixa quando comparado com as outras classes. Tem dureza limitada por não serem tratáveis termicamente. São vantajosos por resistirem bem à corrosão atmosférica e ao cloro. A adição de selênio ou enxofre melhora a usinabilidade destes metais.

Duplex

São aços inoxidáveis formados pela liga de Cr-Ni-Mo, que em proporções adequadas, são responsáveis pela obtenção de austenita e ferrita que compõe o metal. O teor de Cr é de 18 a 30%, de Ni de 3,5 a 8%, de Mo está entre 1,5 a 4%, enquanto que o de carbono não ultrapassa 0,05%. São magnéticos e têm como principal característica a elevada resistência mecânica aliada à boa tenacidade e ductilidade. É resistente a corrosão por cloretos e tem boa soldabilidade.

Endurecíveis por precipitação

Os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação (PH) são ligas de Cr-Ni. Podem ser: austeníticos, semi austeníticos e martensíticos. Através do tratamento de envelhecimento estes metais têm as suas propriedades mecânicas melhoradas como a dureza elevada, aumento do limite de escoamento e ruptura, resistência a corrosão sob tensão dentre outros. A adição de elementos como o cobre, titânio, nióbio, molibdênio e o alumínio são responsáveis pela formação de precipitados intermetálicos. Maiores detalhes sobre a classe desse aço inoxidável serão abordados nos próximos itens, pois o material ensaiado neste trabalho pertence à mesma.

2.11.2 – Subclasses dos aços inoxidáveis conforme as normas técnicas

Em função da necessidade particular de cada projeto e da intensa aplicação industrial dos aços inoxidáveis, são inúmeras as ligas disponíveis no mercado, apesar de existir uma relação

entre elas. As normas técnicas classificam o aço inoxidável em função das diferentes composições existentes.

São várias normas designadas na classificação do aço inoxidável. Dentre elas a mais usual é a AISI, (American Iron and Steel Institute). Nela os aços inoxidáveis são classificados por um sistema numérico de três algarismos. Os aços inoxidáveis austeníticos são designados pela série 200 e 300 enquanto que na série 400 aparecem os martensíticos e os ferríticos.

Outra forma de classificar os metais é dada pelo sistema denominado por UNS (Unified Numbering System). Dentro deste sistema o aço inoxidável é identificado pelo prefixo S seguido do número de série AISI e mais dois dígitos, em geral 00. O sistema de classificação UNS atende praticamente todas as ligas de aço inoxidável. Outros sistemas de identificação dos aços inoxidáveis, menos utilizados, podem aparecer. Como exemplo podem ser citados aqueles criados pelos fabricantes. A ABNT utiliza um sistema similar ao da AISI.

2.11.3 – Aplicação dos aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis devem ser aplicados em situações que são exigidos materiais com elevada resistência a corrosão e outros ataques eletroquímicos, aliada a boa resistência mecânica. Algumas aplicações, consideradas especiais, devem ser atendidas pelas ligas disponíveis, dentre as diversas. A Tab. 2.7 apresenta algumas ligas, a sua respectiva classe e aplicações específicas.

2.11.4 – Aço inoxidável endurecido por precipitação

Devido às necessidades da indústria aeronáutica, após a segunda guerra mundial, as extensas pesquisas por materiais com resistência mecânica e à corrosão, em elevadas temperaturas, maiores que a dos aços inoxidáveis tradicionais, resultou no aparecimento dos aços inoxidáveis endurecidos por precipitação. Completa a qualidade destas ligas a ductilidade apropriada para a conformação das mesmas e a boa soldabilidade (Casteletti, 1996).

Nestes aços, o endurecimento ocorre devido à influência de precipitados intermetálicos a base de cobre, alumínio ou molibdênio. Estes atuam no movimento das discordâncias (Guo et al, 2003). As classes destes aços estão divididas em grupos: austeníticos, semiausteníticos e martensíticos. O tratamento térmico de endurecimento dos mesmos ocorre por dois mecanismos distintos, sendo que no primeiro ocorre a solubilização e em seguida o térmico de envelhecimento, conforme será descrito nas seguintes etapas:

Tabela 2.7 – Classes, características, subclasses e aplicações dos aços inoxidáveis

| | | |
|------------------------------|----------------------------|---|
| Austeníticos | Principais características | São resistentes à corrosão atmosférica, em várias soluções aquosas. Também na presença de ácidos, em soluções de cloretos e em ácidos sulfurosos. Ainda são aplicados em componentes sujeitos a temperaturas elevadas. |
| | Subclasses | 301, 302, 303, 304 308, 309, 310, 316, 316L, 317, 321 e 347 |
| | Aplicações típicas | Indústria química, cilindros para indústria de celulose, |
| Martensíticos | Principais características | Devem ser utilizados em situações que exigem elevada resistência à tração, à fluência e à fadiga, aliado a uma moderada resistência à corrosão quando a temperaturas de até 650 °C. |
| | Subclasses | 403, 410, 420, 414, 416, 416Se, 420, 431 e 440. |
| | Aplicações típicas | Eixos de bomba, peças de válvulas, mancais de esferas, cutelaria, instrumentos cirúrgicos e odontológicos e tubulações de vapor. |
| Ferríticos | Principais características | São aplicados onde se exige maior resistência a corrosão, em meios ácidos. Sua tenacidade é reduzida em baixas temperaturas. |
| | Subclasses | 405, 409, 430, 430F, 442 e 446 |
| | Aplicações típicas | Componentes estruturais, utensílios domésticos, fornos industriais, estufas e Trocadores de calor, vasos de pressão e juntas de expansão. |
| Duplex | Principais características | São aplicados em estruturas com reduzidas espessuras devido a sua considerável resistência mecânica. Também possuem elevada resistência a corrosão, quando submetido a meios aquosos contendo cloretos. |
| | Subclasses | Ferrallium 255, AF 22, SAF 2205 e U50 |
| | Aplicações típicas | Conexões e tubulações para gases, indústria petroquímica, e de celulose. |
| Endurecidos por precipitação | Principais características | Elevada resistência mecânica, boa tenacidade, considerável resistência a corrosão em altas temperaturas. |
| | Subclasses | PH 15-5, PH 17-4, PH 17-7 e PH 13-8Mo. |
| | Aplicações típicas | Indústria aeronáutica |

- Na primeira etapa o material deve ser aquecido até uma determinada temperatura, de maneira a formar uma única fase. A esta temperatura dá-se o nome de temperatura de solubilização. A Fig. 2.46(a) representa, de forma esquemática esta etapa do tratamento.

- Na próxima etapa ocorre o resfriamento rápido da liga, de forma a manter uma estrutura cristalina próxima daquela obtida na primeira etapa, conforme mostrado no gráfico da Fig. 2.46(b).

- Na terceira etapa ocorre o tratamento térmico de envelhecimento. Aquece-se a liga a uma temperatura abaixo da temperatura de solubilização, obtendo-se uma estrutura com duas fases. A partir de então faz-se o resfriamento, de forma lenta, conforme a Fig. 2.46(c). Nesta etapa, quanto maior o tempo de aquecimento maior será a dureza da liga. Este tratamento também irá melhorar outras propriedades mecânicas, como aumentar o limite da tensão de escoamento e o limite à ruptura.

Na primeira etapa forma-se uma estrutura de austenita homogênea, enquanto que na segunda etapa, após o resfriamento, a austenita será transformada em martensita. Na terceira etapa a martensita é envelhecida a uma temperatura entre 450° a 650° C, ocorrendo à precipitação de finos compostos que irão alojar nos interstícios do material. A Fig. 2.47 mostra, de forma resumida, os dois tratamentos térmicos aplicados às ligas de aço inoxidável endurecidas por precipitação.

O aço inoxidável PH 13-8 Mo encontra-se disponível para comercialização nas duas condições de tratamento térmico, ou seja, na condição de solubilizado ou na condição de envelhecido. A primeira é identificada como “condição **A**”. A segunda tem a sua identificação conforme a temperatura de envelhecimento, sendo elas: condição RH 950, H 950, H 1000, H 1050, H 1100, H 1150 e H 1150M, (HIGH TEMP METALS INC).

Tratamento de solubilização do aço inoxidável PH 13 8Mo - Condição A

O Tratamento de solubilização do aço inoxidável PH 13 8Mo consiste no aquecimento da liga a uma temperatura de 1700°F ± 15°F (926,6° C ± 8,3° C), sendo que o tempo irá depender do tamanho da seção da peça. Normalmente, a peça é mantida em uma hora na temperatura sugerida. O resfriando brusco da liga a uma temperatura abaixo de 60°F (15,5° C) irá garantir a transformação completa da martensita. No resfriamento, um líquido adequado para têmpera deve ser utilizado quando a secção do material for menor que 36 in² (233 cm²). Em seções maiores devem ser aplicados o ar a temperatura ambiente (HIGH TEMP METALS INC).

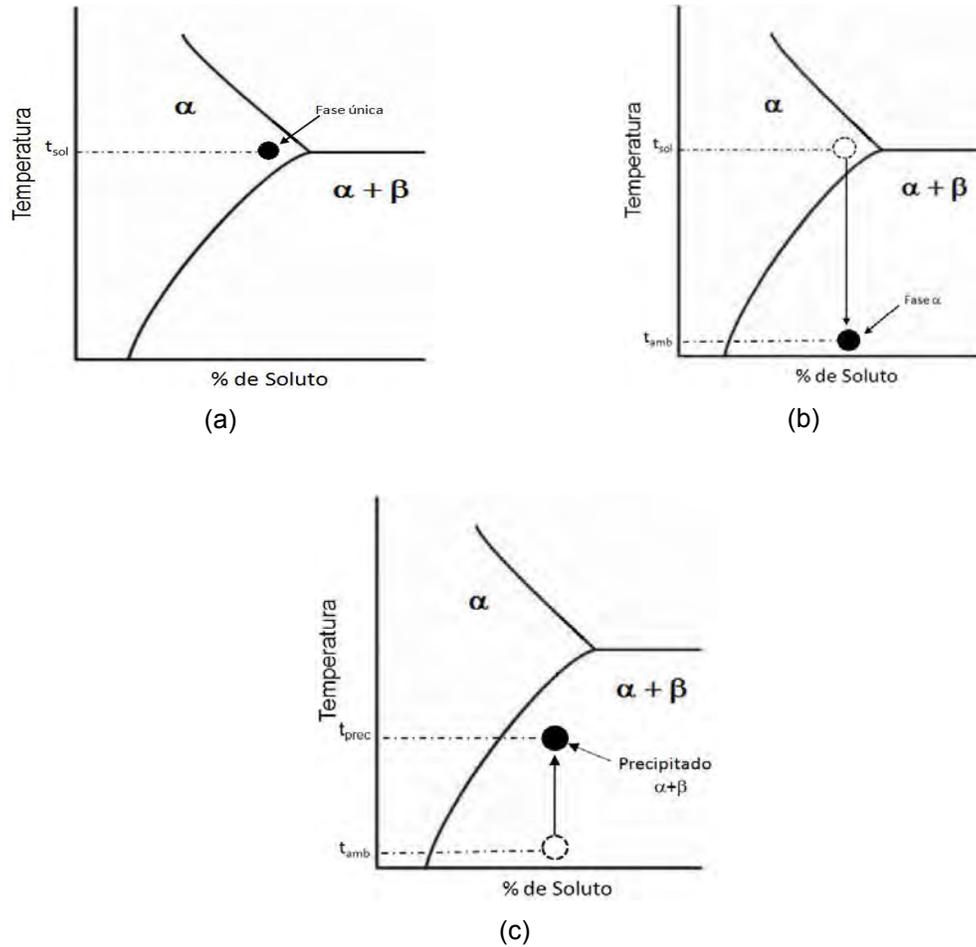


Figura 2.46 – Tratamento térmico de solubilização e de envelhecimento dos aços inoxidáveis PH. (a) – Aquecimento da liga na solubilização, (b) – Resfriamento da liga na solubilização, (c) – Tratamento de envelhecimento da liga (Krabbe; Diniz, 2005)

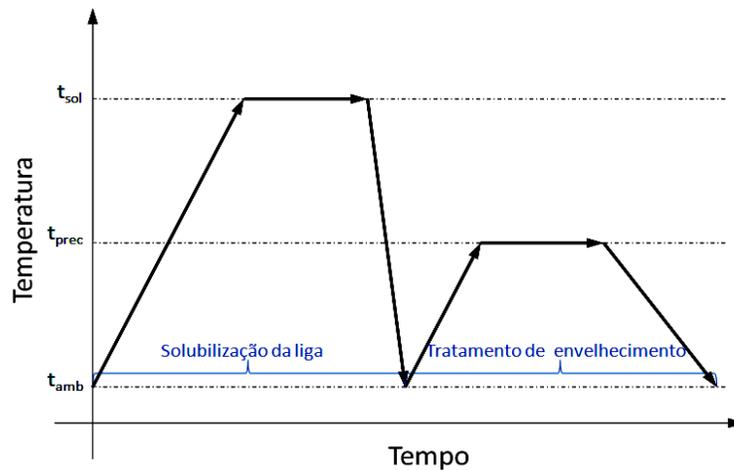


Figura 2.47 - Tratamento de solubilização e de envelhecimento dos aços inoxidáveis PH

2.11.5 - Tratamento Térmico realizado no aço inoxidável PH 13-8Mo

Tratamento de endurecimento por precipitação ou envelhecimento do aço inoxidável PH 13 8Mo - condição RH 950.

Inicialmente deve ser feito o tratamento de resfriamento da liga já solubilizada a -100°F ($-73,3^{\circ}\text{C}$) durante duas horas no mínimo. Em seguida, o ar à temperatura ambiente, faz se o aquecimento. O tratamento de envelhecimento deve ser feito após 24 horas do tratamento de resfriamento. No tratamento de envelhecimento a liga deve ser aquecida a $950^{\circ}\text{F} \pm 10^{\circ}\text{F}$ ($510^{\circ}\text{C} \pm 5,5^{\circ}\text{C}$) por quatro horas e em seguida resfriada pelo ar (HIGH TEMP METALS INC).

Tratamento de endurecimento por precipitação ou envelhecimento do aço inoxidável 13 8Mo – condições H 950, H 1000, H 1050, H 1100 e H 1150.

A liga solubilizada será aquecida a temperatura especificada 950°F , 1000°F , 1050°F , 1100°F , $1150^{\circ}\text{F} \pm 10^{\circ}\text{F}$, (510°C , 538°C , 565°C , 593°C , $621^{\circ}\text{C} \pm 5,5^{\circ}\text{C}$) conforme as condições, por quatro horas e em seguida resfriada pelo ar (HIGH TEMP METALS INC).

Tratamento de endurecimento por precipitação ou envelhecimento do aço inoxidável 13 8Mo - condição H 1150M.

No início, a liga já solubilizada deve ser aquecida à temperatura de $1400^{\circ}\text{F} \pm 10^{\circ}\text{F}$ ($760^{\circ}\text{C} \pm 5,5^{\circ}\text{C}$) por duas horas e em seguida resfriada pelo ar. Imediatamente inicia-se o tratamento seguinte onde a liga deve ser aquecida a $1150^{\circ}\text{F} \pm 10^{\circ}\text{F}$ ($621^{\circ}\text{C} \pm 5,5^{\circ}\text{C}$) por quatro horas e em seguida resfriada pelo ar (HIGH TEMP METALS INC).

Dois fatores definem a qualidade do tratamento de envelhecimento da liga, sendo eles o tempo de aquecimento e a temperatura de precipitação. Verifica-se que quanto maior o tempo de aquecimento maior será a dureza do material. A escolha errada da temperatura no tratamento de precipitação pode inibir a precipitação ou mesmo induzir ao coalescimento dos precipitados e conseqüentemente diminuir a dureza e a resistência mecânica (Reed-Hill, R. E., 1982). A Tab. 2.8 apresenta algumas propriedades mecânicas do aço inoxidável PH 13-8 Mo em relação à condição de tratamento de envelhecimento.

Tabela 2.8 – Propriedades mecânicas do aço inoxidável PH 13 8Mo conforme a condição de tratamento de envelhecimento (HIGH TEMP METALS INC)

| Propriedades mecânicas | | Condição | | | | | |
|--------------------------------------|--------------|----------|---------------------|--------|--------|--------|---------|
| | | H 950 | H 1000 | H 1050 | H 1100 | H 1150 | H 1150M |
| Limite de escoamento (MPa) | | 1449 | 1413 | 1241 | 1034 | 724 | 586 |
| Limite de resistência a tração (MPa) | | 1551 | 1482 | 1310 | 1103 | 1000 | 896 |
| Alongamento em 50,8mm (%) | Longitudinal | 12 | 13 | 15 | 18 | 20 | 22 |
| | Transversal | 12 | 12 | 15 | 18 | 20 | 22 |
| Redução de área (%) | Longitudinal | 50 | 55 | 55 | 60 | 63 | 70 |
| | Transversal | 40 | 50 | 55 | 60 | 63 | 70 |
| Resistência ao impacto Charpy (J) | | 47 | 45 | 43 | 35 | 33 | 32 |
| Modulo de elasticidade (MPa) | | ----- | 195x10 ³ | ----- | ----- | ----- | ----- |

2.12 - Planejamento de Experimentos

2.12.1 – Introdução

O planejamento de experimento (Design Of Experiments - DOE) é uma metodologia, atualmente, muito utilizada em qualquer segmento que se pretende investigar a importância das variáveis envolvidas no processo. A sua notabilidade pode ser melhor observada no desenvolvimento de experimentos em que a quantidade de variáveis é elevada, apesar de ser utilizada em situações que envolvam apenas duas variáveis de entrada. Conforme Calado e Montgomery (2003) o planejamento de experimentos permite determinar as variáveis de maior influência em um processo através dos seguintes resultados:

- Redução da variação do processo e melhor concordância entre os valores nominais obtidos e valores pretendidos;
- Redução do tempo do processo;
- Redução do custo operacional;
- Melhorias no rendimento do processo.

Dentre as diversas vantagens da aplicação do planejamento de experimento a influência das interações entre duas ou mais variáveis do processo podem ser claramente obtidas, desde que o tipo da técnica do planejamento de experimento seja corretamente selecionado. O

diagrama de bloco da Fig. 2.48 identifica o processo de um sistema quando tratado por planejamento de experimentos

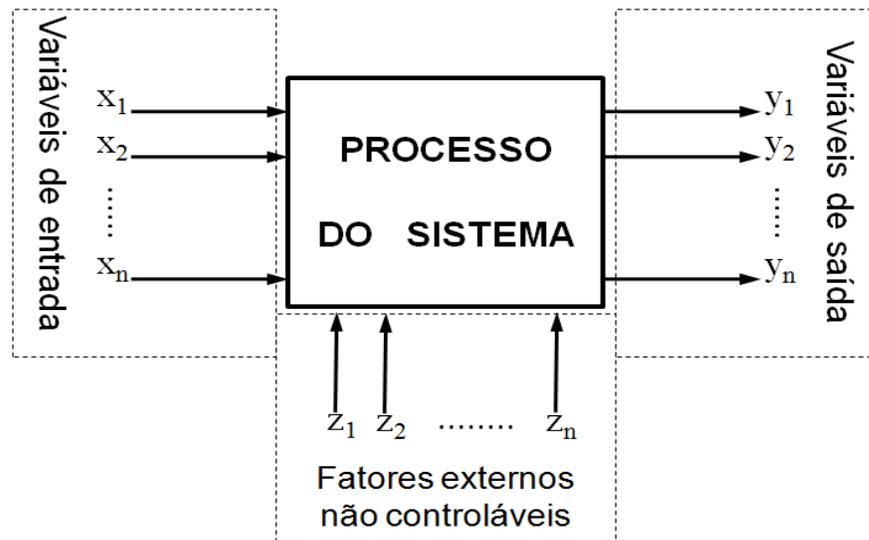


Figura 2.48 – Processo do sistema representado pelo planejamento de experimento

Na Fig. 2.48 as variáveis de entrada são as variáveis que se pretende manipular ou controlar, também conhecidas como fatores, enquanto que as variáveis de saída são as respostas que se pretende obter. Os fatores externos não controláveis são perturbações indesejáveis que aparecem durante os ensaios e é característico de cada processo, também é conhecido como ruídos.

Os três princípios básicos de um correto planejamento de experimentos são a replicação, a aleatoriedade e a blocagem (CALADO; MONTGOMERY, 2003).

A replicação dos ensaios permite a obtenção de uma estimativa do erro experimental. Durante o planejamento de experimentos é de fundamental importância a distinção entre a replicação e a repetição das medições. Considera-se repetição as diversas medidas realizadas para uma mesma amostra, enquanto que a realização de um novo ensaio com as mesmas características e propriedades do anterior é chamada de réplica. A aleatoriedade dos experimentos permite independência das variáveis e erros, durante a sua análise. A blocagem tem a função de avaliar e controlar a presença de fatores externos não controláveis ou outros ruídos que possam perturbar o processo.

O planejamento de experimento apareceu na década de 1920, desenvolvido por R. A. Fisher, na Rothamsted Agricultural Field Research Station, em Londres. Depois de sua utilização na agricultura outras pesquisas foram desenvolvidas com a sua aplicação, principalmente, na indústria química (ROWLANDS, 2003). O conceito de planejamento fatorial e a análise da variância em investigações que envolvem planejamento de experimentos foram introduzidos por Fisher. Mesmo com a aplicação da estatística no planejamento de experimento na indústria ter iniciado em 1930, essa metodologia teve maior aplicação por volta de 1951, quando surgiram os primeiros estudos sobre superfície de resposta, desenvolvido por Box e Wilson (MONTGOMERY, 2005).

2.12.2 - Planejamento Fatorial

Dentre as técnicas de planejamento de experimentos o planejamento fatorial é o mais utilizado, pois se trata de uma técnica capaz de analisar o comportamento de duas ou mais variáveis de entrada, denominadas por fatores, no processo. A sua importância é notada na medição das influências, denominadas de efeitos, dos fatores sobre as variáveis de saídas. Portanto no planejamento fatorial devem-se conhecer, inicialmente, quais fatores devem ser manipulados ou controlados e quais respostas de maior interesse durante o processo.

Planejamentos fatoriais são freqüentemente usados nos experimentos envolvendo vários fatores em que é necessário estudar o efeito conjunto dos fatores, denominados por efeitos de interação, sobre uma variável de resposta, sendo esta considerada a única maneira de obter as interações entre diversas variáveis de entrada (MONTGOMERY; RUNGER, 2003).

Dá se o nome de níveis aos valores das variáveis de entrada, sendo estes fornecidos em intervalos ou valores discretos. No planejamento fatorial são utilizados dois ou três níveis para cada variável de entrada, podendo estes ser quantitativos ou qualitativos bem como alto e baixo ou valores máximo e mínimo. O Arranjo entre os níveis dos fatores permite a obtenção dos efeitos com uma menor quantidade de ensaios.

A aplicação da técnica do planejamento fatorial proporciona vários benefícios ao planejamento de experimentos. Dentre eles são destacados:

- Os resultados do planejamento são obtidos a partir da matemática elementar;
- É possível respostas do processo com um número pequeno de ensaios;
- Permite a blocagem dos ensaios;
- Permite a sua ampliação para formar planejamentos compostos;
- Nos planejamentos com dois níveis é possível o seu fracionamento.

Alguns procedimentos devem ser cuidadosamente verificados na elaboração de planejamento fatoriais, dentre eles serão destacadas as seguintes etapas:

- Escolha dos fatores;
- Seleção dos níveis;
- Escolha das variáveis de saída;
- Seleção do modelo de planejamento de experimento;
- Realização dos experimentos;
- Análise dos dados.

2.12.3 - Planejamento Fatorial completo 2^k

O planejamento fatorial completo (PFC) do tipo 2^k é formado por k variáveis de entrada no processo. Será utilizada para cada variável apenas dois níveis, podendo eles ser quantitativos ou qualitativos. A quantidade de experimentos a serem realizados dependerá da combinação completa entre os níveis e todas variáveis de entradas, portanto neste caso serão realizados 2^k ensaios.

Os planejamentos fatoriais mais simples e mais importantes são aqueles em que todos os fatores são estudados em apenas dois níveis. Na presença de um determinado número de fatores torna-se necessário a realização de $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ensaios. Por isso são chamados de planejamento fatorial 2^k (MONTGOMERY, 2005).

O nível codificado, considerado mais elevado, de um fator é conhecido por nível superior da variável, identificado por (+1), enquanto que o outro será identificado por nível inferior da variável (-1). No quadro da Tab. 2.8 apresenta-se a matriz de contraste do planejamento juntamente com a matriz de resposta. Na primeira coluna da referida tabela mostra a seqüência dos 2^k ensaios. A seqüência da numeração adotada para os ensaios é apenas uma forma conveniente de identificar as várias combinações dos níveis, uma vez que execução dos ensaios deve ocorrer de forma aleatória.

Na segunda coluna é representado o valor médio dos ensaios. Os valores em negrito mostram a combinação dos dois níveis codificado dos fatores $k_1, k_2, k_3 \dots k_n$. Os valores apresentados em itálico representam a interação entre duas variáveis. Não será apresentada a interação entre mais de duas variáveis devido à baixa significância das mesmas. As variáveis de saída do experimento encontram-se nas últimas colunas, sendo que das mesmas é possível obter a matriz de resposta.

Tabela 2.9 – Planejamento fatorial completo com matriz de contraste e matriz resposta

| Nº Ens | M | Variáveis de entrada | | | | | Interação entre duas variáveis | | | | | Respostas | | | |
|----------------|----|----------------------|----------------|----------------|-------|----------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------|-----------------------------|
| | | k ₁ | k ₂ | k ₃ | ..... | k _n | k ₁ k ₂ | k ₁ k ₃ | k ₂ k ₃ | ..... | k _(n-1) k _n | y ₁ | y ₂ | ..... | y _n |
| 1 | +1 | -1 | -1 | -1 | ..... | -1 | +1 | +1 | +1 | ..... |  | y ₁₁ | y ₂₁ | ..... | y _{n1} |
| 2 | +1 | +1 | -1 | -1 | ..... | -1 | -1 | -1 | +1 | ..... |  | y ₁₂ | y ₂₂ | ..... | y _{n2} |
| 3 | +1 | -1 | +1 | -1 | ..... | -1 | -1 | +1 | -1 | ..... |  | y ₁₃ | y ₂₃ | ..... | y _{n3} |
| 4 | +1 | +1 | +1 | -1 | ..... | -1 | +1 | -1 | -1 | ..... |  | y ₁₄ | y ₂₄ | ..... | y _{n4} |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 2 ^k | +1 | +1 | +1 | +1 | ..... | +1 | +1 | +1 | +1 | ..... |  | y _{12^k} | y _{22^k} | ..... | y _{n2^k} |

2.12.4- Análise de significância dos efeitos

A análise de significância dos efeitos principais e das interações podem ser determinados pela equação matricial 2.1. Após a obtenção do valor numérico dos efeitos, os mesmos devem ser divididos por um fator que dependerá do planejamento. Para o planejamento fatorial completo 2^k o divisor dos efeitos principais e de interação será 2^{k-1} enquanto que para a média é 2^k.

$$Y_n = X^t y \quad (2.1)$$

Onde:

$Y_n \rightarrow$ é o índice do valor numérico do efeito, ou seja, o valor da significância.

$X \rightarrow$ é a matriz do coeficiente de contraste, sempre com a dimensão de k x k/2.

$y \rightarrow$ é a matriz de resultados.

O erro padrão dos efeitos (S_{efeito}) foi determinado a partir da raiz quadrada da estimativa da variância conjunta (s^2) e do número de repetições para cada ensaio (n_n), conforme Eq. 2.2. A estimativa da variância conjunta será dada pela média aritmética da variância ($s_1^2, s_2^2, s_3^2, \dots, s_N^2$) para os 2^k ensaios e pelo número de graus de liberdade da variância ($v_1, v_2, v_3, \dots, v_N$), considerando o mesmo número de réplicas. A estimativa da variância conjunta é dada pela Eq. 2.3.

$$S_{efeito} = \sqrt{\frac{s^2}{n_n}} \quad (2.2)$$

$$s^2 = \frac{V_1 s_1^2 + V_2 s_2^2 + \dots + V_N s_N^2}{V_1 + V_2 + \dots + V_N} \quad (2.3)$$

Sendo:

S_{efeito} → o erro padrão dos efeitos

s^2 → a variância

n_n → é o número de repetições para cada ensaio.

v → é o número de grau de liberdade da variância.

2.12.5 - Construção de um modelo capaz de prever a magnitude da variável resposta

O modelo matemático, empírico, capaz de estimar as respostas y_1, y_2, \dots, y_n é mostrado pela Eq. 2.4

$$\hat{y}_n = b_0 + b_1 k_1 + b_2 k_2 + b_3 k_3 + \dots + b_n k_n + b_{(n+1)} k_1 k_2 + b_{(n+2)} k_1 k_3 + b_{(n+3)} k_2 k_3 + \dots + b_{(n+m)} k_{(n-1)} K_n + \varepsilon_e \quad (2.4)$$

Os valores dos coeficientes estimadores $b_0, b_1, b_2, \dots, b_{(n+m)}$ serão fornecidos pela equação matricial 2.5. O estimador da média global é b_0 enquanto que $b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$ são estimadores dos efeitos principais, $b_{(n+1)}, b_{(n+2)}, b_{(n+3)}, \dots, b_{(n+m)}$ são estimadores dos efeitos de interação e o erro ε_e deve ser caracterizado como uma grandeza com média igual a zero e variância constante e igual 1, $\varepsilon_e \cong N(0, 1)$. A estimativa do erro padrão (V_b), para cada coeficiente será dado pela raiz quadrada da diagonal da matriz V_b que pode ser obtido através da equação matricial 2.6.

$$b_{n+m} = (X^t X)^{-1} X.h \quad (2.5)$$

$$V_b = (X^t X)^{-1} s^2 \quad (2.6)$$

2.12.6 - Planejamento Fatorial fracionário 2^{k-p}

Foram relatados, anteriormente, inúmeros benefícios que o planejamento fatorial completo (PFC) pode trazer ao planejamento de experimentos. Estes benefícios são verificados, principalmente, em planejamentos que envolvem números de fatores reduzidos. Experimentos que envolvem apenas três fatores (2^3) necessitam de 8 ensaios. Em situações onde estão envolvidas sete variáveis de entrada (2^7) o planejamento irá exigir 128 ensaios,

sendo este um número consideravelmente grande, quando comparado com planejamento com apenas três variáveis de entradas. Deve ser levado em consideração um número ainda maior de ensaios, pois a avaliação do erro experimental exige a realização de réplicas.

Desta forma, na medida em que a quantidade de fatores aumenta o número de ensaios aumentará exponencialmente. Com isto será necessário um tempo maior durante a investigação, a elevação do custo da experimentação e a possibilidade de alguns fatores investigados não influenciar, de forma significativa, na resposta do processo.

Em situações em que a relação entre as variáveis de entrada e variáveis de saída são pouco conhecidas, falhas como a exclusão de fatores de elevada significância no processo poderão ocorrer. Torna-se necessário, neste caso, utilizar um número maior de fatores. Ao contrário do planejamento fatorial completo o planejamento fatorial fracionário poderá ser aplicado sem que ocorra o aumento do número de experimentos (BOX; HUNTER; HUNTER, 1978).

A principal aplicação do planejamento fatorial fracionário é a seleção de fatores de maior significância na etapa inicial do planejamento, quando este conta com um número elevado de variáveis de entrada. Conhecido os fatores de maior significância, um novo planejamento deve ser realizado (CALADO; MONTGOMERY, 2003).

Meia fração do planejamento fatorial completo

O planejamento fracionário mais utilizado é o meia fração do planejamento fatorial completo. Considerando planejamento fatorial completo 2^k , a sua meia fração será representado por $(1/2)2^k$. Neste caso será realizada a metade dos ensaios, pois $2^{-1} 2^k = 2^{k-1}$. A montagem da matriz de contraste tem a mesma seqüência do planejamento fatorial completo (PFC), até a coluna da variável de entrada representada por k_{n-1} , na penúltima coluna. A última coluna da variável de entrada, representada por k_n , será preenchida pelo produto dos níveis codificado de todas as outras variáveis de entrada $k_1, k_2, k_3, \dots, k_{n-1}$. Conforme o planejamento fatorial fracionário, este procedimento pode ser escrito da seguinte forma: $k_1.k_2.k_3 \dots k_{n-1} = k_n$.

Deve ser observado que a segunda coluna da matriz de contraste do PFC é formada por níveis que representam o valor médio dos ensaios. Para a matriz de contraste do planejamento fatorial fracionário a referida coluna deve ser substituída por outra chamada de coluna de identidade I, sendo esta definida pelo produto dos níveis codificados das variáveis: $I = k_n.k_n = k_1.k_2.k_3 \dots k_{n-1}.k_n$.

Com a redução do número de ensaios, conforme proposto pelo planejamento fatorial fracionário, o número de grau de liberdade do experimento será reduzido pela metade, fato que não permite estimativas independentes dos efeitos, principalmente aos efeitos de interações entre dois fatores. Em função deste acontecimento serão observadas algumas colunas idênticas na matriz de contraste, promovendo desta forma, a igualdade dos efeitos de interação ou principal, nos quais serão confundidos.

Na resolução de um planejamento fatorial fracionário aparecem três casos especiais, sendo eles planejamentos com resolução III, IV e V. O aparecimento dos mesmos é muito comum, sendo eles:

- Planejamento de resolução III - Nenhum efeito principal é confundido com outros efeitos principais, mas os efeitos principais confundem com interações entre dois fatores.
- Planejamento de resolução IV - Nenhum efeito principal é confundido com outros efeitos principais ou com efeitos de interação entre dois fatores, entretanto as interações entre dois fatores confundem com outras interações entre dois fatores.
- Planejamento de resolução V - Nenhum efeito principal ou com interações entre dois fatores é confundido com outros efeitos principais ou com interações entre dois fatores, mas interações entre dois fatores confundem com interações entre três fatores.

2.12.7 - Planejamento Fatorial 3^k

É o planejamento fatorial que permite a obtenção de Modelos de 2ª ordem. Para tanto, deve-se utilizar três níveis de cada variável, identificados por nível baixo (-1), nível médio (0) e nível alto (+1), sendo nível médio (0) a média aritmética entre os níveis (-1) e (+1). Tem a sua aplicação limitada em função do número de variáveis de controle, pois para um experimento que envolve duas variáveis de entrada, considerado mais simples, devem ser realizados 9 (3^2) ensaios enquanto que para quatro variáveis de entrada são necessários 81 (3^4) ensaios. Deve ser levado em consideração um número ainda maior de ensaios, pois a avaliação do erro experimental exige a realização de réplicas

Devido ao elevado esforço experimental que o planejamento fatorial 3^k exige alternativas mais eficientes para a mesma finalidade apareceram como as superfícies respostas e os planejamentos compostos.

Os procedimentos para a obtenção da matriz de contraste, a significância dos efeitos principais ou de interação e o modelo matemático do processo assemelham-se à metodologia aplicada para PFC. É importante salientar que será obtido um modelo matemático do 2ª ordem.

2.12.8 - Planejamento Composto Central (PCC)

O planejamento composto central (PCC) é um planejamento fatorial, completo ou fracionário, acrescido de pontos que permite a análise do experimento a partir de uma superfície de 2ª ordem. Este planejamento deve ser composto por três etapas, sendo elas:

- 1º - Planejamento Fatorial Completo (PFC) 2^k ou planejamento fracionário 2^{k-p} ;
- 2º - Ensaios com pontos axiais para uma variável $2k$ e
- 3º - Ensaios realizados no ponto central - n_2

Os ensaios $2k$ e n_2 são pontos adicionais que transformarão planejamento 2^k ou 2^{k-p} em PCC. Recomenda-se de 3 a 5 ensaios realizados no ponto central (n_2). Desta forma torna-se possível prever variância estável da resposta (CALADO; MONTGOMERY, 2003). Os ensaios com pontos axiais para uma variável devem ter o restante das variáveis completadas com o ponto central. Quantidade mínima de ensaios a ser realizados é dada por: $N = 2^k + 2k + n_2$. Sendo k o número de variáveis de entrada e n_2 o número de ensaios no centro. Esquemáticamente o PCC pode ser representado pela Fig. 2.49.

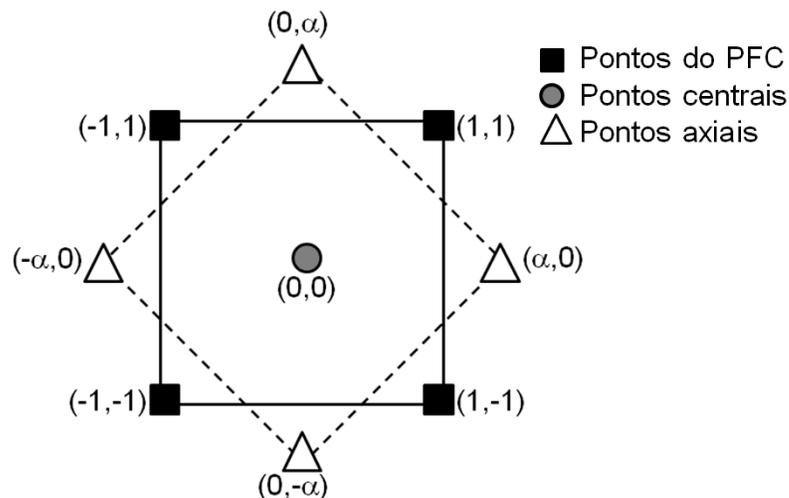


Figura 2.49 – Representação esquemática do PCC com os pontos do PFC, pontos centrais e pontos axiais

Conforme mostra a Fig. 2.49 serão necessários cinco níveis codificados para cada variável de entrada, sendo eles: $+\alpha$, $+1$, 0 , -1 e $-\alpha$. Considerando o PCC ortogonal, o valor do nível codificado para α , chamado de rotabilidade, geralmente deve ficar no intervalo de $1 < \alpha < \sqrt{k}$ e será dado pela Eq. (2.7).

$$\alpha = \left(\frac{QG}{4} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.7)$$

Os valores de Q e G são parâmetros ligados ao número de variáveis e ao número de ensaios realizados no ponto central e serão dados pelas Eq. (2.8) e (2.9), respectivamente.

$$Q = \left[(G + T)^{\frac{1}{2}} - G^{\frac{1}{2}} \right]^2 \quad (2.8)$$

$$G = 2^k \text{ e } T = 2k + n_2 \quad (2.9)$$

Através da Eq. (2.10) torna-se possível relacionar o valor do nível codificado com o nível original ou real das variáveis independentes. Torna-se necessário conhecer os níveis originais ou reais uma vez que os mesmos serão utilizados nos experimentos, ou seja, serão instalados, calibrados ou introduzidos nos equipamentos do processo, enquanto que os níveis codificados serão aplicados na matriz de contraste do planejamento.

$$\xi = 2 \frac{Xi - \bar{X}}{Xi_{(+1)} - Xi_{(-1)}} \quad (2.10)$$

O valor de ξ , na Eq. (2.10), representa o valor codificado das variáveis independentes. Enquanto \bar{X} , Xi , $Xi_{(+1)}$ e $Xi_{(-1)}$ identificam o valor médio, valor original, valor básico superior e valor básico inferior, respectivamente.

O modelo matemático completo, gerado pelo PCC, é mostrado na Eq. (2.11). O número de parâmetros do modelo irá depender da quantidade de variáveis de entrada que compõe o experimento e será determinado por $(k+1)(k+2)/2$ parâmetros (BARROS NETO et al., 2003). Num experimento com cinco variáveis de entrada tem-se 21 parâmetros, sendo que deve ser mostrado, no modelo matemático, apenas os parâmetros significativos.

$$y = \beta_0 + \sum_i \beta_i x_i + \sum_i \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon_e \quad (2.11)$$

Onde:

$\beta_0, \beta_i, \beta_j, \dots, \beta_k \rightarrow$ Parâmetros ou coeficientes do modelo;

$x_i, x_j, \dots, x_k \rightarrow$ Variáveis de entrada do experimento;

$\varepsilon_e \rightarrow$ erro experimental, com distribuição normal, $\varepsilon_e \cong N(0, 1)$.

2.12.9 - Metodologia da Superfície Resposta (MSR)

A metodologia da superfície de resposta (MSR) é uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas utilizadas para modelar e analisar problemas em que se desconhece a relação entre as variáveis de entrada e variáveis de saída, tendo como objetivo principal a otimização da resposta (MONTGOMERY, 2005). A MSR é uma técnica de otimização baseada em planejamentos fatoriais.

Na otimização das variáveis de saída de um determinado processo, quando utilizando a metodologia da superfície de resposta, três etapas distintas devem ser seguidas, conforme a seguinte seqüência: O planejamento de experimento, a modelagem e o deslocamento.

- O **planejamento de experimento** é a etapa onde se deve selecionar o planejamento adequado se PFC, 2^{k-p} , PCC. Conforme já foi visto, esta seleção depende da resposta pretendida, da quantidade de variáveis, entre outros.

- A **modelagem** é a escolha da relação matemática entre as variáveis de entrada e as de saídas. Nesta etapa é realizado o ajuste do modelo às respostas obtidas a partir do planejamento de experimento. Inicialmente deve ser utilizado um modelo mais simples, de 1ª ordem, no qual resultará numa superfície plana. Conforme o modelo matemático dado pela Eq. 2.12.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon_e \quad 2.12$$

Caso seja de interesse da investigação ou necessidade do processo, a análise de uma superfície com curvaturas será possível a partir da utilização de um modelo matemático de 2ª ordem, conforme mostrado na Eq. 2.11.

- O **deslocamento** é a maior inclinação para que a região, considerada ótima, seja atingida. Esta inclinação é o menor caminho entre os níveis investigados e o ponto considerado ótimo.

A Fig. 2.50 representa uma superfície resposta. Na mesma é mostrada os contornos de respostas $\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_6$ estimados conforme o modelo matemático. Mostra ainda a região considerada ótima, ou seja, a região de interesse do processo. O deslocamento pode ser observado pela seta de maior inclinação, sendo esta perpendicular aos contornos de respostas.

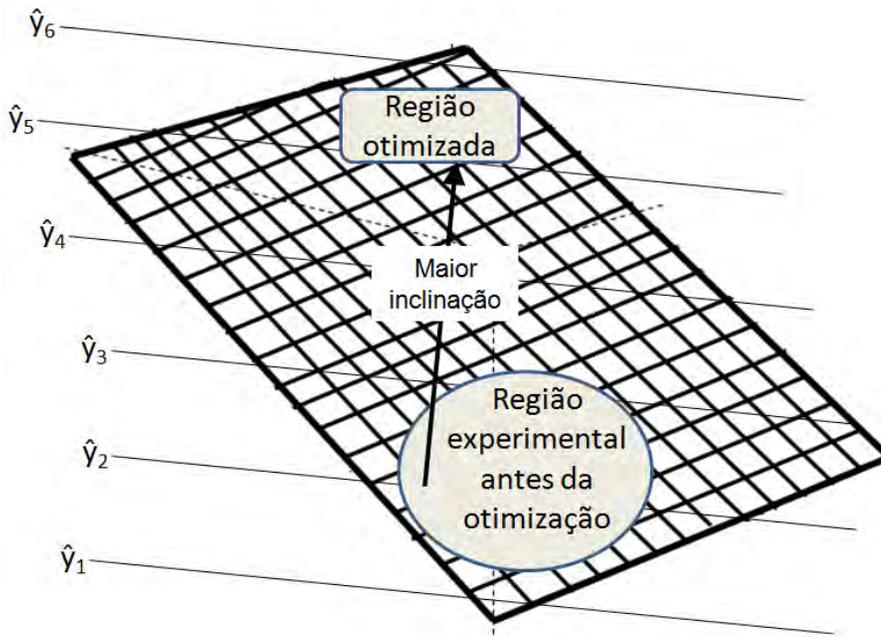


Figura 2.50 – Representação de uma superfície resposta

A superfície resposta, mostrada pela Fig. 2.51, descreve um determinado processo e foi obtida a partir de um modelo matemático, sendo que o mesmo pode ser de 1ª ordem, conforme a Eq. 2.13 ou de 2ª ordem, conforme a Eq. 2.14. No referido processo foi relacionada às variáveis de entrada x_1 e x_2 com a variável de saída y .

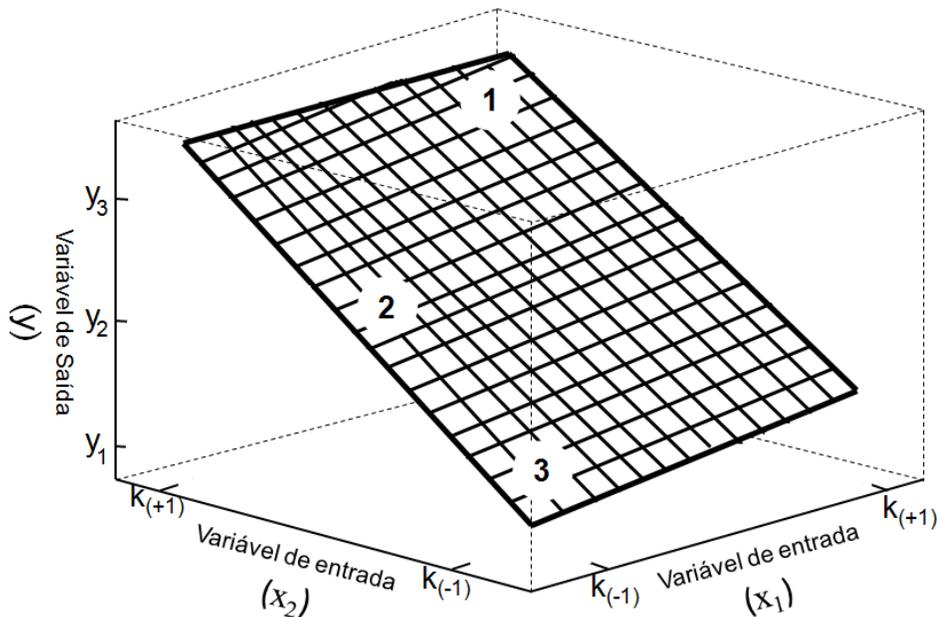


Figura 2.51 - Superfície resposta de um processo

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2 + \varepsilon_e \quad (2.13)$$

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_1^2 + b_3x_2 + b_4x_2^2 + b_5x_1x_2 + \varepsilon_e \quad (2.14)$$

No caso do processo identificado pela Fig. 2.51 a região 3, considerada resposta de interesse, ou seja região ótima, pode ser obtida com a utilização do nível $k_{(+1)}$ da variável x_2 e o nível $k_{(+1)}$ da variável x_1 . Cabe lembrar que o processo de otimização pelo método da MSR não permite identificar a região considerada ótima, ele identifica o nível da variável de saída de maior interesse do processo, neste caso próximo do nível y_3 . Portanto, o interesse pela região 3 sofreu influência da inclinação da superfície.

No mesmo processo representado pela Fig. 2.51 a região 2, quando considerada região otimizada, deve ser obtida se o nível da variável x_2 estiver próximo do valor médio entre $k_{(+1)}$ e $k_{(-1)}$, ou seja $[(k_{(+1)}+k_{(-1)})/2]$. Para a região 3, os níveis das variáveis x_1 e x_2 devem ser de $k_{(-1)}$ para as duas variáveis de entrada.

CAPÍTULO III

3 - Procedimento Experimental

Neste capítulo estão apresentados a descrição da metodologia empregada na realização dos ensaios, os equipamentos e ferramentas utilizadas em todo procedimento experimental, o material a ser usinado e o sistema da medição adotado.

3.1 - Metodologia

Os ensaios consistiram no fresamento de faceamento de corpos de prova, preparados previamente, em aço inoxidável PH 13 8Mo. Após a usinagem a rebarba formada na borda lateral do corpo de prova foi medida. Moldes com réplicas em silicone de condensação, da borda da peça com o “negativo” da rebarba foram produzidos. A seção transversal da rebarba formada na borda da peça foi obtida com o corte do molde de silicone em finas camadas. O molde de silicone, após o corte, foi levado ao microscópio ótico. Através de uma câmara CCD, instalada no microscópio, a imagem da rebarba foi gerada. Com o auxílio de um processador de imagem tornou-se possível obter a altura da rebarba. A Fig. 3.1 mostra o fluxograma de todo o processo, conforme descrito na metodologia, considerando o CP instalado na mesa da máquina ferramenta.

A realização dos ensaios foi dividida em duas etapas, sendo que na primeira foram investigadas as condições do processo, consideradas menos influentes, [aplicação do fluido de corte, geometria da ferramenta, carregamento da fresa (penetração de trabalho) e a profundidade de corte de transição da rebarba primária para a rebarba secundária]. O objetivo dos ensaios da primeira etapa foi de conhecer o comportamento das dimensões das rebarbas quando se variam estes parâmetros menos influentes. Conhecendo-se este comportamento, estas condições podem ser melhor selecionadas e fixadas para a

realização da segunda etapa, onde variáveis mais influentes (ou mais importantes) serão estudadas. Nesta segunda etapa foram realizados os ensaios que relacionam as principais variáveis de usinagem (velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, desgaste de flanco da ferramenta e ângulo de saída da peça) com a dimensão da rebarba.

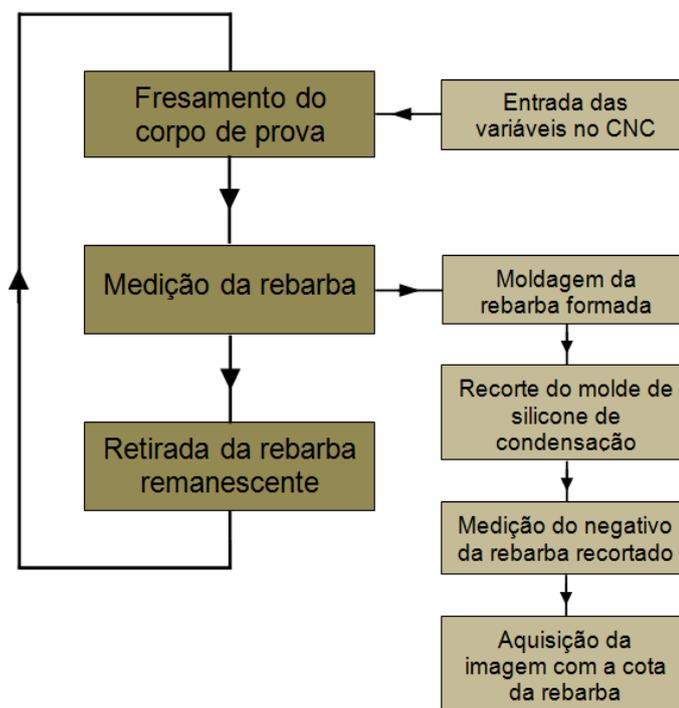


Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia adotada na realização dos ensaios

Com o objetivo de conhecer as características do material em estudo, serão realizados ensaios de dureza do aço inoxidável PH13 8Mo. Nesta mesma etapa também será obtida a microestrutura do mesmo.

3.1.1.- Primeira etapa dos ensaios

Nesta etapa analisou-se o comportamento da altura da rebarba em relação às cinco condições. Em cada condição estudada foram realizadas réplicas suficientes para obter uma tendência nas respostas dos ensaios. Sobre a borda em questão, foram escolhidos, de forma aleatória, dois pontos de medição da rebarba. Em cada um destes pontos foi escolhido duas medidas, também de forma aleatória. As condições de corte para esta análise serão apresentadas a seguir.

Aplicação do Fluido de Corte

Os métodos de aplicação de fluido de corte foram o jorro (ou vazão normal), baixa vazão e MQF. Também foram realizados ensaios a seco. As vazões para os três primeiros

métodos serão apresentados no item 4.2.1. Os parâmetros de corte utilizados: $V_c = 80$ m/min; $a_p = 0,8$ mm; $f_z = 0,112$ mm/z e $\Psi = 144^\circ$. As dimensões do material são de $106 \times 106 \times 57$ mm³. Para cada método de aplicação foram realizados dez ensaios, sendo um teste e nove réplicas. Em cada borda gerada pelo ensaio, obteve-se quatro medidas.

Geometria da fresa/ferramenta

Três fresas/ferramentas com geometrias diferentes foram testadas. Os parâmetros de corte e a dimensão do material foram os mesmos utilizados durante a investigação sobre a aplicação do fluido de corte, no parágrafo anterior. O corte foi realizado a seco. No total foram realizados treze ensaios, sendo doze réplicas. Realizou-se quatro medidas em cada borda.

Ferramentas de corte utilizadas, todas fabricadas pela Sandvik:

- Ferramenta 1 - Fresa R245-063Q22-12M e inserto R245-12T3E-ML1030 e R245-12T3E-PM 4040.
- Ferramenta 2 - Fresa 490-063Q22-08L e inserto 490R-08T308M-MM 2030.
- Ferramenta 3 - Fresa R210-063Q27-14M e inserto R210-14 05 12M-PM 1030.

Para a ferramenta 1 foram testados dois insertos com revestimentos diferentes. Mais detalhes destas ferramentas serão apresentados no item 3.2.2.

Carregamento da fresa

Foram utilizados três carregamentos diferentes, 90%, 60% e 30% da fresa, conforme o desenho da Fig. 3.2. Para manter o mesmo ângulo de saída da peça (Ψ), foram utilizados três corpos de prova com dimensões diferentes. Para o carregamento de 90% a peça deve ter dimensões de $106 \times 106 \times 57$ mm³, no carregamento de 60% a peça deve ter $106 \times 106 \times 38$ mm³ e finalmente dimensões de $106 \times 106 \times 19$ mm³ para carregamento de 30%. Foram realizados dez ensaios, sendo nove réplicas. Em cada borda da peça foram obtidas quatro medições.

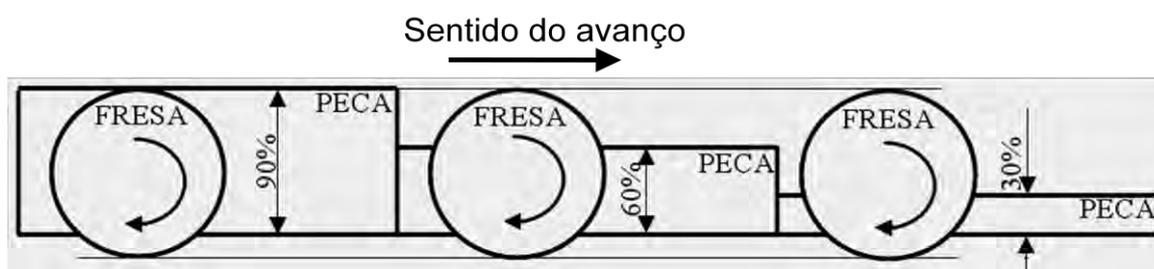


Figura 3.2 - Três tipos de carregamento da fresa a ser investigado

Os parâmetros de corte utilizados: $V_c = 80$ m/min; $a_p = 0,8$ mm; $f_z = 0,112$ mm/z e $\Psi = 144^\circ$.

Profundidade de transição

A obtenção da profundidade de transição de rebarba primária para a rebarba secundária será feita através da variação da profundidade de corte.

Os parâmetros de corte utilizados: $V_c = 80$ m/min; $f_z = 0,112$ mm/z. Foi utilizada duas penetração de trabalho, sendo uma de 40 mm e a outra de 57 mm. As profundidades de cortes ensaiadas foram de 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,1 e 2,2 mm. Para cada profundidade de corte foi realizada apenas um ensaio com quatro medições na borda.

Dimensão da rebarba remanescente

Inicialmente foram realizados 5 ensaios (5 passadas), a rebarba formada durante os ensaios não foram retiradas. Em seguida outros 5 ensaios (5 passadas) foram realizados e entre o ensaio anterior e o posterior a rebarba remanescente era retirada. Em cada caso foram realizadas oito medidas na borda em questão.

Os parâmetros de corte utilizados foram: $a_p = 0,5$ mm; $f_z = 0,112$ mm/z; $a_e = 57$ mm e $V_c = 80$ m/min.

3.1.2. - Segunda etapa dos ensaios

Os resultados dos ensaios da primeira etapa foram importantes na escolha das melhores condições para a realização dos ensaios na segunda etapa. Principalmente no método de aplicação do fluido de corte, geometria da fresa/ferramenta e na formação da rebarba remanescente.

Nesta etapa foi investigada a participação das principais variáveis de usinagem na formação da rebarba. Foram utilizados dois corpos de provas. A geometria dos mesmos será apresentada no item 3.2.1.

Conforme a literatura, explorada no capítulo dois, alguns parâmetros de usinagem têm maior importância na formação da rebarba. Observando este detalhe, optou-se pela manipulação das seguintes variáveis de usinagem:

- O desgaste de flanco médio ($VB_{\text{Bmédio}}$);
- O ângulo de saída da peça (Ψ);
- A profundidade de corte (a_p);
- O avanço por dente (f_z) e
- A velocidade de corte (V_c).

O arranjo entre as mesmas durante os ensaios e o nível de cada variável foi determinado por planejamento de experimentos - *DOE*. Foi realizada a medição da altura (h) da rebarba em três pontos distintos, na borda de saída da peça. O item 3.1.5 descreve o sistema de medição adotado.

Ainda foram documentados, através de fotografias, os três prováveis tipos de rebarba que podem aparecer nas bordas, sendo elas a do tipo faca, tipo onda e tipo caracol. O tipo da rebarba formada na borda dependerá dos níveis das variáveis em questão.

O comportamento da dimensão da rebarba em relação às cinco variáveis de usinagem em estudo será analisado com a utilização de um DOE do tipo planejamento composto central (PCC). Devido a esse PCC, proposto, tornou-se necessário a utilização de cinco níveis para cada variável. O modelo do planejamento identificando as variáveis de entrada e de saída são mostrados nos diagramas de bloco da Fig. 3.3.

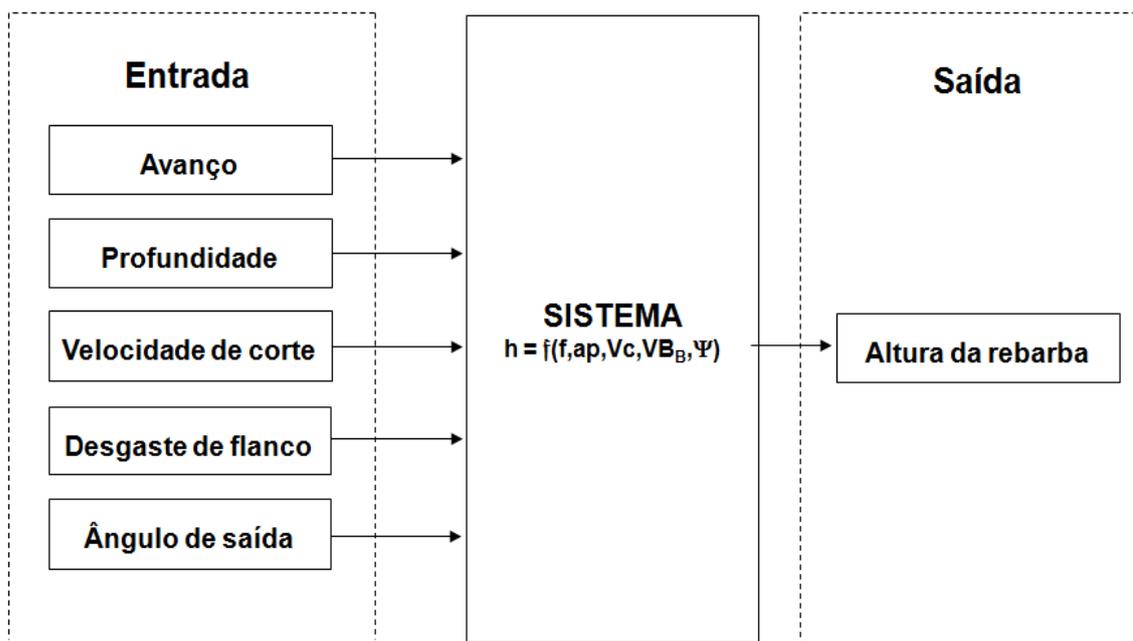


Figura 3.3 - Diagrama de bloco com a identificação das variáveis de entrada e de saída aplicadas no planejamento de experimentos - *DOE*

Os dois níveis básicos, utilizados no PFC 2⁵, para cada variável de entrada tiveram seus valores selecionados considerando as ferramentas de corte, conforme catálogo do fabricante, e a capacidade da máquina ferramenta utilizada. Quanto aos outros três níveis para a complementação do PCC, foram estabelecidos pelo próprio planejamento.

3.1.3 - Planejamento Composto Central do experimento

Conforme descrito no item 2.12.8 o planejamento composto central (PCC) proposto, foi composto por três etapas, sendo elas:

- O Planejamento Fatorial Completo - PFC (2^k),
- Os ensaios com pontos axiais para uma variável ($2k$) e
- Ensaios realizados no ponto central (n_2).

Os ensaios realizados nos pontos axiais e centrais foram os responsáveis pela transformação do PFC 2^k em PCC. Foram realizados três ensaios no ponto central. Quantidade de ensaios a ser realizados é dada por: $N = 2^k + 2k + n_2$. Considerando $K = 5$ e $n_2 = 3$ o número de ensaios N é de 45.

Na tabela 3.1 é mostrada a matriz de contraste do planejamento. Os valores codificados dos níveis das variáveis independentes são: $+\alpha$, $+1$, 0 , -1 e $-\alpha$, sendo o valor do nível codificado de α dado pela Eq. (2.7), juntamente com as Eqs. (2.8) e 29. Portanto, para o PCC proposto o α calculado vale 1,7244.

Utilizando a Eq. (2.10) torna-se possível determinar o valor do nível real ou original das variáveis independentes. O nível real ou original para cada variável utilizada no planejamento é mostrado na Tab. 3.2

Devido à dificuldade de instalação do ângulo Ψ no conjunto peça/máquina ferramenta, utilizou-se o programa Auto CAD para determinar a posição da fresa, em relação à peça, de maneira que o posicionamento entre eles venha proporcionar um ângulo Ψ próximo daquele determinado pela Eq. (2.10) e mostrado na última linha da Tab. 3.2.

Conhecido o diâmetro da fresa de topo utilizada para a abertura dos sulcos nos CPs, durante a preparação dos mesmos, e ainda o diâmetro da fresa de faceamento utilizada nos ensaios, tornou-se possível obter a construção geométrica mostrada na Fig. 3.4, sendo a Fig. 3.4a para o corpo de prova 1 e a Fig. 3.4b para o corpo de prova 2. Desta forma, o posicionamento fresa de faceamento sobre o corpo de prova foi determinado.

A posição correta da fresa sobre os CPs, de forma a gerar os cinco ângulos de saída da peça (Ψ), depende do diâmetro da fresa de faceamento e da geometria dos CPs. A geometria dos CPs foi previamente preparada de forma a proporcionar o mesmo carregamento da fresa a todos os ensaios. As fresas de faceamento tiveram o seu diâmetro selecionado em função das dimensões do material a ser usinado e da disponibilidade junto ao fabricante.

Tabela 3.1 - Matriz de contraste proposta

| Nº Ensaio | Variáveis Independentes | | | | |
|-----------|-------------------------|----|----------------|----------------|----------------|
| | VB _B | Ψ | a _p | f _z | V _c |
| 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 2 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 |
| 3 | -1 | -1 | -1 | +1 | -1 |
| 4 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 |
| 5 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 |
| 6 | -1 | -1 | +1 | -1 | +1 |
| 7 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 |
| 8 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 |
| 9 | -1 | +1 | -1 | -1 | -1 |
| 10 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 |
| 11 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 |
| 12 | -1 | +1 | -1 | +1 | +1 |
| 13 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 |
| 14 | -1 | +1 | +1 | -1 | +1 |
| 15 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 |
| 16 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 |
| 17 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 18 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 |
| 19 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 |
| 20 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 |
| 21 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 |
| 22 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 |
| 23 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 |
| 24 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 |
| 25 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 |
| 26 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 |
| 27 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 |
| 28 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 |
| 29 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 |
| 30 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 |
| 31 | +1 | +1 | +1 | +1 | -1 |
| 32 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 |
| 33 | -α | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 34 | +α | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 35 | 0 | -α | 0 | 0 | 0 |
| 36 | 0 | +α | 0 | 0 | 0 |
| 37 | 0 | 0 | -α | 0 | 0 |
| 38 | 0 | 0 | +α | 0 | 0 |
| 39 | 0 | 0 | 0 | -α | 0 |
| 40 | 0 | 0 | 0 | +α | 0 |
| 41 | 0 | 0 | 0 | 0 | -α |
| 42 | 0 | 0 | 0 | 0 | +α |
| 43 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 44 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabela 3.2 – Variáveis de entrada com seus respectivos níveis

| Variável de entrada | Níveis | | | | |
|---------------------------|---------------------------|----------------------|-----------|----------------------|---------------------------|
| | Menor Ponto ($-\alpha$) | Básico inferior (-1) | Médio (0) | Básico superior (+1) | Maior Ponto ($+\alpha$) |
| Vc (m/min) | 70 | 85 | 105 | 125 | 140 |
| fz (mm/dente) | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,12 |
| ap (mm) | 0,35 | 0,5 | 0,7 | 0,9 | 1,04 |
| VB _{Bmédio} (mm) | 0,02 | 0, 10 | 0,20 | 0, 30 | 0,38 |
| $\Psi(^{\circ})$ | 47° | 67° | 94,5° | 122° | 141° |

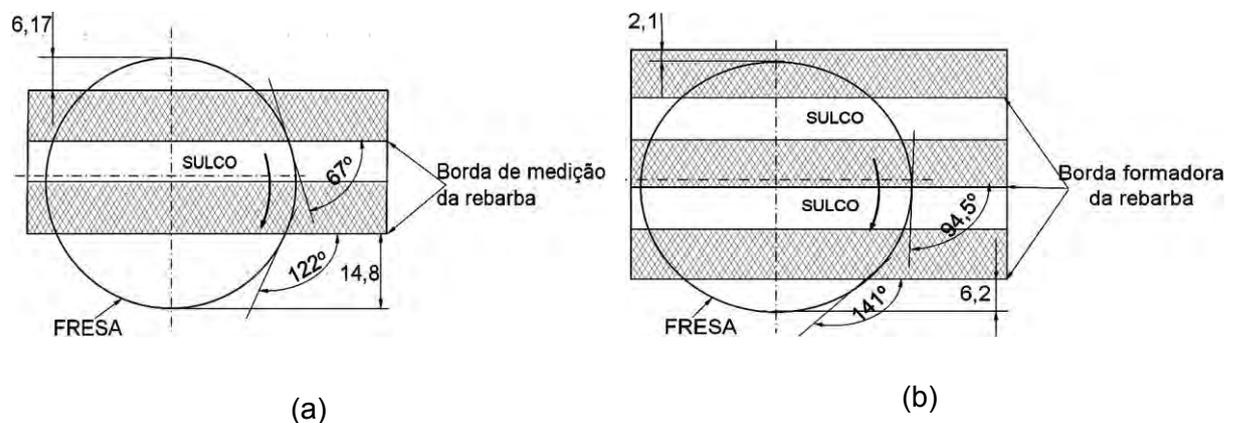


Figura 3.4 - Construção geométrica com o posicionamento da fresa de faceamento em relação ao corpo de prova, gerado pelo auto CAD. a)-CP 1 e b)-CP 2

Conhecidos a geometria dos CPs e o diâmetro da fresa de faceamento, utilizou-se o Auto CAD para localizar a melhor posição do CP sobre a mesa da fresadora, em relação a fresa de faceamento. Nesta etapa, observou-se que o valor mínimo do ângulo de saída da peça [$\Psi_{(-\alpha)} = 47^{\circ}$], formado no CP 2 é geometricamente impossível de ser obtido, para as condições propostas. Pode-se obter um ângulo de saída da peça [$\Psi_{(-\alpha)}$] neste valor, mas para um a_e menor, de 9,82 mm, conforme ilustrado na Fig. 3.5a. Para o a_e proposto, de 13 mm, o ângulo de saída da peça [$\Psi_{(-\alpha)}$] mede 54° , sendo mostrado na Fig. 3.5b. Desta forma, a altura da rebarba para o ângulo $\Psi_{(-\alpha)} = 47^{\circ}$ teve que ser estimado por análise de regressão, utilizando os resultados obtidos para os ângulos de $\Psi_{(94,5^{\circ})}$, $\Psi_{(141^{\circ})}$, $\Psi_{(54^{\circ})}$, $\Psi_{(98^{\circ})}$ e $\Psi_{(151^{\circ})}$. A partir dos ensaios 43, 44 e 45, foi obtido altura da rebarba para o ângulo $\Psi_{(94,5^{\circ})}$,

enquanto que para o ângulo $\Psi_{(141^\circ)}$ utilizou-se o ensaio 36. Para esta finalidade foram realizados ensaios especiais com os ângulos $\Psi_{(54^\circ)}$, $\Psi_{(98^\circ)}$ e $\Psi_{(151^\circ)}$.

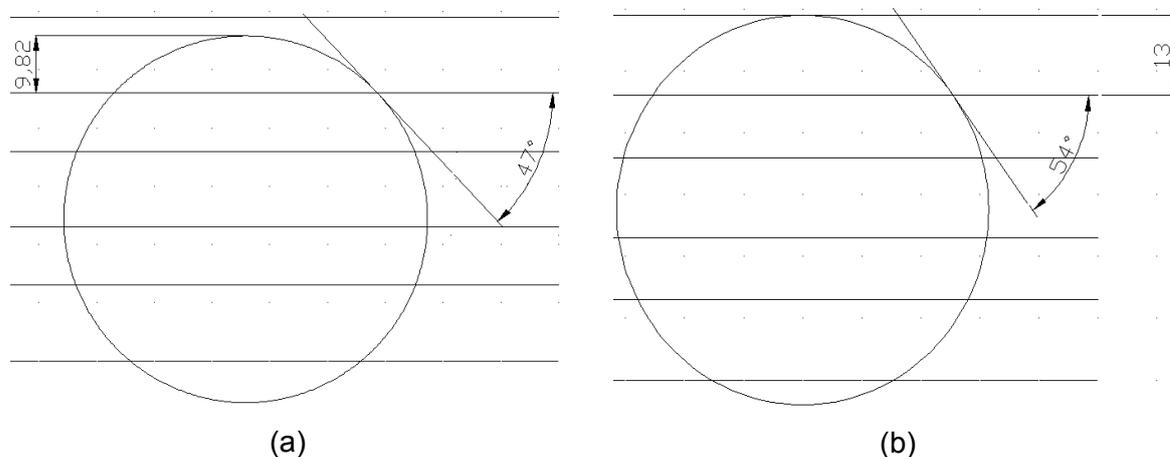


Figura 3.5 - Construção geométrica para a obtenção do ângulo $\Psi_{(-\alpha)}$. a) - penetração de trabalho para o ângulo de saída da peça de 47° , b) - ângulo de saída da peça para uma penetração de trabalho de 13 mm

Os ensaios propostos pelo PCC serão apresentados na Tab. 3.3. Conforme a mesma até o ensaio de número 32 pertence ao Planejamento Fatorial 2^k . Os ensaios entre os números 33 e 42 representam os pontos axiais, enquanto os três últimos os ensaios dos pontos centrais. V_f é velocidade de avanço da mesa durante o fresamento e n a rotação do eixo arvore.

Foram realizadas três réplicas, de forma aleatória, de cada ensaio. Esse procedimento permitiu fazer uma estimativa do erro experimental, pois com a análise da variância será possível verificar as dimensões dos resíduos. No total foram realizados 180 ensaios ($45 + 3 \times 45 = 180$).

3.1.4 - Realização dos ensaios

O processo de fresamento de faceamento pode ser representado conforme Fig. 3.6. Na mesma observa-se a superfície gerada pelo corte e a borda de saída, onde será formada a rebarba. A formação da rebarba, na borda de saída da peça, durante o processo de fresamento de faceamento é o principal objetivo deste estudo. A operação na qual é responsável pelo surgimento de uma nova superfície usinada e por conseqüência uma nova borda de saída foi chamada de ensaio.

Tabela 3.3 - Número dos ensaios com os respectivos valores das variáveis de entrada

| Nº do ensaio | VB _{Bmédio} (mm) | (Ψ) (°) | a _p (mm) | Dados do f | | Dados da Vc | |
|--------------|---------------------------|---------|---------------------|------------|-------------|-------------|---------|
| | | | | fz (mm/z) | Vf (mm/min) | Vc (m/min) | n (rpm) |
| 1 | 0,10 | 67 | 0,5 | 0,06 | 25,77 | 85 | 429 |
| 2 | 0,10 | 67 | 0,5 | 0,06 | 37,90 | 125 | 632 |
| 3 | 0,10 | 67 | 0,5 | 0,10 | 42,95 | 85 | 429 |
| 4 | 0,10 | 67 | 0,5 | 0,10 | 63,16 | 125 | 632 |
| 5 | 0,10 | 67 | 0,9 | 0,06 | 25,77 | 85 | 429 |
| 6 | 0,10 | 67 | 0,9 | 0,06 | 37,90 | 125 | 632 |
| 7 | 0,10 | 67 | 0,9 | 0,10 | 42,95 | 85 | 429 |
| 8 | 0,10 | 67 | 0,9 | 0,10 | 63,16 | 125 | 632 |
| 9 | 0,10 | 122 | 0,5 | 0,06 | 25,77 | 85 | 429 |
| 10 | 0,10 | 122 | 0,5 | 0,06 | 37,90 | 125 | 632 |
| 11 | 0,10 | 122 | 0,5 | 0,10 | 42,95 | 85 | 429 |
| 12 | 0,10 | 122 | 0,5 | 0,10 | 63,16 | 125 | 632 |
| 13 | 0,10 | 122 | 0,9 | 0,06 | 25,77 | 85 | 429 |
| 14 | 0,10 | 122 | 0,9 | 0,06 | 37,90 | 125 | 632 |
| 15 | 0,10 | 122 | 0,9 | 0,10 | 42,95 | 85 | 429 |
| 16 | 0,10 | 122 | 0,9 | 0,10 | 63,16 | 125 | 632 |
| 17 | 0,30 | 67 | 0,5 | 0,06 | 25,77 | 85 | 429 |
| 18 | 0,30 | 67 | 0,5 | 0,06 | 37,90 | 125 | 632 |
| 19 | 0,30 | 67 | 0,5 | 0,10 | 42,95 | 85 | 429 |
| 20 | 0,30 | 67 | 0,5 | 0,10 | 63,16 | 125 | 632 |
| 21 | 0,30 | 67 | 0,9 | 0,06 | 25,77 | 85 | 429 |
| 22 | 0,30 | 67 | 0,9 | 0,06 | 37,90 | 125 | 632 |
| 23 | 0,30 | 67 | 0,9 | 0,10 | 42,95 | 85 | 429 |
| 24 | 0,30 | 67 | 0,9 | 0,10 | 63,16 | 125 | 632 |
| 25 | 0,30 | 122 | 0,5 | 0,06 | 25,77 | 85 | 429 |
| 26 | 0,30 | 122 | 0,5 | 0,06 | 37,90 | 125 | 632 |
| 27 | 0,30 | 122 | 0,5 | 0,10 | 42,95 | 85 | 429 |
| 28 | 0,30 | 122 | 0,5 | 0,10 | 63,16 | 125 | 632 |
| 29 | 0,30 | 122 | 0,9 | 0,06 | 25,77 | 85 | 429 |
| 30 | 0,30 | 122 | 0,9 | 0,06 | 37,90 | 125 | 632 |
| 31 | 0,30 | 122 | 0,9 | 0,10 | 42,95 | 85 | 429 |
| 32 | 0,30 | 122 | 0,9 | 0,10 | 63,16 | 125 | 632 |
| 33 | 0,02 | 94,5 | 0,70 | 0,08 | 42,44 | 105 | 531 |
| 34 | 0,38 | 94,5 | 0,70 | 0,08 | 42,44 | 105 | 531 |
| 35 | 0,20 | 47 | 0,70 | 0,08 | 42,44 | 105 | 531 |
| 36 | 0,20 | 141 | 0,70 | 0,08 | 42,44 | 105 | 531 |
| 37 | 0,20 | 94,5 | 0,35 | 0,08 | 42,44 | 105 | 531 |
| 38 | 0,20 | 94,5 | 1,00 | 0,08 | 42,44 | 105 | 531 |
| 39 | 0,20 | 94,5 | 0,70 | 0,04 | 21,22 | 105 | 531 |
| 40 | 0,20 | 94,5 | 0,70 | 0,12 | 63,66 | 105 | 531 |
| 41 | 0,20 | 94,5 | 0,70 | 0,08 | 28,30 | 70 | 354 |
| 42 | 0,20 | 94,5 | 0,70 | 0,08 | 56,59 | 140 | 707 |
| 43 | 0,20 | 94,5 | 0,70 | 0,08 | 42,44 | 105 | 531 |
| 44 | 0,20 | 94,5 | 0,70 | 0,08 | 42,44 | 105 | 531 |
| 45 | 0,20 | 94,5 | 0,70 | 0,08 | 42,44 | 105 | 531 |

A seqüência de procedimentos tomados durante a execução dos ensaios será descrita a seguir, considerando a peça já instalada no sistema de fixação e a fresa com a ferramenta de corte montada no eixo árvore da máquina.

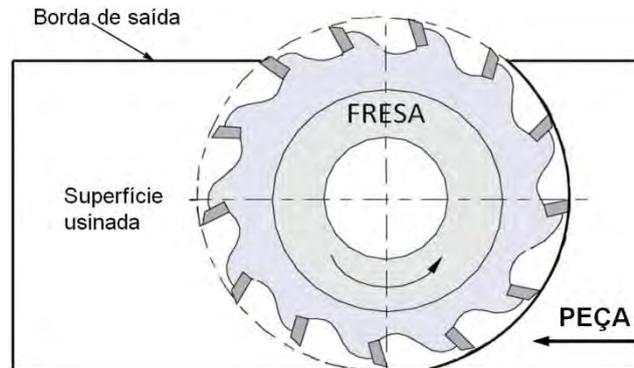
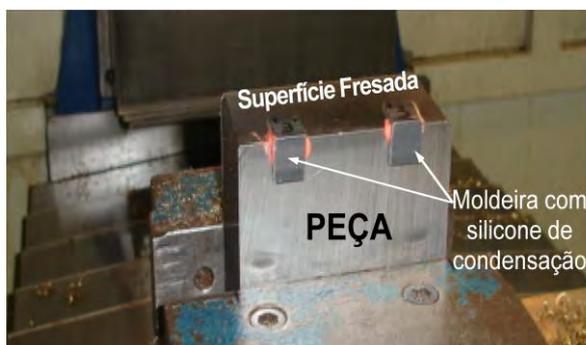
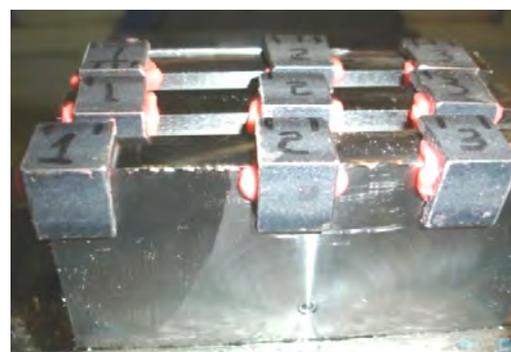


Figura 3.6 - Processo de fresamento de faceamento discordante e a borda de formação da rebarba

- Nova edição do programa no centro de usinagem, pois as condições de corte eram alteradas em cada ensaio, conforme a Tab. 3.3.
- Execução do ensaio, que consiste na geração da superfície usinada e a formação da rebarba na borda de saída, conforme Fig. 3.6.
- Moldagem da borda com a rebarba gerada, em dois pontos para ensaios da primeira etapa e três pontos distintos para os ensaios da segunda etapa, conforme mostra a imagem da Fig. 3.7
- Após a “cura” do silicone de condensação, a moldagem deve ser desfeita. Dá-se o início de preparação dos “negativos” das bordas. No item 3.1.5 será melhor detalhado o sistema de medição adotado.



(a)



(b)

Figura 3.7 - Moldagem da borda com a sua rebarba. (a) - Moldagem da rebarba para os ensaios da primeira etapa, (b) - Moldagem da rebarba para os ensaios da segunda etapa

- Retirada da rebarba remanescente. Esta deve ser feita sem alterar o ângulo de inclinação da superfície livre da peça (φ_s), mostrado na Fig. 2.30. Conforme Schäfer (1975), citado por Gillespie (1999), a variação do φ_s proporcionará alterações na dimensão da rebarba.

- O desgaste de flanco médio da ferramenta de corte foi medido após a realização de cada três ensaios. Estas medições tiveram o propósito de monitorar o desgaste, de forma a mantê-lo no valor requerido pelo ensaio. Nos ensaios onde as condições de corte foram consideradas mais críticas, principalmente quando o nível do desgaste, a ser utilizado, tinha valor igual ou superior a 0,30 mm, a inspeção do mesmo ocorria a cada dois ensaios.

- Posteriormente a obtenção dos “negativos” de silicone de condensação, um sistema de aquisição de imagens foi usado para medir e documentar as dimensões da rebarba. No item 3.2.2 será descrito o sistema de aquisição utilizado.

3.1.5 - Sistema de medição das rebarbas

Através de um sistema de medição, pelo método indireto, foi obtida a altura da rebarba formada na borda de saída da fresa, identificada na Fig. 2.18a como rebarba 9. Para tanto, foi aplicada uma técnica de moldagem da rebarba com uma massa de silicone de condensação. Posteriormente o molde, com a imagem “negativa” da rebarba, foi levado ao microscópio óptico. Através de uma câmera CCD, a imagem é enviada a um sistema de aquisição, onde através do mesmo é possível determinar as dimensões da rebarba.

Com a pasta de silicone de condensação já preparada (mistura do fluido Polisiloxano com o catalisador Alquil Estanho Siloxano em tempo máximo de 30 segundos), esta era depositada sobre a moldeira metálica, que em seguida era colocada sobre a borda da peça com a rebarba, permanecendo sobre a mesma por volta de 1 minuto e 15 segundos, até ocorrer a “cura” completa da pasta. Em seguida a moldeira com a pasta é retirada da borda da peça, considerando a solidificação completa da pasta.

Inicia-se então o preparo do molde. O silicone de condensação, já solidificado, deve ser fatiado em finas camadas. O paralelismo entre as faces das mesmas deve ser observado. As finas camadas obtidas são conduzidas até o microscópio óptico, onde é notada a revelação do “negativo” da rebarba. Com o auxílio de uma câmera CCD, de alta resolução, e um software de aquisição de imagem, a dimensão do “negativo” da rebarba foi medida e armazenada. A Fig. 3.8 mostra a seqüência do processo. No Anexo I do capítulo 8 é mostrado algumas imagens das rebarbas obtidas pelo sistema de medição adotado.

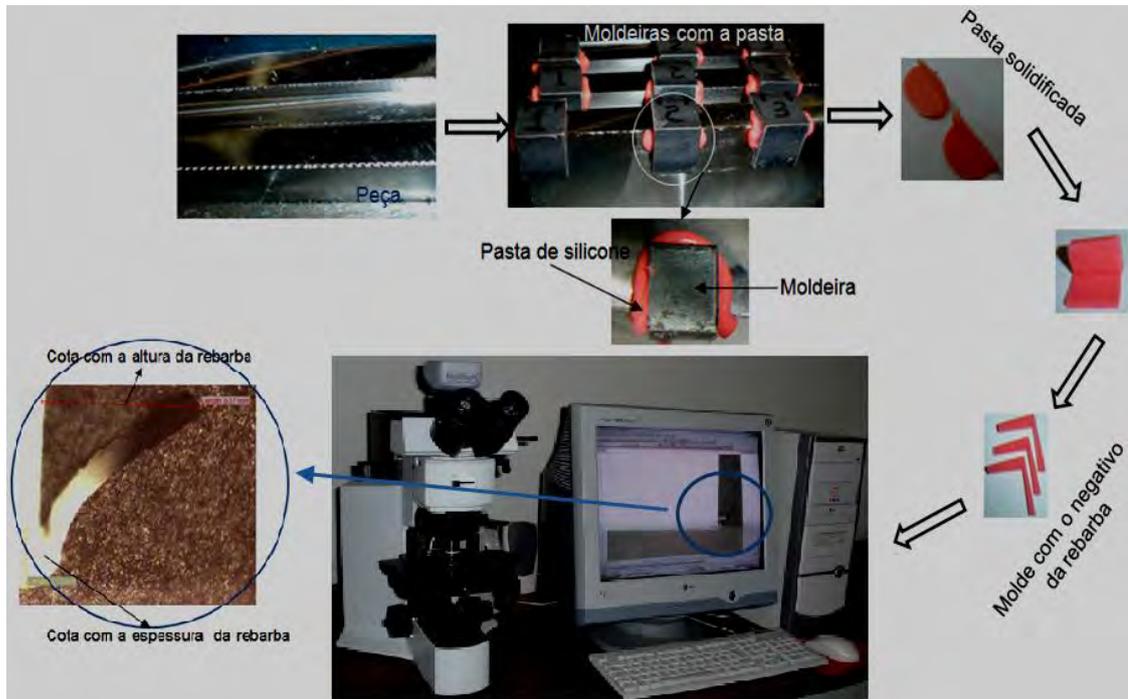


Figura 3.8 - Representação esquemática do sistema de medição adotado

Neste processo é importante observar o tempo entre a “cura” do silicone de condensação e a medição do negativo da rebarba no microscópio, pois, conforme informações do fabricante do silicone, poderão ocorrer variações dimensionais, isto é, pequenas reduções na dimensão real da rebarba (valor experimental de até 0,03 mm) em função do tempo elevado. Assim, as medições ocorreram no máximo em 72 horas após a “cura” completa do silicone de condensação, para evitar erros.

Conforme comentário anterior, a rebarba foi medida em dois pontos distintos para os ensaios da primeira etapa e em três pontos para os ensaios da segunda etapa, conforme mostra a Fig. 3.9. Em cada ponto de medição foram obtidas, de forma aleatória, duas medidas. Portanto, na primeira etapa, foi possível obter quatro medidas em todos os ensaios, sendo três repetições. Na segunda etapa foram obtidas seis medidas para os ensaios, sendo cinco repetições. A Fig. 3.9 mostra os três pontos de medições, as duas medidas já recortadas e as seis medidas da borda, isto para um único ensaio.

A posição do molde, com a réplica da rebarba, sobre a mesa do microscópio é de fundamental importância na identificação da altura da rebarba na imagem revelada. Para uma maior agilidade nas medições adotou-se a mesma posição para todos os moldes. Da mesma forma adotou-se o mesmo critério para cotar a altura da rebarba em todas as medidas, sendo, este critério, mostrado na Fig. 3.10.

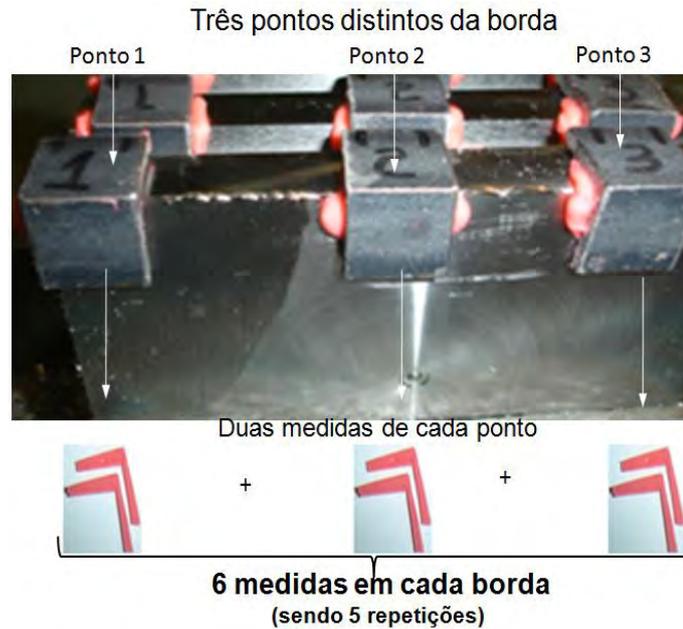


Figura 3.9 – Pontos de medição da rebarba na borda

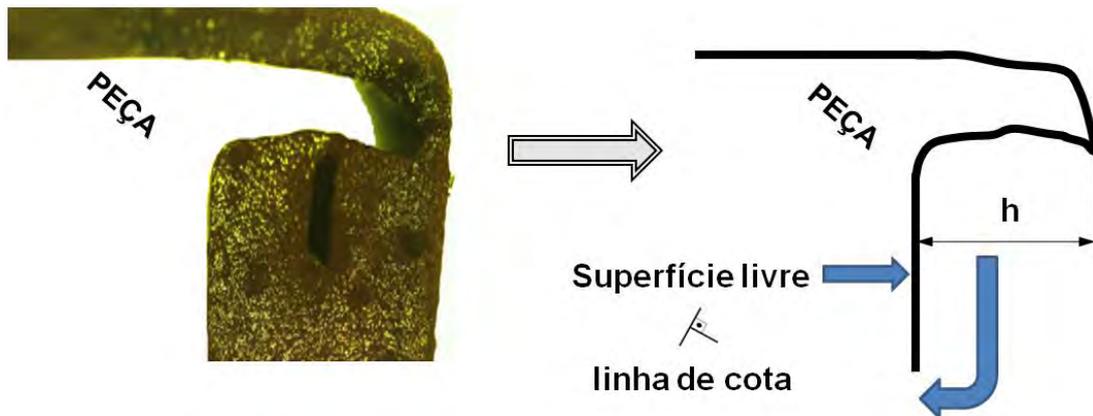


Figura 3.10 - Forma de cotação da altura rebarba revelada pelo sistema de aquisição de imagem adotado

Adotando sempre a mesma forma de cotação da altura rebarba para todos os ensaios, a ocorrência de erros tem a sua possibilidade reduzida. Conforme a Fig. 3.10 a linha de cota da altura de rebarba deve ser perpendicular à superfície livre da peça, pois ela forma com a superfície fresada, um ângulo nominal de 90°.

3.2 - Materiais e Equipamentos Utilizados

3.2.1 - Material a ser usado

O material utilizado, durante os ensaios, foi fornecido pela Villares Metals S.A. Trata-se do aço inoxidável martensítico endurecido por precipitação, solubilizado e envelhecido,

identificado por ABNT PH 13 8Mo (S13800). A composição química é mostrada na Tab. 3.4, enquanto a Tab. 3.5 apresenta as principais propriedades físicas e mecânicas do material, considerando a condição de tratamento térmico H 1050.

Tabela 3.4 - Composição do aço Inoxidável ABNT PH 13 8Mo (S13800) (Conforme catálogo de aços inoxidáveis da Villares Metals, 2008)

| Composição (% em peso) | | | | | | | |
|------------------------|--------|--------|--------|---------|---------------------|-------------------|-------------------|
| C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo |
| ≤ 0,045 | ≤ 0,10 | ≤ 0,10 | ≤ 0,01 | ≤ 0,002 | 12,25 a 12,90 | 8,00 a 8,50 | 2,00 a 2,50 |

Tabela 3.5 - Propriedades mecânicas do aço Inoxidável ABNT (N4534) PH 13-8 Mo (HIGH TEMP METALS INC, 2010)

| Propriedades | PH 13 8 Mo |
|------------------------|------------|
| Modulo de elasticidade | 195GPa |
| Limite de resistência | 1310MPa |
| Limite de Escoamento | 1241MPa |
| Alongamento | 15% |
| Temperatura de Fusão | 1440° C |
| Calor Específico | 420J/KgK° |

O valor médio da dureza do PH 13 8Mo é de 44 HRC. Nas cinco medidas realizadas foram encontrados os seguintes valores: 45, 43, 44, 43 e 45 HRC. A microestrutura martensítica do aço PH 13 8Mo é mostrada na Fig. 3.11. A sua obtenção ocorreu a partir do exame metalográfico convencional.

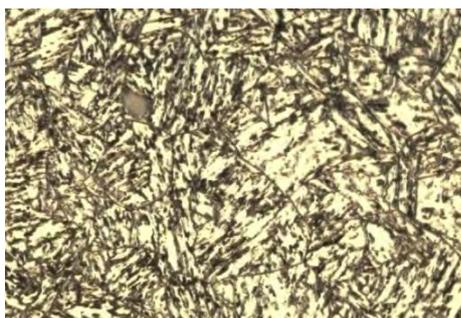


Figura 3.11 - Microestrutura do aço inoxidável PH 13 8Mo, (ampliação x 1000 vezes, Reagente: Água Régia)

Geometria dos corpos de prova

Na primeira etapa dos ensaios (pre-testes) foram utilizados corpos provas com a dimensão de 106x106x57 m³. Os dois modelos de corpos de provas utilizados na segunda parte dos ensaios devem ter o formato e dimensões mostradas nas Fig. 3.12 e 3.13. A

disposição proposta permite uma maior quantidade de repetições dos ensaios por corpo de prova. Assim, estes CPs devem ser preparados por usinagem, previamente.

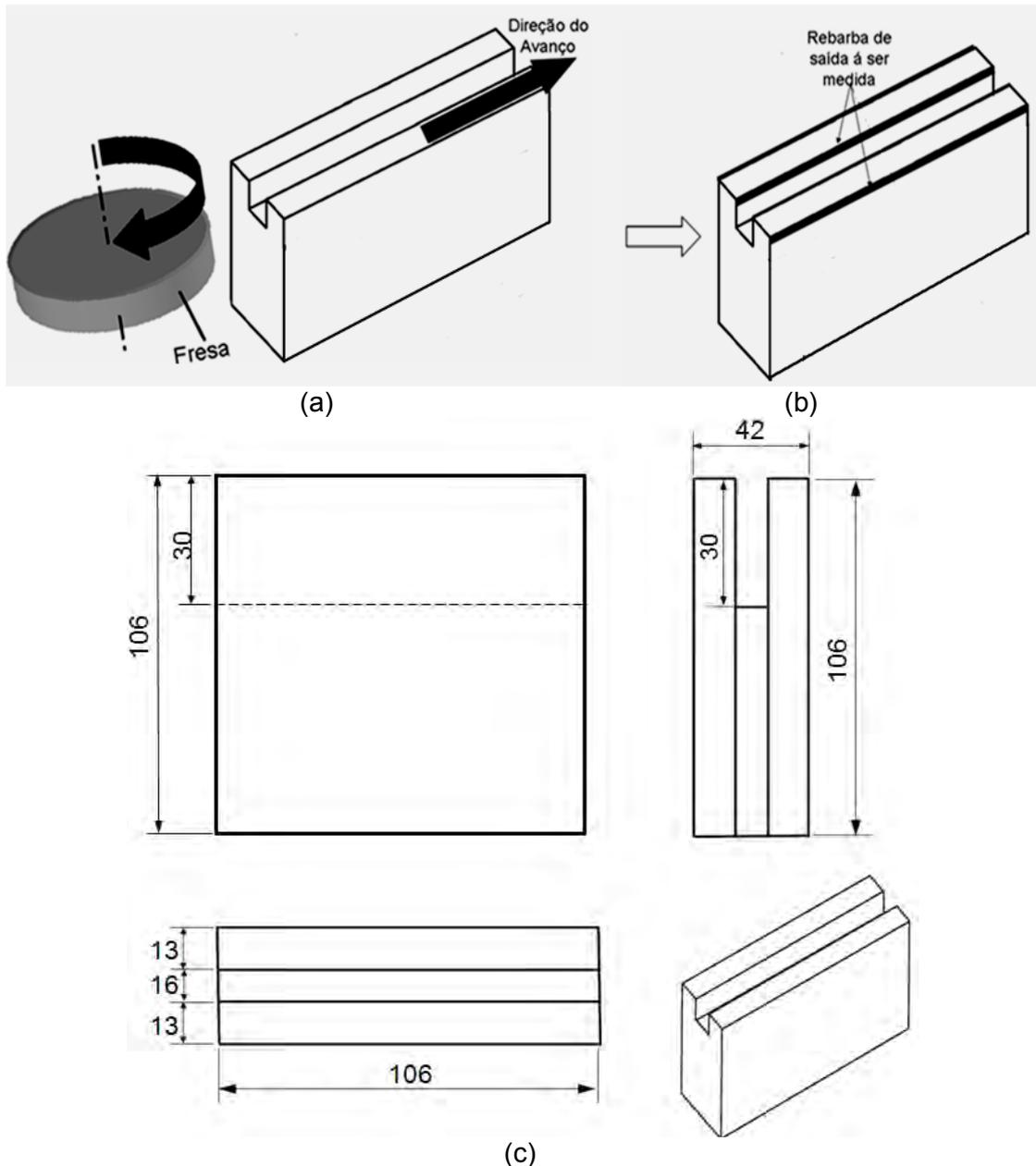


Figura 3.12 - Geometria do CP 1. Foram utilizados entre os ensaios 1 e 32 da segunda etapa, conforme Tab. 3.3. a) - Processo de fresamento com o sentido de avanço e rotação da fresa, b) - local da rebarba formada, c) - Dimensões do CP 1 com as vistas

Esquema de obtenção dos corpos de prova

A retirada dos corpos de prova foram feitas de forma transversal, conforme a Fig. 3.14. Após a retirada, o CP foi levado a fresadora para a posterior abertura dos sulcos, conforme Figs. 3.12 e 3.13

3.2.2 - Equipamentos Utilizados

A maioria dos ensaios foram realizados nas dependências do Instituto Federal de Goiás - Unidade Goiânia. A usinagem dos CPs aconteceu no laboratório de usinagem. As medições da rebarba e do desgaste de flanco da superfície de folga das ferramentas foram feitas no laboratório de materiais de construção mecânica da mesma instituição.

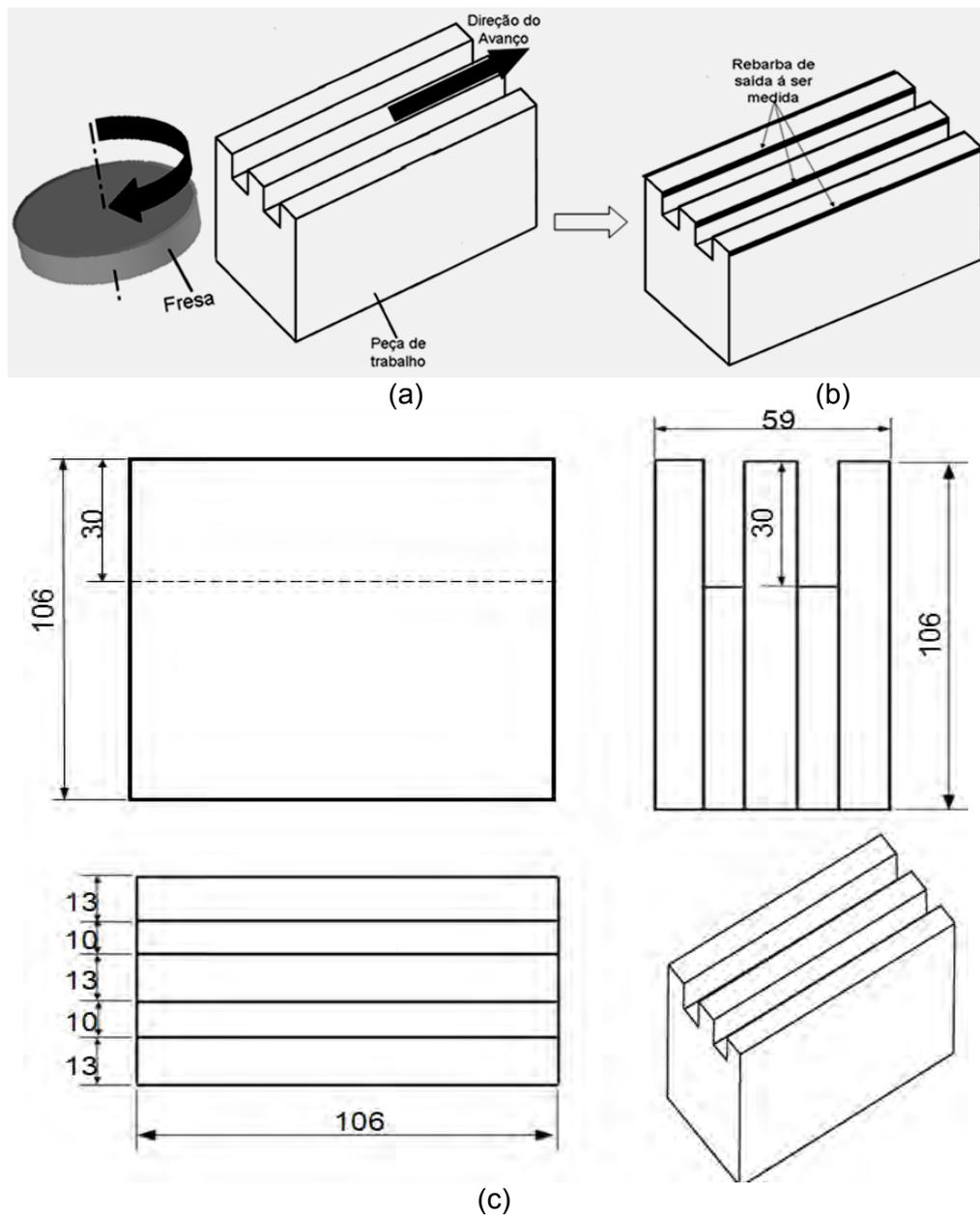


Figura 3.13 - Geometria do CP 2. Foram utilizados entre os ensaios 33 e 45 da segunda etapa, conforme Tab. 3.3. a) - Processo de fresamento com o sentido de avanço e rotação da fresa, b) - local da rebarba formada, c) - Dimensões do CP 2 com as vistas

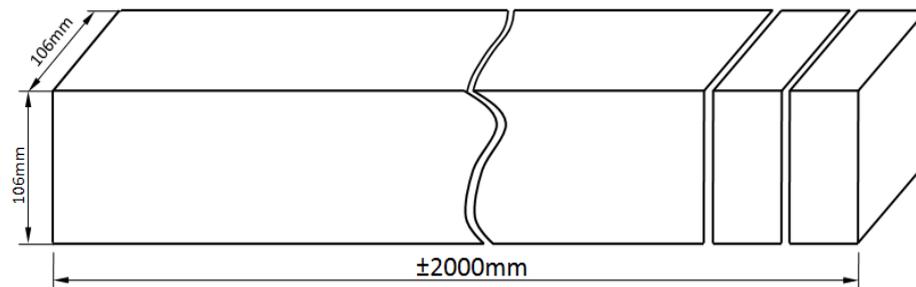


Figura 3.14 – Local e seção de retirada dos corpos de prova da barra

Máquina ferramenta

A usinagem dos corpos de prova foi realizada utilizando uma fresadora CNC Petrus 50100R fabricada pela Deb Maq. A potência total instalada é de 12,5 CV, a rotação máxima do eixo árvore de 8000 rpm, a velocidade máxima de deslocamento da mesa é de 10000 mm/min e as dimensões da mesa e de 420x1115 mm², conforme pode ser mostrada na Fig. 3.15.

Microscópio óptico

Foi utilizado um microscópio óptico, para a medição das dimensões das rebarba, modelo digital Olympus BX51M com capacidade de deslocamento XYZ 100x50x115 mm³, objetiva de 50, 100, 200, 500 e 1000, equipado com uma câmera fotográfica CCD Olympus PM20. A Fig. 3.16 mostra o microscópio.

Software para aquisição de imagens

Software para aquisição, tratamento e medição das imagens digital, capturadas por câmera fotográfica é do tipo IMAGE-PRO PLUS.



Figura 3.15 - Fresadora CNC utilizada nos ensaios



Figura 3.16 - Microscópio óptico utilizado no sistema de medição

Ferramentas de corte

Foram utilizadas cinco ferramentas de corte, sendo duas fresas de topo na preparação dos corpos de provas. As demais, três fresas de faceamento, foram aplicadas nos ensaios que relaciona a altura da rebarba com a geometria das mesmas, conforme foi descrito durante os ensaios da primeira etapa, no item 3.1.1. A segunda etapa dos ensaios foi realizada com a fresa de faceamento que proporcionou a menor dimensão da rebarba nos ensaios iniciais.

A fresa de topo, usada na abertura do sulco no CP 1, com dois insertos intercambiáveis, tem diâmetro de 16 mm com código R390 016A16 11L e R39011T308M4040 para os insertos intercambiáveis. Ambos foram fornecidos pelo fabricante Sandvik, mostrados na Fig. 3.17. Na abertura dos sulcos do CP 2 foi usado uma fresa de metal duro maciça com o diâmetro de 10 mm e código R216.24-10050EAK22P, conforme a Fig. 3.18.



Figura 3.17 - Ferramentas de corte utilizadas na abertura do sulco no CP1. (a) - Fresa de topo, (b) - inserto de metal duro



Figura 3.18 - Fresa de topo utilizada na abertura do sulco no CP 2

Como ferramenta I foi utilizado uma fresa de faceamento, fabricada pela Sandvik, com o código R245-063Q22. O código dos dois insertos testados são R245-12T3E-ML1030 e R245-12T3E-PM 4040. O revestimento GC1030 foi depositado por PVD, formada por multicamadas de TiAlN. O revestimento GC4040 foi depositado por MT-CVD com espessura total de 6 μm . Tem uma camada externa de TiN, uma fina camada intermediária de Al_2O_3 e outra de TiCN. O raio de arredondamento da ponta da ferramenta (r_η) mede 1,4 mm. O ângulo de posição (χ_r) vale 45°. E o ângulo de folga (α) é de 29° na ponta e 20° no flanco. O tamanho do inserto é de 12 mm e a sua espessura de 4 mm, o b_s mede 2,1 mm. A Fig. 3.19 mostra a ferramenta 1.

Como ferramenta II foi utilizada outra fresa de faceamento e inserto com os respectivos códigos 490-063Q22 e 490R-08T308M-MM 2030, também fabricada pela Sandvik. O revestimento GC2030, tem deposição por PVD com espessura de 4 μm , sendo uma camada externa de TiN e outra de TiAlN. Sua geometria tem o raio de arredondamento

da ponta da ferramenta (r_{η}) igual a 0,8 mm. O ângulo de posição (χ_r) vale 90° . E o ângulo de folga (α_o) é de 15° . O tamanho do inserto é de 8 mm e a sua espessura de 3,3 mm, conforme mostra a Fig. 3.20.

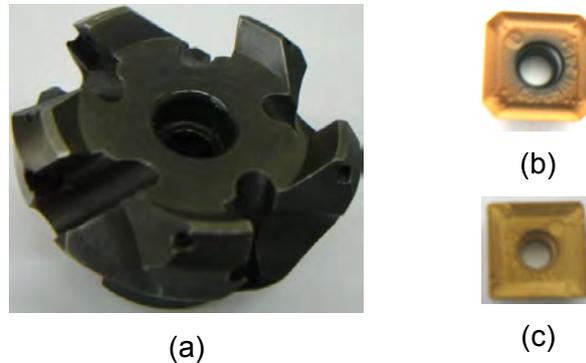


Figura 3.19 - Ferramenta I. (a) - Fresa de Faceamento R245-063Q22, (b) - Inserto de metal duro R245-12T3E-ML1030, (c) - Inserto de metal duro R245-12T3E-PM 4040

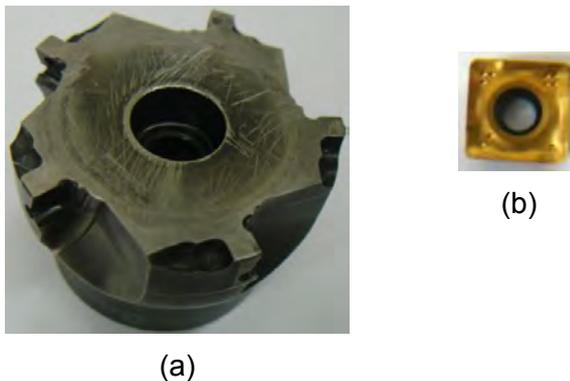


Figura 3.20 - Ferramenta II. a) - Fresa de faceamento 490-063Q22, b) - Inserto de metal duro 490R-08T308M-MM 2030

A ferramenta III é uma fresa de faceamento, também fabricada pela Sandvik, que tem código R210-063Q27-14M e inserto R210-14 05 12M-PM 1030. Possui revestimento do tipo GC1030. A sua geometria tem o raio de arredondamento da ponta da ferramenta (r_{η}) medindo 1,2 mm. O ângulo de posição (χ_r) é de 10° e o ângulo de folga (α_o) é de 15° . O tamanho do inserto é de 14 mm e a sua espessura de 3,3 mm, conforme mostra a Fig. 3.21.

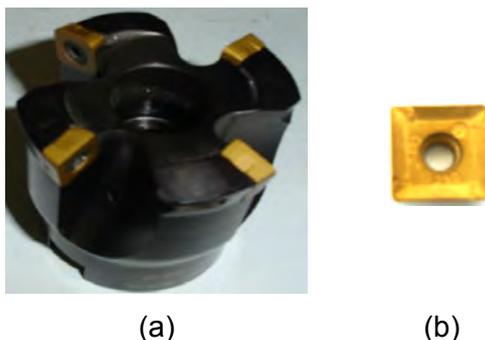


Figura 3.21 - Ferramenta III. a) - fresa de faceamento R210-063Q27-14M, b) - inserto de metal duro R210-14 05 12M-PM 1030

Desgaste das ferramentas de corte

A elevada dureza do material aliada a sua abrasividade promoveram uma grande aceleração do desgaste de flanco da ferramenta de corte. Em apenas quatro ou cinco ensaios (passadas) eram suficientes para alterar de forma drástica a medida do desgaste de flanco. Verificou-se então a impossibilidade de utilizar ferramentas de corte com VB_B semelhantes àqueles propostos pela tabela 3.2, ou seja, 0,02; 0,10; 0,20; 0,30 e 0,38mm. Apesar do controle rigoroso do desgaste, conforme descrição no item 3.1.4, optou-se por utilizar intervalos de desgaste de flanco com valores próximos citados. A Tab. 3.6 mostra o valor máximo e valor mínimo para cada intervalo.

3.6 - Tabela com intervalo de desgaste de flanco médio - VB_B das ferramentas de corte

| Nível codificado | Valor mínimo | Valor médio, obtido conforme Eq. 3.4 | Valor máximo |
|------------------|--------------|--------------------------------------|--------------|
| $-\alpha$ | 0,0 | 0,02 | 0,05 |
| -1 | 0,07 | 0,10 | 0,14 |
| 0 | 0,17 | 0,20 | 0,24 |
| +1 | 0,27 | 0,30 | 0,33 |
| $+\alpha$ | 0,35 | 0,38 | 0,42 |

Na primeira etapa dos ensaios utilizou-se ferramentas de corte nova, ou seja, com desgaste de flanco menor que 0,05 mm. Na segunda etapa foram utilizados cinco níveis de desgaste. Conforme mostrado na Tab. 3.6. Os referidos desgastes foram gerados previamente utilizando o próprio material da peça. A Fig. 3.22 mostra a algumas das ferramentas de corte com a medição do desgaste.

Fluido de corte utilizado nos ensaios iniciais

Para os métodos de aplicação do fluido com baixa vazão e vazão normal foram utilizados o óleo solúvel semi sintético marca Rocol Ultracut 370. As vazões utilizadas foram de 250 ml/min e 4000 ml/min respectivamente. No MQF foi utilizado o fluido vegetal LB 2000, marca Accu-lube, com vazão de 30 ml/h. Os dois fluidos de corte foram fornecidos pela ITW Chemical Products Ltda.

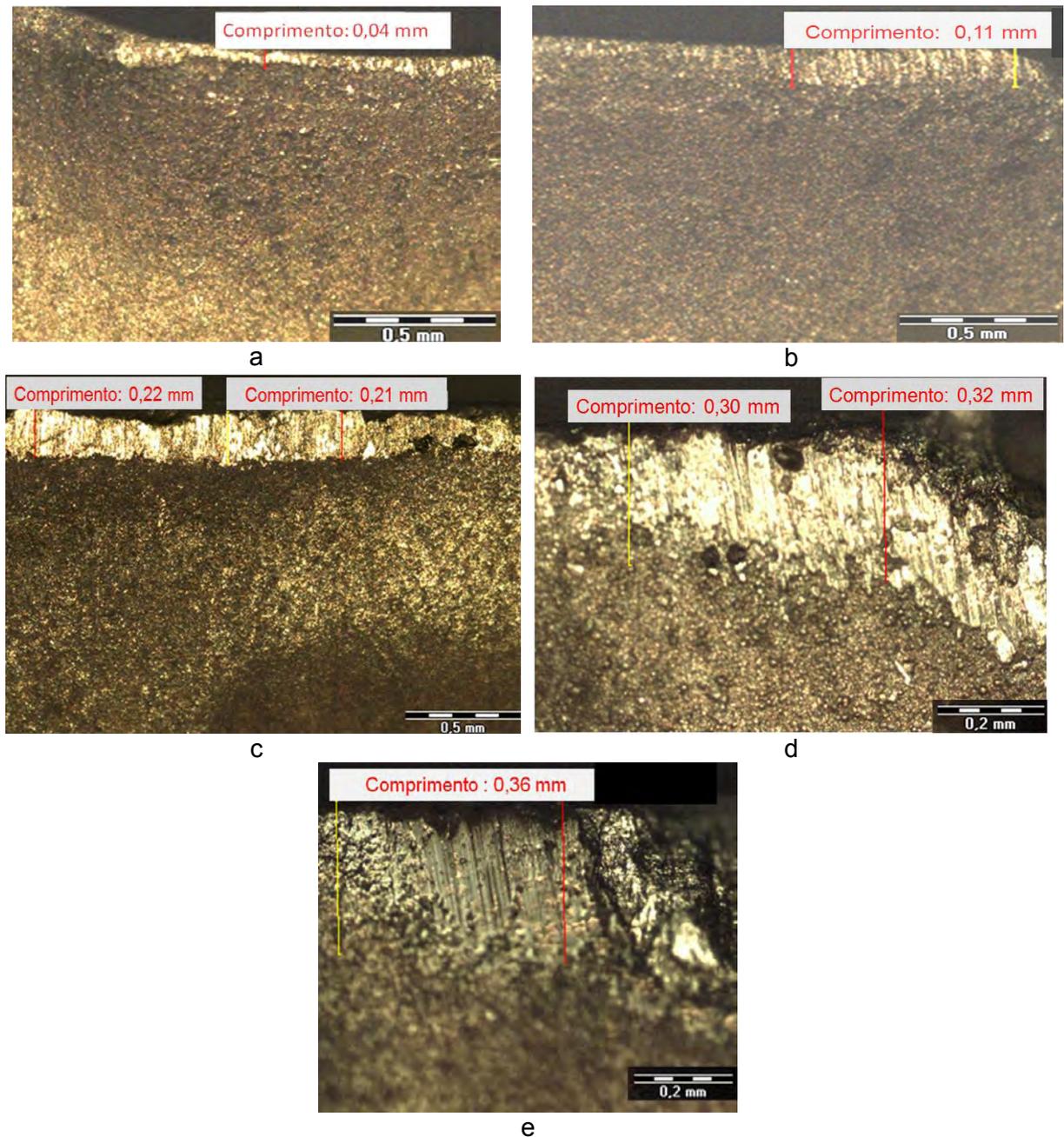


Figura 3.22 - Medição do desgaste das ferramentas de corte utilizadas nos ensaios da segunda etapa. a - Nível $VBB_{(-\alpha)}$, b - Nível $VBB_{(-1)}$, c - Nível $VBB_{(0)}$, d - Nível $VBB_{(+1)}$, e - $VBB_{(+\alpha)}$

CAPÍTULO IV

4 - Resultados e Discussões

O propósito deste capítulo é apresentar e analisar os resultados obtidos desta investigação. Inicialmente serão apresentados os resultados dos ensaios realizados na primeira etapa, e em seguida, aqueles obtidos com a realização dos ensaios na segunda etapa. Ainda, neste capítulo, serão abordados e discutidos assuntos como a dificuldade na seleção dos parâmetros de corte, formação da rebarba secundária, desgaste de ferramentas, surgimento de um cavaco diferente daquele gerado pelo fresamento (em forma de fita) e outras observações consideradas importantes.

As condições de corte, para a realização destes ensaios, foram sugeridas pelas informações técnicas do fabricante das ferramentas de corte. Para auxiliar na seleção destes dados, utilizou-se um catálogo eletrônico de simulação de usinagem. Uma página com a configuração proposta pelo catálogo eletrônico pode ser visualizada na Fig. 4.1.

| Material de trabalho | | | Recomendação de dados de corte | |
|---|----------|-----------------------------------|---|--|
| Padrão nacional | AISI/SAE | | Velocidade de corte (vc) | 95 m/min |
| Denominação | 17-7PH | Dureza | 425 HB | Rotação do eixo (n): 472 rpm |
| Classes Coromant | 4240 | | | Velocidade de avanço (vf): 53 mm/min |
| Parâmetros (escolha entre fz, hex ou hm) | | | Potência do corte para remoção dos cavacos (Pc): 0.2 kW | Taxa da remoção do metal (Q): 2 cm ³ /min |
| Avanço por aresta de corte (fz): | 0.11 mm | Espessura máxima do cavaco (hex): | 0.08 mm | Torque do corte (Mc): 3.6 Nm |
| | | Espessura média de cavaco (hm): | 0.06 mm | |
| Diâmetro de corte (Dc): | 63 mm | | | |
| Maior ângulo de aresta de corte: (κ_r) | 45 ° | | | |
| Número de arestas efetivas (zc): | 1 pcs | | | |
| Profundidade do corte (ap): | 0.5 mm | | | |
| Início do funcionamento (ae): | 57 mm | | | |
| Início do funcionamento (aei): | 6 mm | | | |

<< Volta Métrico Polegada Calcular

Figura 4.1 - Tela do catálogo eletrônico de simulação de usinagem, Sandvik

4.1 - Informações gerais sobre os pré testes

No corte intermitente, característico do processo de fresamento, a ferramenta de corte promove o cisalhamento do material durante o tempo ativo, tornando as marcas de avanço facilmente identificadas. Ao contrário do que se esperaria, as marcas de avanço deixadas na peça são formadas, de forma predominante, na região do tempo inativo, onde normalmente não deve ocorrer o cisalhamento, conforme se observa na representação esquemática da Fig.4.2.



Figura 4.2 – Esquema ilustrando as marcas de avanço formadas após a recuperação elástica do material

Acredita-se que a elevada recuperação elástica do material tenha sido a responsável pelo sentido das marcas de avanço, uma vez que o material ainda é pressionado, com baixa profundidade de corte, quando a ferramenta desloca-se da borda de saída para a borda de entrada, conforme pode ser visualizado na Fig. 4.2.

Costa et al., (2008) relataram a recuperação elástica ocorrida durante o fresamento de faceamento do aço ABNT 1045. Em seu trabalho a entrada em quina (borda da peça com 90°) da ferramenta na borda da peça, ocorre de forma semelhante a este trabalho. No fresamento do aço inoxidável PH 13 8Mo a recuperação elástica foi notada de forma imediata, ou seja, durante a região de fase inativa da fresa na mesma passada. A figura 4.3 ilustra melhor as marcas de avanço geradas na fase inativa do corte.

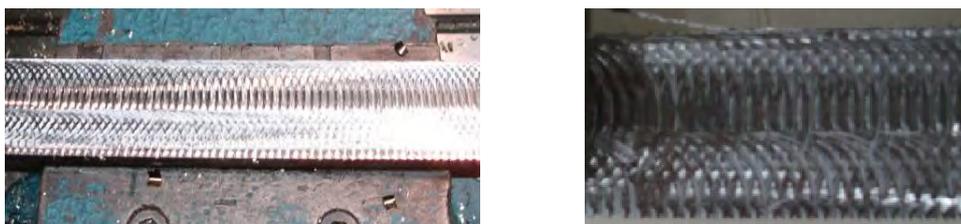


Figura 4.3 – Marcas de avanço deixadas na peça devido à recuperação elástica do material

Notou-se a presença de rebarba na entrada (borda de entrada na Fig. 4.2) com uma considerável dimensão. A sua altura chega até 60% da rebarba de saída (borda de saída na Fig. 4.2). O corte do material durante o tempo inativo, gerado pela recuperação elástica, pode ser responsabilizado pela formação dessa rebarba.

Essa rebarba formada na borda de entrada da peça, nos primeiros ensaios, possui perfil uniforme, do tipo *knife* (faca), conforme nome dado por Avila e Dornfeld, 2004a e Lin, 1999. A sua altura é aproximadamente constante. Através da imagem na Fig. 4.4 pode-se observar a morfologia da mesma.



Figura 4.4 – Rebarba do tipo faca, formada na borda de entrada da peça e observadas em todas as peças após os ensaios

Essa rebarba não tem nenhuma importância neste estudo. Portanto, não será feita a sua remoção, entre uma passada e outra, ou seja, nesta borda a rebarba remanescente não foi retirada. Desta forma, à medida que o número dos ensaios aumenta o seu perfil torna-se diferente daquela conhecida por tipo faca, além da altura elevada.

O processo de fresamento é caracterizado pela elevada exigência de tenacidade da ferramenta de corte. A ausência ou deficiência desta poderá causar a avaria da aresta de corte devido ao choque mecânico ou ainda do choque térmico. Aliado a esse fator, no fresamento do aço inoxidável, a alta resistência mecânica do material da peça, elevado índice de encruamento, cavacos abrasivos devido aos carbonetos presentes e alta temperatura na interface cavaco-ferramenta causado pela baixa condutividade térmica, causarão o acelerado desgaste da ferramenta.

O ângulo de direção da saída (ε) é um parâmetro de considerável importância no surgimento das trincas de origem mecânicas e na formação da rebarba, conforme já foi comentado no capítulo 2. Devido a essa última importância, o ângulo de saída da peça (Ψ) foi utilizado como variável de entrada. Conforme no item 3.1.2 foi adotado os valores de $\Psi_{-\alpha}$

= 47° , $\Psi_{-1} = 67^\circ$, $\Psi_0 = 94,5^\circ$, $\Psi_{+1} = 122^\circ$ e $\Psi_{+\alpha} = 141^\circ$. A relação entre o ângulo de direção da saída (ε) e o ângulo de saída da peça (Ψ) é mostrada na Eq. (4.1).

$$\Psi = \varepsilon + 90^\circ \quad (4.1)$$

As falhas das ferramentas de corte devido às trincas de origem mecânica podem ser reduzidas, dependendo de uma prévia seleção do ângulo ε . Pekelharing (1978) apresentou valores para o ângulo ε onde ocorre o fenômeno da “formação do pé”. Portanto para evitar este tipo de falha nas ferramentas de corte devem ser utilizados ângulos $\varepsilon < -45$ ou $\varepsilon > 20^\circ$. Dentre os valores do ângulo Ψ apenas $\Psi_{+0} = 94,5^\circ$ ($\varepsilon = 4,5^\circ$) e $\Psi_{-1} = 67^\circ$ ($\varepsilon = -23^\circ$) encontram-se dentro do intervalo $-45^\circ < \varepsilon < 20^\circ$.

Através de inspeção visual não notou-se a presença de avarias de origem mecânicas ou térmicas nas ferramentas de corte. Obviamente o intervalo preconizado por Pekelharing (1978), onde a formação do pé é mais comum de ocorrer e levar a ferramenta de corte ao colapso depende de outros fatores, como as condições de corte, material usinado a geometria e o material da ferramenta de corte, etc. Nos testes realizados neste trabalho o conjunto destas variáveis não favorece a ocorrência deste fenômeno, mesmo dentro do intervalo crítico apontado. Por não ser o objetivo desse trabalho, não foi realizada nenhuma investigação, mais rigorosa, sobre o assunto.

Notou-se um desgaste acelerado das ferramentas. Isso ocorreu, com maior intensidade, para ferramentas com revestimento do tipo CG4040, principalmente em profundidades acima de 1,5 mm. Em alguns casos, nas mesmas foi observado que em apenas 700 mm de comprimento usinado o desgaste da ferramenta de corte atingiu $VC_N = 1,0$ mm. A Fig. 4.5 mostra o desgaste.

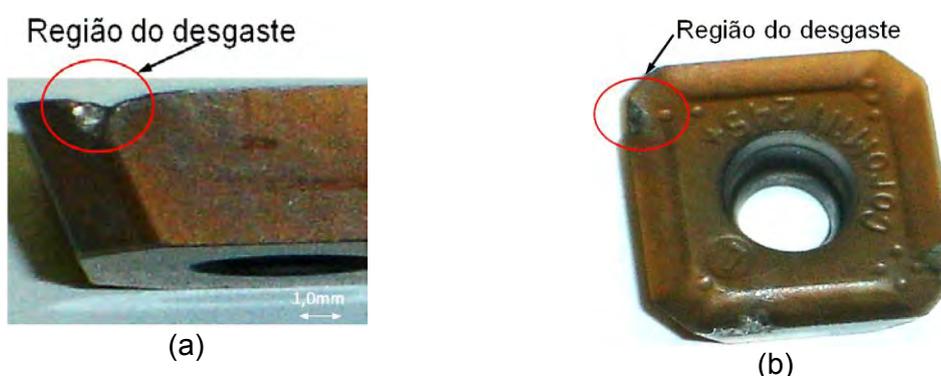


Figura 4.5 - Desgaste nos insertos R245-12T3E- PM 4040. a) - Vista da superfície de folga, b) - Vista da superfície de saída do cavaco

Devido à considerável evolução do desgaste da ferramenta de corte, optou-se pelo monitoramento do mesmo após cada passada. Para tanto, considerou-se uma velocidade de corte de 80 m/min, avanço de 0,112 mm/dente, ângulo de saída da fresa de 144° e profundidade de corte de 0,8 mm. Conforme pode ser visualizado na Fig. 4.6 em apenas 742 mm de comprimento usinado (após sete passadas) o desgaste atingiu $VC_N = 0,67$ mm. O risco de ocorrer a quebra do inserto em estudo, não permitiu o avanço nas investigações, pois acidentes dessa natureza podem danificar a fresa ou a máquina ferramenta. As Figs. 4.6a, 4.6b, 4.6c, 4.6d, 4.6e, 4.6f e 4.6g mostram a evolução do desgaste.

A evolução do crescimento do desgaste ocorre de forma aproximadamente constante. Nas Figs. 4.6d, 4.6e, 4.6f e 4.6g foram registrados um desgaste acentuado, com severas avarias que, inicialmente, surgem na posição equivalente à profundidade de corte. Com a seqüência dos ensaios, a dimensão do desgaste vai desde a ponta da ferramenta até a posição equivalente a profundidade de corte, conforme as Figs. 4.6e, 4.6f e 4.6g.

Analisando as imagens da Fig. 4.6, nota-se que o desgaste, na forma de “V”, tem aparência do desgaste de entalhe, característico do material usinado. A superfície, no vão do entalhe, tem aparência áspera sugerindo o mecanismo de adesão do material da peça na ferramenta, seguido do arrastamento. A elevação, ainda mais, da temperatura pela deformação plástica na altura da profundidade de corte, pode ter considerável influência sobre o referido desgaste. Vários outros mecanismos também podem ser responsabilizados pelo desgaste.

O cavaco formado no processo de fresamento é caracterizado pelo corte interrompido. Ao contrário do esperado, o cavaco que se formou não tem aparência de pequenas lascas em forma de arcos, mas na forma de uma longa fita helicoidal emaranhada, conforme mostra a Fig. 4.7. Verificou-se a presença dessa forma de cavaco em ensaios onde a profundidade de corte era superior a 1,00 mm e o desgaste da ferramenta de corte acima de $VB_B = 0,20$ mm.

Não foi notado a presença da referida forma de cavaco na segunda etapa dos ensaios, pois a geometria dos dois CPs (Fig. 3.10 e Fig. 3.11) tornou a intermitência do corte ainda mais acentuada.

Após o término do corte o cavaco permaneceu aderido à superfície de saída da ferramenta de corte. A alta temperatura, devido à baixa condutividade térmica do material da peça, contribui para a união das duas extremidades dos segmentos de cavacos, no instante da reentrada da ferramenta. Através de uma inspeção detalhada da fita do cavaco foi possível notar o local da união.

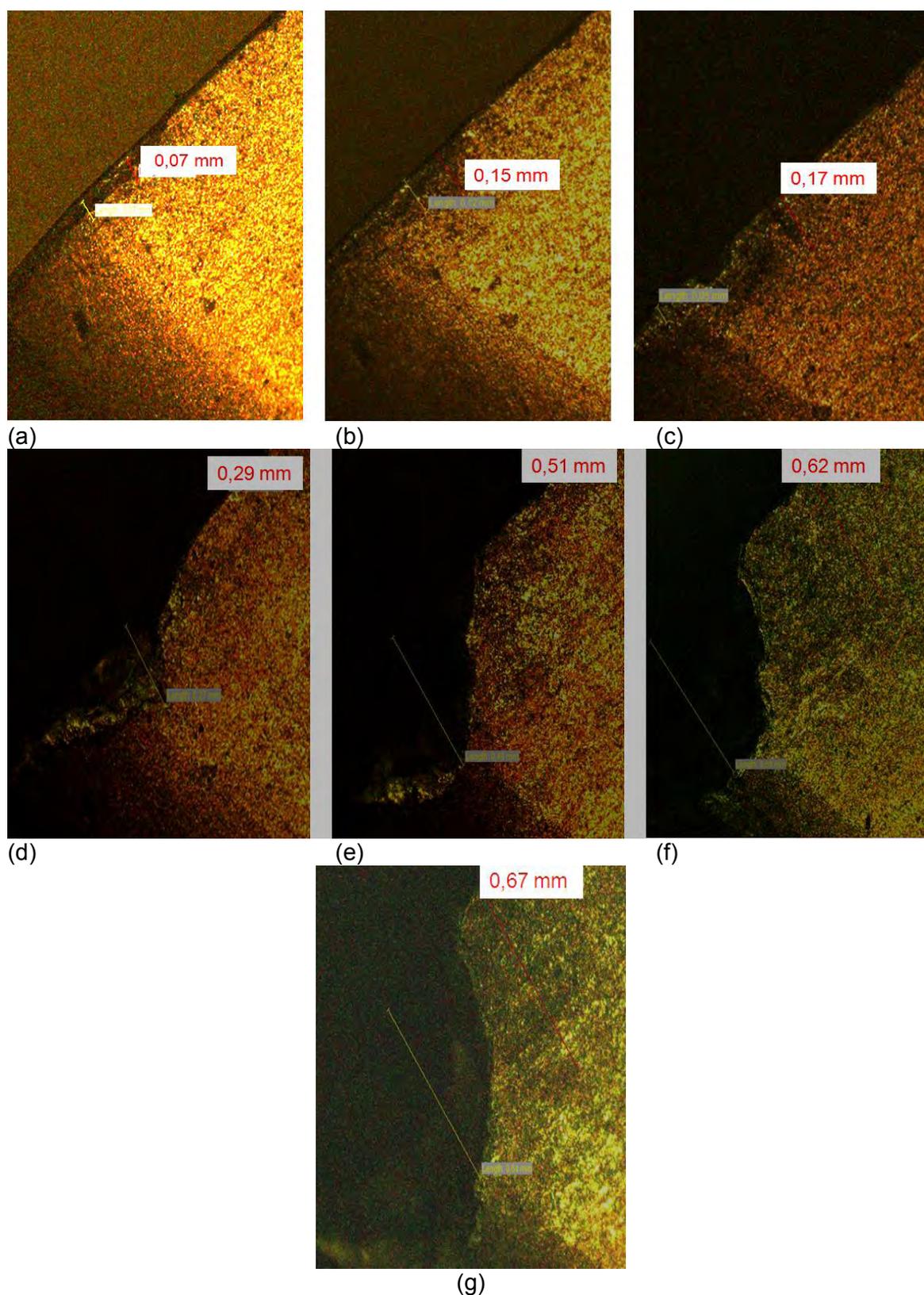


Figura 4.6 - Desgaste observado durante o intervalo de cada passada. a) - 1^o passada, $VC_N = 0,07$ mm; b) - 2^o passada, $VC_N = 0,15$ mm; c) - 3^o passada, $VC_N = 0,17$ mm; d) - 4^o passada, $VC_N = 0,29$ mm; e) - 5^o passada, $VC_N = 0,51$ mm; f) - 6^o passada, $VC_N = 0,62$ mm e g) - 7^o passada, $VC_N = 0,67$ mm

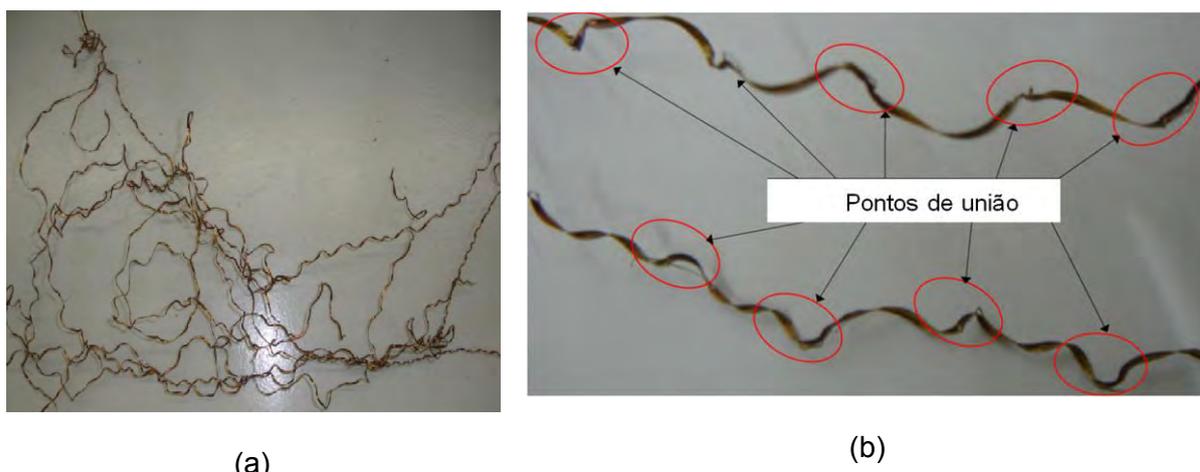


Figura 4.7 - Forma do cavaco obtido durante o fresamento do aço inoxidável a) - Detalhe do cavaco, b) – Pontos de união

4.2 – Condições dos testes da primeira etapa

Os ensaios propostos pela primeira etapa envolveram a variação de aplicação do fluido de corte, da geometria da fresa/ferramenta, do carregamento da fresa, profundidade de transição e da dimensão da rebarba remanescente. Eles visaram identificar as melhores condições de minimização da rebarba (menor altura da rebarba). Após a identificação das mesmas, foram aplicadas na realização da segunda etapa dos ensaios.

4.2.1 - Aplicação do fluido de corte

Os métodos de aplicação do fluido de corte foram:

- Vazão normal (4000 ml/min);
- Baixa vazão (250 ml/min);
- MQF (30 ml/h).

Foram realizados ensaios na condição a seco para complementar a investigação e estabelecer comparações.

A medição da vazão para o primeiro e o segundo método foi realizada de forma analítica-experimental, para tanto utilizou-se um Béquero e um cronômetro. No terceiro método, a vazão foi indicada pelo próprio equipamento utilizado. Em todos os métodos utilizou-se a ferramenta I com revestimento do tipo 1030, pois as ferramentas com revestimento do tipo 4040 apresentaram um desgaste elevado, conforme descrito no item 4.1.

Para cada método foram realizados dez ensaios (um teste + nove réplicas). Em cada ensaio foram realizadas quatro medições, em dois pontos diferentes como mostra a Fig.

3.7a. A Tab. 4.1 mostra o valor médio dos dez ensaios nas quatro medidas para os quatro métodos.

Tabela 4.1 – Média da altura da rebarba, em mm, para as quatro condições (três métodos de aplicação de fluido de corte e a seco)

| Nº do Ensaio | Vazão normal | Baixa vazão | MQF | A seco |
|----------------|---------------------------------|-------------|-------|--------|
| | Média da altura da rebarba (mm) | | | |
| 1 | 1,14 | 1,25 | 1,15 | 1,32 |
| 2 | 1,13 | 1,02 | 1,46 | 1,55 |
| 3 | 1,22 | 1,38 | 1,41 | 1,27 |
| 4 | 1,27 | 1,51 | 1,61 | 0,98 |
| 5 | 1,25 | 0,77 | 2,06 | 1,33 |
| 6 | 0,76 | 1,56 | 1,23 | 1,26 |
| 7 | 1,32 | 1,52 | 1,3 | 1,38 |
| 8 | 1,13 | 0,72 | 1,41 | 1,42 |
| 9 | 1,04 | 1,38 | 1,41 | 1,22 |
| 10 | 1,75 | 1,22 | 1,38 | 1,30 |
| Média (mm) | 1,440 | 1,248 | 1,246 | 1,303 |
| Desv.Pad. (mm) | 0,259 | 0,279 | 0,272 | 0,156 |

Utilizando-se os dados da Tab. 4.1, foi elaborado o gráfico da Fig. 4.8. Neste nota-se a relação entre a altura da rebarba e cada método de aplicação do fluido de corte. No mesmo gráfico ainda é possível observar a média e o intervalo de confiança para os quatro métodos.

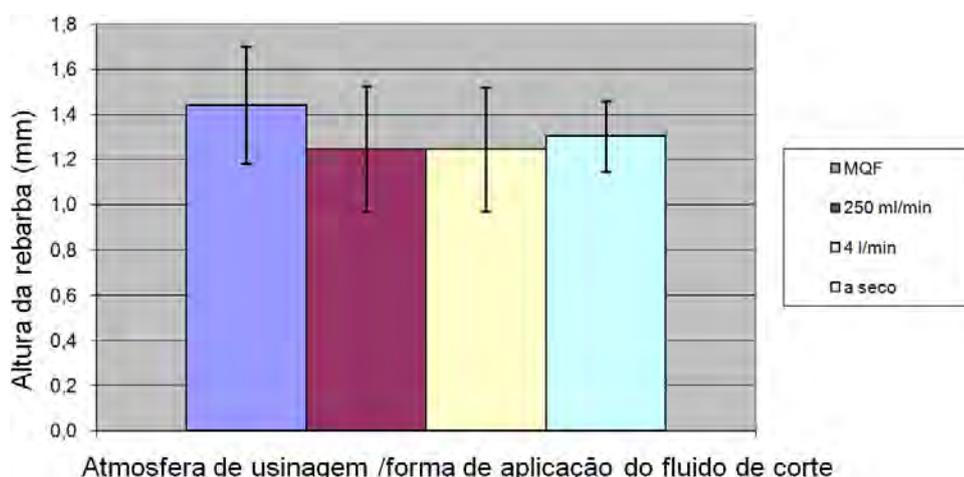


Figura 4.8 – Intervalo de confiança para média da altura das rebarbas em relação à atmosfera de usinagem com os métodos de aplicação de fluido de corte. Sendo: $V_c = 80\text{m/min}$; $a_p = 0,8\text{mm}$; $f_z = 0,112\text{mm/dente}$ e $\Psi = 144^\circ$ e a dimensão do material de $106 \times 106 \times 57\text{mm}^3$

Conforme os resultados obtidos, nota-se uma aparente igualdade entre as médias para os quatro métodos. Portanto, para afirmar sobre a igualdade entre as médias das

alturas das rebarbas, nos quatro métodos, tornou-se necessário a aplicação de um teste de hipótese, para um intervalo de confiança de 95%. A Tab. 4.2 mostra o resultado da ANOVA a partir da análise de variâncias para os dados da Tab. 4.1. Foi utilizado um *software* dedicado a estatística descritiva para a realização do mesmo.

Tabela 4.2 - Tabela de ANOVA para o teste de hipótese sobre os métodos de aplicação do fluido de corte

| Fonte de Variação | Gdl | SQ | MQ | F | p |
|---------------------|-----|----------|----------|---------|----------|
| Aplicação do fluido | 3 | 0,343583 | 0,114528 | 1,91454 | 0,144709 |
| Erro | 36 | 2,15347 | 0,05982 | | |
| Total | 39 | 2,49700 | | | |

Conforme tabela da distribuição F, encontrada em Calado e Montgomery (2003), e observando o número de graus de liberdade do erro com o da aplicação do fluido, para um intervalo de confiança de 95%, obteve-se: $F_{\text{tabela}} = 2,88$. Na Tab. 4.2, $F = 1,91454$ e o nível probabilidade p acima de 0,05. Portanto, aceita-se a hipótese que as médias da altura das rebarbas são estatisticamente iguais. Desta forma, qualquer atmosfera investigada ou método de aplicação do fluido de corte poderá ser empregado nos ensaios restante.

Mendes e da Silva (2003), no torneamento do aço ABNT 1045, encontraram que a utilização do fluido de corte não alterou a altura da rebarba de entrada. O mesmo ocorreu com a rebarba de saída, com uma leve tendência de redução, quando variou-se o ângulo de posição.

Heisel et al., (2009), durante o fresamento do aço ABNT 1045 com $V_c = 150$ m/min, $a_e = 12,5$ mm, $f_z = 0,05$ mm/dente e $a_p = 3$ mm, afirmaram existir uma reduzida diferença na dimensão da rebarba na condição a seco (média de 0,11 mm aproximadamente) e quando utilizou-se o MQF (média de 0,13 mm aproximadamente). O gráfico apresentado por eles não permite notar diferenças de medidas para os dois casos, pois ocorre uma considerável variação da dimensão da rebarba, no referido trabalho.

Através dos resultados da Tab. 4.2, é possível afirmar que a formação da rebarba não deve ser um fator de decisão sobre a aplicação do fluido de corte no processo. Enquanto que atualmente, fatores como o elevado custo com o descarte do fluido de corte, contaminação do meio ambiente, armazenamento, riscos a saúde do operador, dentre outros, têm limitado a aplicação do fluido de corte. Além disto, a aplicação do fluido de corte no fresamento com ferramentas de metal duro, normalmente acelera o desgaste das mesmas MELO, (2001). A observação desses detalhes foi importante na escolha da condição de usinagem a seco para a realização dos ensaios restantes.

4.2.2 - Geometria da fresa/ferramenta

Com o objetivo de avaliar a participação da geometria da fresa na formação da rebarba, três diferentes tipos de fresa/ferramenta foram testadas, sendo elas a ferramenta I, ferramenta II e a ferramenta III, conforme descrição no item 3.2.2.

A instabilidade no corte não permitiu a continuação dos ensaios com a fresa R210-063Q27, empregada na ferramenta III. Da mesma forma, o inserto R245-12T3E-PM 4040, empregado na ferramenta I, não foi utilizado, na seqüência dos ensaios, devido ao elevado desgaste de entalhe, conforme informações no item 4.1. Portanto foram efetivamente testadas a geometria das fresas R245-063Q22 e 490-063Q22 com os insertos R245-12T3E-ML1030 e 490R-08T308M-MM 2030, respectivamente.

Verificou-se uma elevada instabilidade durante o corte com a ferramenta R210-14 05 12M PM 1030. Acredita-se que a baixa espessura do cavaco, causado pelo ângulo de posição da ferramenta ($\chi_r = 10^\circ$) e o baixo avanço por dente ($f_z = 0,112$ mm/dente), foi o grande responsável pela instabilidade, pois conforme informações do fabricante, a referida fresa é apropriada para utilização em condições que envolve grandes avanços, sendo o valor recomendado de até 1,5 mm/dente.

Diferentes recursos podem ser utilizados para determinar a seqüência da Ordem de Saída da Ferramenta (EOS). Através da mesma é possível obter informações dimensionais da rebarba, a partir da geometria da ferramenta. Hashimura et al., (1999A) propuseram um algoritmo, em linguagem C++, para a predição do tamanho da rebarba no fresamento utilizando a EOS. Avila e Dornfeld (2005) determinaram a EOS através de contornos na peça criados pelo CAD. As condições de usinagem utilizadas para a realização dos ensaios foram: $V_c = 80$ m/min; $a_p = 0,8$ mm; $f_z = 0,112$ mm/dente e $\Psi = 144^\circ$ e as dimensões do material de $106 \times 106 \times 57 \text{ mm}^3$.

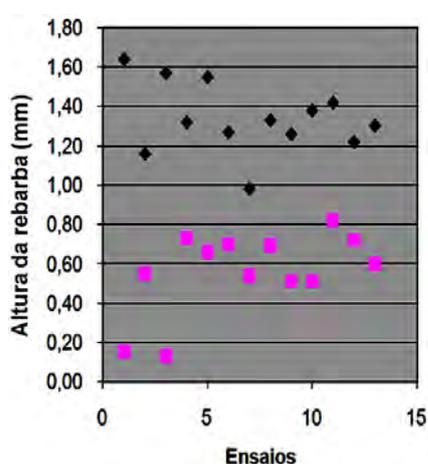
Foram realizados treze ensaios (um teste + doze réplicas) para as duas ferramentas. Em cada ensaio foram realizadas quatro medições em dois pontos diferentes, conforme a Fig. 3.7a. Os valores médios da altura da rebarba estão apresentados na Tab. 4.3. Todos os ensaios foram realizados a seco e com ferramentas novas ($0 \leq VB_{B_{med}} \leq 0,05$ mm). Nos gráficos da Fig. 4.9 são mostrados o valor médio da altura das rebarbas, e o intervalo de confiança para as duas ferramentas testadas.

Apesar da considerável dispersão entre os valores, conforme mostra a Fig. 4.9(a), percebe-se de forma clara, a diferença da rebarba formada pelas duas fresas. Verificou-se uma elevada dimensão da rebarba formada pela fresa R245, em relação a fresa 490. A maior rebarba gerada pela fresa 490 é aproximadamente 80% da menor gerada pela fresa R245. Através do gráfico da figura 4.9(b) é possível afirmar que existe diferença na média

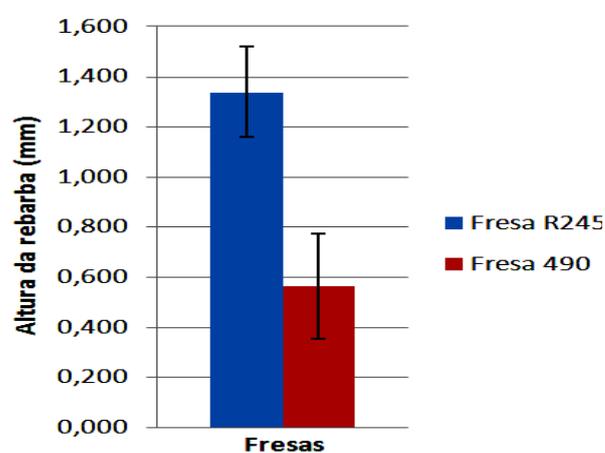
das alturas das rebarbas, entre as duas ferramentas ensaiadas. A melhor condição (menor rebarba) foi obtida com a fresa 490-063Q22.

Tabela 4.3 – Média da altura da rebarba, em mm, para as Ferramentas I (R245) e II (490)

| Número dos Ensaio | Fresas | |
|-------------------|-----------------------------------|-------|
| | R245 | 490 |
| | Média da altura das rebarbas (mm) | |
| 1 | 1,64 | 0,15 |
| 2 | 1,16 | 0,55 |
| 3 | 1,57 | 0,13 |
| 4 | 1,32 | 0,73 |
| 5 | 1,55 | 0,66 |
| 6 | 1,27 | 0,70 |
| 7 | 0,98 | 0,54 |
| 8 | 1,33 | 0,69 |
| 9 | 1,26 | 0,51 |
| 10 | 1,38 | 0,51 |
| 11 | 1,42 | 0,82 |
| 12 | 1,22 | 0,72 |
| 13 | 1,30 | 0,60 |
| Média (mm) | 1,34 | 0,56 |
| Desv. Pad. (mm) | 0,179 | 0,209 |



(a)



(b)

Figura 4.9 –Altura da rebarba para as fresas R245 e 490. a) - Dispersão da altura da rebarba para as duas fresas. b) - Intervalo de confiança para a média da altura da rebarba para as fresas R245 e 490. Sendo: $V_c = 80\text{m/min}$; $a_p = 0,8\text{ mm}$; $f_z = 0,112\text{ mm/dente}$ e $\Psi = 144^\circ$ e as dimensões do material de $106 \times 106 \times 57\text{mm}^3$

Observou-se na ponta do inserto R 245-12T3E um chanfro conhecido por fase paralela (b_s), conforme é mostrado na Fig.4.10. Este chanfro permite um melhor acabamento superficial mesmo quando se utiliza avanço de desbaste. No referido inserto utilizado neste

trabalho, o b_s mede 2,1 mm, sendo este valor 18,75 vezes maior que o avanço utilizado nos ensaios. Devido à fase paralela (b_s), o contato da aresta da ferramenta de corte com o material da peça é intenso, pois o ângulo de folga entre a aresta secundária e a superfície usinada é nulo. A geração do calor será maior, devido ao atrito, e uma elevada deformação plástica irá aparecer na região do corte, como consequência, a formação de rebarbas com grandes dimensões.

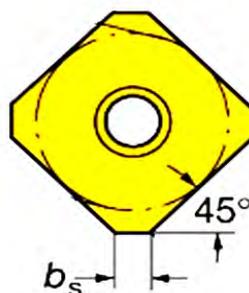


Figura 4.10 – Geometria da ferramenta de corte R 245-12T3E com a fase paralela

O mesmo não ocorre com a ferramenta de corte 490R-08T308M, pois a mesma não é portadora da fase paralela. O contato da ponta da ferramenta com o material da peça é pequeno, sendo o suficiente para que ocorra o corte. Portanto a rebarba formada pela ferramenta de corte R 245-12T3E foi maior que aquelas formadas pela ferramenta 490R-08T308M, quando utilizando as mesmas condições de corte.

4.2.3 – Carregamento da fresa

Neste trabalho foram propostos três diferentes carregamentos da fresa, sendo eles: 90%, 60% e 30%, conforme na Fig. 3.2. Foi adotado o mesmo ângulo de saída da peça ($\Psi = 144^\circ$) nos três casos. Realizou-se nove repetições dos ensaios para os carregamentos de 90% e 60%. Em cada borda foram colhidas quatro medições em dois pontos distintos.

Uma considerável instabilidade apareceu durante os ensaios para o carregamento de 30%. Essa instabilidade foi causada, provavelmente, pelo contato desfavorável entre a aresta de corte e o material da peça, na entrada da ferramenta. Neste caso o ângulo de entrada proporcionado pelo choque fresa-peça, tem caráter positivo, conforme aparece no esquema da Fig. 4.11. Esta situação torna a ferramenta de corte mais suscetível ao lascamento.

A instabilidade do corte permitiu a realização de apenas cinco repetições dos ensaios no carregamento com 30%, pois a provável quebra do inserto pode trazer danos irreparáveis a fresa e a máquina ferramenta. Verificou-se a possibilidade desse fato não ocorrer, para os carregamentos de 60% e 90%, pela simples observação na Fig. 3.2. Nos dois casos o

centro da fresa encontrava-se no interior da superfície a ser gerada, ou seja, dentro da largura da peça.

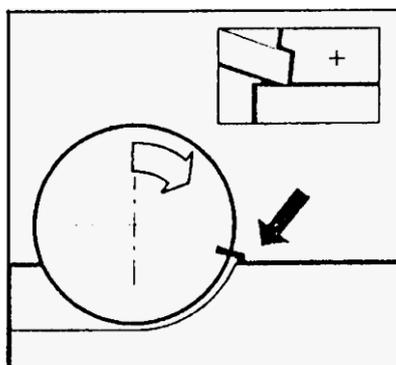


Figura 4.11 - Ângulo de entrada positivo gerado pelo choque fresa-peça (Modern Metal Cutting, 1994)

A média da altura das rebarbas nas quatro medições para os ensaios realizados, com os três carregamentos da fresa, são informados na Tab. 4.4. A comparação entre a média das mesmas podem ser melhor observados pelo gráfico de coluna da Fig. 4.12.

Observa-se uma reduzida diferença entre as médias da altura das rebarbas, dos dois carregamentos de 90% e 60%, sendo o primeiro um pouco maior. No entanto, não é possível afirmar que as rebarbas formadas durante o carregamento de 90%, são maiores que aquelas formadas pelo carregamento de 60%. O intervalo de confiança para a média da altura da rebarba, para os carregamentos de 90% e 60% são, $0,7792 \leq \bar{h} \leq 1,0108 \text{ mm}$ e $0,8312 \leq \bar{h} \leq 0,8848 \text{ mm}$, respectivamente.

Tabela 4.4 – Média da altura da rebarba (mm) para os três carregamentos da fresa

| Ensaio | 90% | 60% | 30% |
|-----------------|----------------------------|-------|-------|
| | Média da altura da rebarba | | |
| 1 | 0,85 | 0,88 | 0,43 |
| 2 | 1,37 | 0,81 | 0,66 |
| 3 | 0,88 | 1,05 | 0,72 |
| 4 | 0,84 | 0,87 | 0,41 |
| 5 | 0,80 | 0,88 | 0,50 |
| 6 | 0,86 | 0,83 | 0,72 |
| 7 | 0,87 | 0,83 | - |
| 8 | 0,85 | 0,89 | - |
| 9 | 0,79 | 0,71 | - |
| 10 | 0,84 | 0,83 | - |
| Média (mm) | 0,895 | 0,858 | 0,573 |
| Desv. Pad. (mm) | 0,169 | 0,085 | 0,144 |

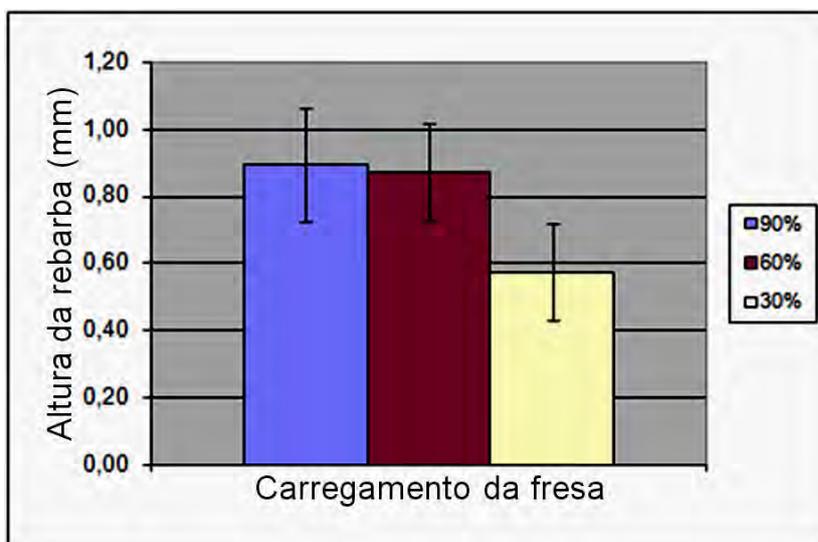


Figura 4.12 - Intervalo de confiança para a altura média da rebarba nos três carregamentos

Observando-se os dois intervalos, verifica-se pontos de igualdade na altura da rebarba para os dois carregamentos, pois a média da altura das rebarbas no carregamento de 90% contém todas médias do carregamento de 60%. O mesmo não acontece com o carregamento de 30%. A média da altura da rebarba, neste caso, é notadamente menor.

Comportamento semelhante foi verificado por Avila e Dornfeld (2004a) no fresamento da liga de alumínio AlSi7Mg. Foi relatado por eles que a condição de elevado carregamento da fresa irá produzir rebarbas maiores, em relação a situações onde o carregamento da fresa é menor. Neste caso, a variação do carregamento foi proporcionada pelas alterações no ângulo de saída da peça (Ψ).

Nos ensaios da segunda etapa, o carregamento da fresa foi utilizado, indiretamente, como variável de entrada, uma vez que serão utilizados cinco níveis do ângulo de saída da peça (Ψ). A relação entre a penetração de trabalho (a_e) e o ângulo (Ψ) será dada pela Eq. (4.2).

$$\psi = 90^\circ + \text{sen}^{-1}\left(\frac{a_e}{r} - 1\right) \quad (4.2)$$

4.2.4 - Profundidade de corte de transição

Neste estudo a transição de rebarba primária para a rebarba secundária foi realizada através da variação da profundidade de corte para duas penetrações de trabalhos diferentes. As variáveis utilizadas foram: $V_c = 80$ m/min; $f_z = 0,112$ mm/dente. Os valores da penetração de trabalho empregados foram de 57 mm ($\Psi = 144,05^\circ$) e de 40 mm ($\Psi =$

105,65°). Os ensaios foram realizados a seco e com ferramentas novas ($0 \leq V_{BB_{med}} \leq 0,05$ mm). As profundidades de corte testadas foram de 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,1 e 2,2 mm para o a_e de 57 mm, enquanto que para o a_e de 40 mm foram testadas as profundidades de 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 e 1,2. Devido à instabilidade no corte, optou-se por não prosseguir no aumento da profundidade de corte. A Tab. 4.5 mostra a altura da rebarba, em relação à profundidade de corte, para as duas penetrações de trabalho.

Tabela 4.5 - Altura da rebarba (mm) em relação a profundidade de corte para uma penetração de trabalho de 57 e 40 mm

| a_e (mm) | a_p (mm) | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------------------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0 | 2,1 | 2,2 |
| $a_e = 57$ mm | Altura da rebarba | | | | | | | | | | | |
| | 0,16 | 0,46 | 0,69 | 0,80 | 0,98 | 1,18 | 1,31 | 1,57 | 1,57 | 2,15 | 0,09 | 0,06 |
| | 0,13 | 0,43 | 0,61 | 0,85 | 0,95 | 1,20 | 1,32 | 1,57 | 1,65 | 1,78 | 0,06 | 0,04 |
| | 0,14 | 0,40 | 0,60 | 0,81 | 0,98 | 1,22 | 1,45 | 1,53 | 1,67 | 1,69 | 0,10 | 0,08 |
| | 0,12 | 0,43 | 0,66 | 0,82 | 0,97 | 1,16 | 1,31 | 1,49 | 1,63 | 2,03 | 0,10 | 0,06 |
| | 0,19 | 0,45 | 0,62 | 0,81 | 1,18 | 1,21 | 1,52 | 1,65 | 1,64 | 1,78 | 0,08 | 0,03 |
| | 0,17 | 0,43 | 0,62 | 0,77 | 0,97 | 1,18 | 1,39 | 1,53 | 1,56 | 2,55 | 0,08 | 0,05 |
| Média | 0,15 | 0,43 | 0,64 | 0,80 | 1,00 | 1,19 | 1,38 | 1,56 | 1,62 | 1,98 | 0,08 | 0,05 |
| Des.P | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,02 | 0,07 | 0,02 | 0,08 | 0,05 | 0,04 | 0,29 | 0,01 | 0,01 |
| $a_e = 40$ mm | 0,29 | 0,36 | 0,64 | 0,07 | 0,04 | 0,04 | | | | | | |
| | 0,27 | 0,47 | 0,61 | 0,03 | 0,04 | 0,02 | | | | | | |
| | 0,30 | 0,56 | 0,52 | 0,05 | 0,03 | 0,03 | | | | | | |
| | 0,28 | 0,45 | 0,73 | 0,06 | 0,05 | 0,03 | | | | | | |
| Média | 0,28 | 0,46 | 0,62 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | | | | | | |
| Des.P. | 0,01 | 0,08 | 0,08 | 0,01 | 0,008 | 0,008 | | | | | | |

Os pontos relativos à altura da rebarba com sua respectiva profundidade de corte para as duas penetrações de trabalho encontram-se nos gráficos da Fig. 4.13. Nos mesmos nota-se claramente a transição da rebarba primária para a rebarba secundária. Acredita-se que, para $a_e = 57$ mm, essa transição inicia-se quando a profundidade de corte esta próxima de 2,0 mm. Para a $a_e = 40$ mm inicia-se próximo de $a_p = 0,6$ mm.

A partir do gráfico da Fig. 4.13, afirmações seguras sobre o intervalo de transição de rebarba primária para rebarba secundária, não podem ser feitas. Porém é possível afirmar que, para $a_e = 57$ mm, na profundidade de corte de 2,0 mm ainda foi formada rebarba primária. Acredita-se ainda que para profundidades de corte acima de 2,1 mm são formadas rebarbas secundárias.

Da mesma forma, para penetração de trabalho de 40 mm, pode-se afirmar que na profundidade de corte de 0,6 mm ainda foi formada rebarba primária. Para essa mesma a_e , afirma-se que para profundidade de corte acima de 0,8 mm foi formadas rebarba

secundárias. Ainda observando-se no gráfico da Fig. 4.13 verifica-se uma proporção linear entre a altura da rebarba e a profundidade de corte de 0,2 e 2,00 mm, para a_e de 57 mm e entre as profundidades de 0,2 e 0,6 mm, para a_e de 40 mm. Portanto pode-se afirmar que existe uma relação linear entre a altura da rebarba primária e a profundidade de corte para diferentes penetração de trabalho.

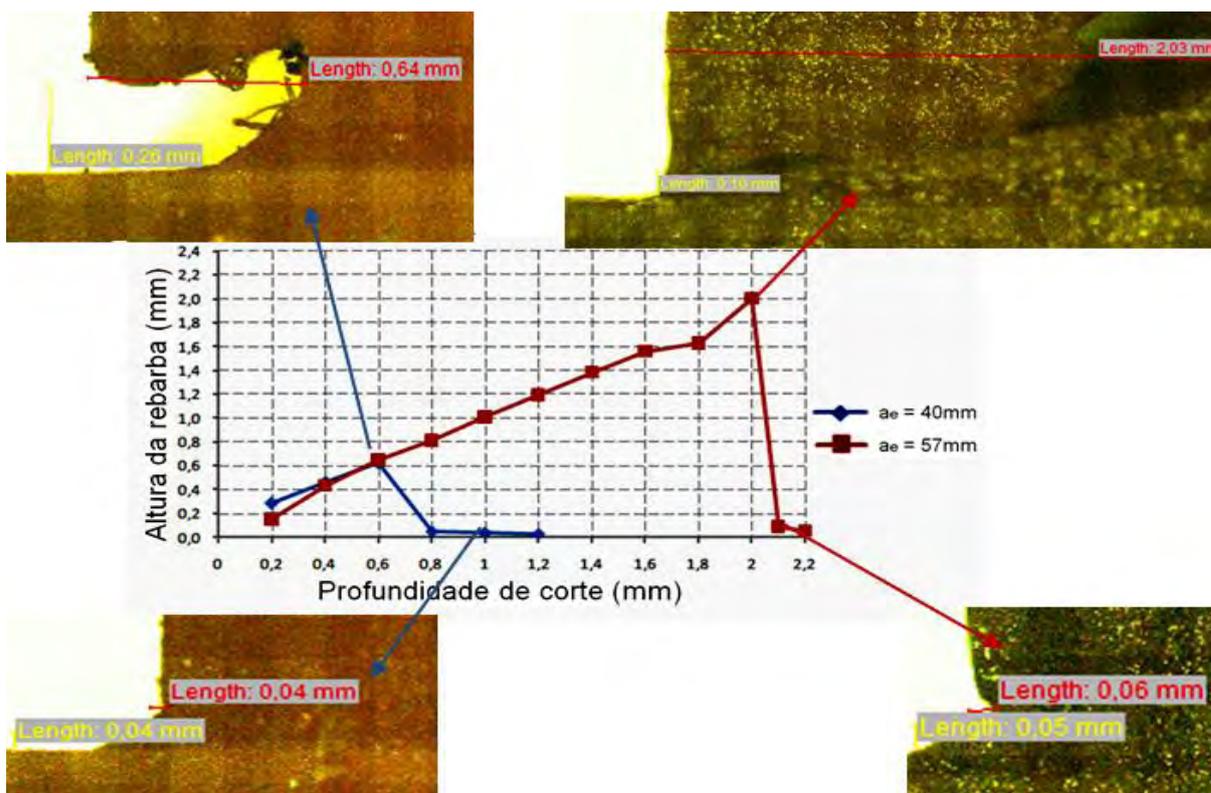


Figura 4.13 - Profundidade de corte para a transição de rebarba primária para secundária

No fresamento do aço AISI 1040, Olvera e Barrow (1996) observaram o aumento proporcional da altura da rebarba primária em relação à progressão da profundidade de corte. Na investigação dos mesmos foi analisado a rebarba 9, conforme Gillespie (1975 e 1976). O mesmo foi observado por, Chern (2006b) durante o fresamento das ligas de Al 2024-T4 e Al 6061-T6. Em seu trabalho foi utilizado diferentes ângulo de saída da peça (Ψ) e a rebarba primária foi formada na borda de saída da peça.

A transformação de rebarba primária para secundária é de responsabilidade, principalmente, da profundidade de corte para um dado ângulo de saída da peça e um raio de arredondamento da ferramenta. Isto porque, em pequenas profundidades de corte a aresta secundária da ferramenta de corte participa de forma efetiva na formação da rebarba primária. À medida que a profundidade de corte aumenta a participação da aresta principal de corte cresce, aparecendo a formação da rebarba secundária.

Pequena largura do cavaco, devido à baixa profundidade de corte, causa o dobramento do cavaco na borda de saída da peça, formando a rebarba. O mecanismo de formação dessa rebarba é principalmente do tipo *Poisson* e do tipo *Tear*, sendo que a última tem participação reduzida. Essa rebarba tem a sua altura aumentada de forma proporcional a profundidade de corte, até a profundidade de transição. A Fig. 4.14a mostra o esquema de formação dessa rebarba. A partir de então, o aumento da profundidade de corte, que promoverá o aumento da largura do cavaco, que terá o seu dobramento não mais na borda de saída da peça, mas sim na borda transiente transversal de saída. Essa borda, juntamente com a sua rebarba, é temporária, pois a cada passada ela será renovada. O mecanismo de formação dessa rebarba transiente é do tipo *Rollover*, conforme a Fig.4.14b e a sua altura é aproximadamente igual à profundidade de corte.

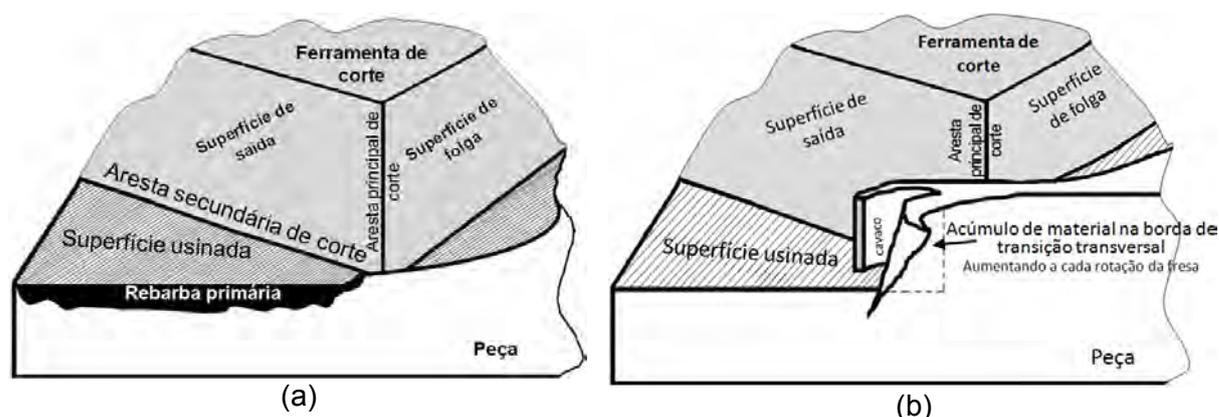


Figura 4.14 - Formação da rebarba, conforme a profundidade de corte. (a) - rebarba primária, (b) - rebarba secundária

Em situações onde a profundidade de corte atinge valores acima da profundidade de transição, a aresta principal da ferramenta de corte tem a sua participação aumentada na formação do cavaco, pois a largura do cavaco aumenta em relação à sua espessura. O cavaco é então, conduzido para a borda de transição transversal da peça, onde permanece fixado, formando uma rebarba de transição. No avanço seguinte da ferramenta (próximo dente), o novo volume de cavaco, mais uma vez, será conduzido pela aresta principal de corte para a borda de transição transversal, gerando o acúmulo de material, conforme Fig. 4.14b.

Durante os ensaios 11 e 12 para $a_e = 57$ mm e nos ensaios 5 e 6 para $a_e = 40$ mm, conforme Tab. 4.5, observando-se o processo do corte, na máquina ferramenta, nota-se nitidamente a presença de uma fita. Essa fita foi gerada pelo corte do material formador da rebarba temporária, na borda transversal de transição. A Fig. 4.15a mostra a imagem da rebarba na borda transversal de transição sendo destacada e a fita de material formado na

Fig. 4.15b. Esse processo é o responsável pela formação da rebarba secundária na borda de saída da peça.

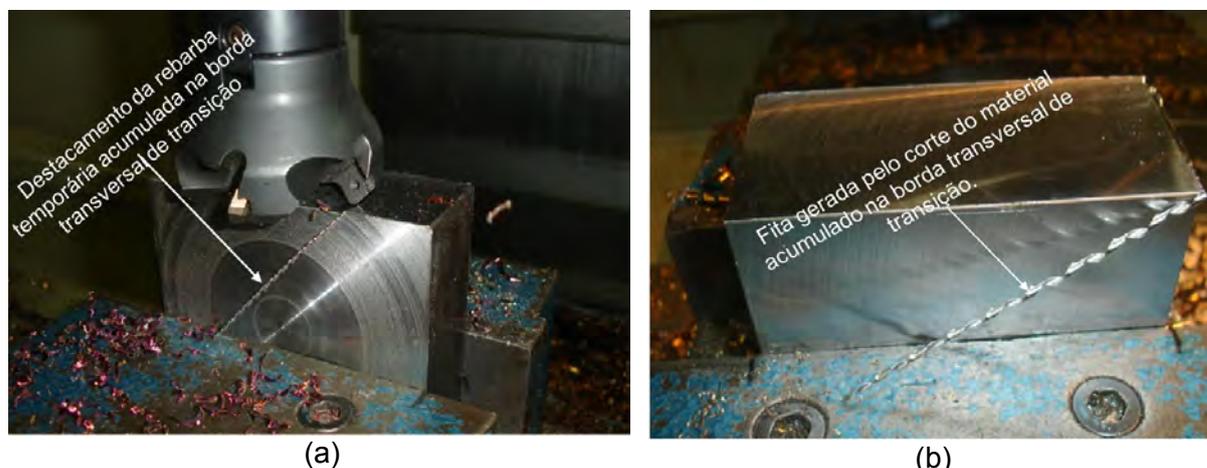


Figura 4.15 - Destacamento do cavaco formador da rebarba de transição. (a) - Formação da fita gerada pelo corte da rebarba na borda de transição (b) - Fita aderida a peça devido ao final do corte

4.2.5 - Dimensão da rebarba remanescente

Poucos trabalhos retratam esse assunto. No chão de fábrica não existe nenhuma preocupação com a rebarba formada durante as passadas intermediárias, apesar do provável desgaste de entalhe que ela pode causar na ferramenta de corte e outros. Cabe lembrar que, comprovadamente a formação da rebarba é uma característica das bordas de acabamento, ou seja, a última passada. Isto ocorre porque geralmente, passadas intermediárias ocorrem com profundidades acima das profundidades de transição e em avanços maiores, gerando na grande maioria das vezes, a rebarba secundária.

Neste trabalho, a decisão sobre a retirada da rebarba remanescente, gerada pela passada anterior, deve ser levada em consideração, pois a não retirada desta rebarba, implica na formação de uma rebarba não uniforme na passada seguinte. Observou-se ainda uma altura diferente da real, proporcionada pelo o acúmulo de material da rebarba remanescente

Para relacionar a altura da rebarba formada pelo acúmulo de passadas (rebarba remanescente) e aquela formada na borda livre de rebarba remanescente, foram realizados cinco ensaios. Cada ensaio, chamado de passada, foram extraídas oito medidas. Os parâmetros de corte utilizados foram: $V_c = 80$ m/min; $f_z = 0,112$ mm/dente; $a_p = 0,5$ mm; $a_e = 57$ mm e $\Psi = 144^\circ$. Os resultados das medições estão apresentados na Tab. 4.6

Tabela 4.6 - Altura da rebarba (mm) posterior, sem a retirada da rebarba remanescente e com a retirada da rebarba remanescente

| Sem retirada da rebarba anterior | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-----------|
| Passadas | Medidas da altura da rebarba em (mm) | | | | | | | | Média | Desv. pad |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | |
| 1 ^a | 0,55 | 0,62 | 0,66 | 0,45 | 0,74 | 0,50 | 0,73 | 0,57 | 0,603 | 0,104 |
| 2 ^a | 0,52 | 0,87 | 0,80 | 0,84 | 0,54 | 0,52 | 0,56 | 0,65 | 0,663 | 0,151 |
| 3 ^a | 0,92 | 0,87 | 0,98 | 0,88 | 0,86 | 0,97 | 0,95 | 0,87 | 0,913 | 0,049 |
| 4 ^a | 1,23 | 1,35 | 1,74 | 1,81 | 1,37 | 1,61 | 1,60 | 1,40 | 1,514 | 0,206 |
| 5 ^a | 1,78 | 1,89 | 1,98 | 1,73 | 1,90 | 2,04 | 1,71 | 1,81 | 1,855 | 0,118 |
| Com a retirada da rebarba anterior | | | | | | | | | | |
| 1 ^a | 0,51 | 0,52 | 0,54 | 0,53 | 0,49 | 0,55 | 0,52 | 0,51 | 0,521 | 0,019 |
| 2 ^a | 0,51 | 0,61 | 0,55 | 0,53 | 0,59 | 0,55 | 0,60 | 0,51 | 0,556 | 0,040 |
| 3 ^a | 0,57 | 0,60 | 0,58 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,58 | 0,57 | 0,573 | 0,014 |
| 4 ^a | 0,56 | 0,56 | 0,52 | 0,60 | 0,58 | 0,61 | 0,58 | 0,56 | 0,571 | 0,028 |
| 5 ^a | 0,62 | 0,55 | 0,50 | 0,50 | 0,58 | 0,59 | 0,51 | 0,62 | 0,559 | 0,051 |

Utilizando os dados da Tab. 4.6 obteve-se o gráfico da Fig. 4.16. No mesmo observa-se o aumento proporcional da altura da rebarba em função do número de passadas. O mesmo não ocorreu para aquelas que tiveram a rebarba remanescente retirada. A relação descrita pela Eq. (4.3) prevê a altura da rebarba para um dado número de passadas (η_x).

$$h = 0,335\eta_x + 0,102 \quad (4.3)$$



Figura 4.16 - Altura média da rebarba em relação ao número de passadas para retirada da rebarba remanescente e com a rebarba remanescente

Observando-se o gráfico da figura 4.16, na curva identificada como “sem retirada”, notou-se um considerável aumento na altura da rebarba. Este acontecimento pode ser responsabilizado pelo acúmulo de material deixado na borda da peça, em forma de rebarba, após cada passada. É importante notar que após certo número de passadas a rebarba

passa ter perfil irregular ocorrendo, muitas vezes, a sua fratura e o destacamento da borda, em vários pontos e de forma aleatória. O mesmo não ocorre com a curva identificada como “com retirada”, pois neste caso não foi permitido o acúmulo de material na borda da peça.

4.3 - Segunda etapa dos ensaios

Conforme se observou, durante a realização da revisão bibliográfica no capítulo dois, grande quantidade dos parâmetros de corte interfere na dimensão e na morfologia da rebarba. Desta forma, aqueles de maior influência como o ângulo de saída da peça, desgaste da ferramenta de corte, profundidade de corte e outros de considerável importância na usinagem como o avanço e a velocidade de corte, terão considerada participação nesta etapa.

4.3.1 – Informações gerais sobre os resultados

Nesta etapa, realizou-se os ensaios que atendem ao planejamento composto central (PCC). Conforme a metodologia aplicada e descrita no capítulo três, inicialmente foram realizados 32 (2^5) ensaios. Em seguida foram realizados 13 ($2 \times 5 + 3$) ensaios, sendo 10 (2×5) nos pontos axiais e três nos pontos centrais ensaios. Devido às três réplicas, no total foram realizados, de forma aleatória, 180 ensaios, sendo $(2^5 + 3 \times 2^5) + [2 \times 5 + 3(2 \times 5)] + (3 + 3 \times 3)$.

Os resultados dos ensaios obtidos na primeira etapa, item 4.2, identificaram as melhores condições de minimização da rebarba (menor altura da rebarba). Estes devem ser aplicados aos ensaios da segunda etapa. Portanto, nesta etapa, devem ser observadas as seguintes condições de corte:

- Conforme os resultados dos ensaios no item 4.2.1, na próxima etapa os ensaios devem ser realizados a seco.
- Os ensaios realizados com a Ferramenta II (Fresa 490-063Q22 e inserto 490R-08T308M-MM 2030) apresentaram rebarbas com alturas menores que as demais ferramentas, conforme os resultados do item 4.2.2. Portanto, esta ferramenta será usada na etapa seguinte.
- O carregamento da fresa demonstrou ser um fator importante no estudo da dimensão da rebarba, pois a altura da rebarba foi menor nos ensaios onde o carregamento foi de 30%, como mostra o resultado dos ensaios do item 4.2.3. Portanto, nesta segunda etapa, será mantido o mesmo carregamento para todos os ensaios, sendo que será usado um carregamento de 20% da fresa.

- Em situações onde se utilizou elevados ângulos de saída da peça, permitiu-se uma maior profundidade de corte, antes do aparecimento da rebarba secundária. Para pequenos ângulos de saída da peça, considerados menores que 105° , a formação da rebarba secundária iniciou-se com uma profundidade de corte superior a 0,6mm, conforme o item 4.2.4. Neste caso, foram utilizadas ferramentas novas, fato que não ocorreu durante os ensaios da segunda etapa.

- Os resultados dos ensaios que analisaram o comportamento da rebarba remanescente, conforme o item 4.2.5, demonstrou a necessidade de se fazer a sua retirada. Isto foi adotado em todos ensaios da segunda etapa.

Na realização dos 180 ensaios que atende o PCC, observou-se rebarbas com uma considerada variação dimensional. Foram encontradas rebarbas que vão desde alguns centésimos de mm, por exemplo, 0,03, 0,04, 0,05 mm até uma altura acima de 1,4 mm como 1,43, 1,44, 1,47 mm. Mesmo com essa elevada dispersão, observa-se claramente a dependência da dimensão da rebarba, em relação às variáveis em estudo. Através das imagens na Fig. 4.17 pode ser visto algumas destas rebarbas. Uma pequena rebarba foi observada no ensaio 13 (Fig. 4.17a), considerada uma provável rebarba secundária e a rebarba gerada no ensaio 32 (Fig. 4.17b), com altura de 1,47 mm, no caso uma rebarba primária. Outras imagens das rebarbas são mostradas na Fig. 8.1 do anexo I do capítulo 8.

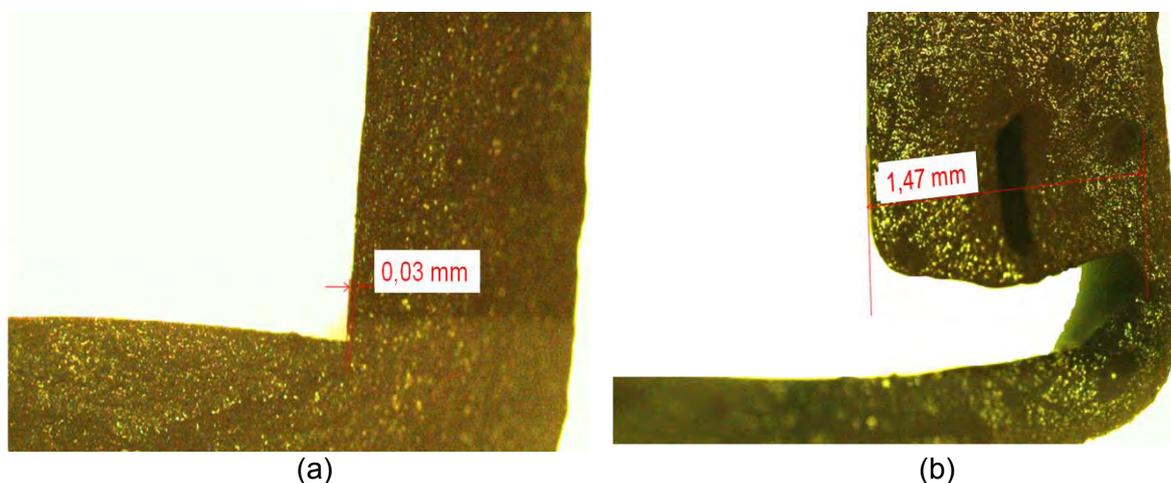


Figura 4.17 - Exemplos de rebarbas, com a cota da sua altura, formadas na segunda etapa dos ensaios. a) - Provável rebarba secundária, b) - Rebarba primária

A rebarba secundária é caracterizada, principalmente, pelos níveis de três variáveis: A profundidade de corte, o ângulo de saída da peça e do raio de arredondamento da ferramenta, conforme já discutido nos itens 2.7.4, 2.10.1 e 2.10.2 do capítulo 2. Neste trabalho, será adotado o critério dimensional em relação à profundidade de corte para identificar a rebarba secundária. No item 4.2.4 investigou-se a formação da rebarba secundária. Na Tab. 4.5, para $a_e = 40$ mm, observou-se nos ensaios 4, 5 e 6 rebarbas

secundárias com alturas máxima de 0,07 mm. Para $a_e = 57$ mm, observou-se nos ensaios 11 e 12 rebarbas secundárias com alturas máxima de 0,10 mm.

Acredita-se que rebarbas, com alturas próximas de 0,03, 0,04, 0,05, 0,06, 0,07 ou 0,08 mm, presentes nos ensaios 5, 6, 8, 13, 15 e 38 dos 1º ensaios, 38 da 1ª réplica, 38 da 2ª réplica e 5, 13, 15 e 38 da 3ª réplica sejam identificadas como rebarbas secundárias. Esta afirmação refere-se apenas a dimensão das mesmas em relação à profundidade de corte utilizada, pois os níveis das variáveis adotados neste trabalho não prevêem o aparecimento das mesmas. Os poucos casos de, prováveis, rebarba secundária foram notadas em aproximadamente 4,5% do total de 1080 medições dos 180 ensaios. Cabe lembrar que nos ensaios do item 4.2.4 foram utilizados ferramentas de corte nova e $f_z = 0,112$ mm/dente. Nos ensaios 5, 6, 8, 13, 15 e 38 dos 1º ensaios, 38 da 1ª réplica, 38 da 2ª réplica e 5, 13, 15 e 38 da 3ª réplica, utilizou-se ferramentas de corte, na grande maioria, com desgaste de $VB_B = 0,10, 0,20$ e $0,30$ mm, fato que pode ter elevado o raio de arredondamento da ferramenta de corte nestes ensaios.

Quanto ao restante dos ensaios, acredita-se que as rebarbas formadas são caracterizadas como rebarba primária. O ângulo de saída da peça, a profundidade de corte e o raio de arredondamento da ferramenta (aqui aumentado pelo desgaste) utilizados nos ensaios caracterizam a tendência de formação da referida rebarba.

Notou-se a presença de rebarba primária com três morfologias diferentes, sendo elas; do tipo caracol, tipo faca e do tipo onda, conforme é mostrado na Fig. 4.18. É possível observar em uma mesma borda de saída da peça rebarbas com as três morfologias diferentes. Variáveis como ângulo de saída da peça, e desgaste da ferramenta de corte, dentre outras menos influentes, definem o tipo da morfologia gerada na borda da peça. Observou-se a formação da rebarba do tipo caracol em ensaios onde as condições de corte são mais exigentes, principalmente nos ensaios onde utilizou-se ferramentas de corte com desgaste de 0,30 mm. A rebarba do tipo faca apresenta-se com altura constante e a sua espessura é muito menor, quando comparada com sua altura.

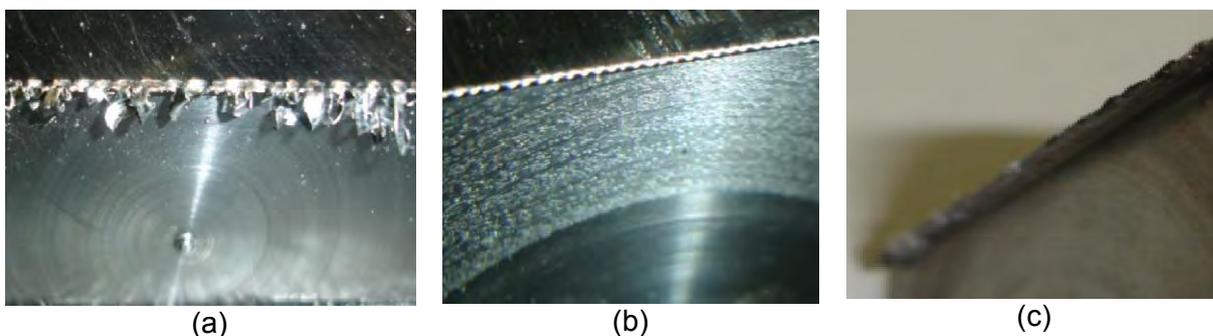


Figura 4.18 - Tipos de rebarba primária formada nos ensaios. a) - Rebarba do tipo caracol, b) - Rebarba do tipo onda, c) - Rebarba do tipo faca

A rebarba do tipo onda apresentou-se com uma altura próxima a rebarba do tipo faca, pois o mecanismo de formação estas rebarbas são semelhantes, conforme o item 2.7.7. Em alguns ensaios formou-se rebarbas do tipo caracol com dimensões variáveis e de fácil rebarbação, em relação as demais.

4.3.2 - Análise dos resultados dos ensaios conforme o planejamento composto central

A metodologia adotada, nesta segunda etapa, permite analisar os resultados em duas fases. Na primeira fase serão investigados os efeitos das cinco variáveis utilizando o planejamento fatorial 2^K . Em seguida, na segunda fase, a utilização do PCC. Estes recursos prevêem a análise da significância das variáveis e da interação entre elas. Ainda permite a criação de um modelo matemático capaz de prever a altura da rebarba. O planejamento de experimentos - *DOE* que envolve as cinco variáveis de entrada e a variável de saída é esquematicamente representado pelo diagrama de bloco da Fig. 3.3.

Tornou-se necessária à replicação, de forma aleatória, dos ensaios para se ter uma estimativa do erro experimental, pois com a análise da variância torna-se possível verificar as dimensões dos resíduos. Pretendeu-se realizar pelo menos três replicações de cada ensaio. Realizou-se, no total 180 ensaios.

A transformação das variáveis originais de entrada para variável de entrada codificada (ξ) foi realizada pela Eq. (3.4). O valor dos níveis codificados com o seu respectivo valor original são mostrados na Tab. 4.7. Os valores de saída (altura da rebarba) para os 45 primeiros ensaios e de suas três réplicas é mostrado nos gráficos da Fig. 4.19. No anexo II no capítulo VIII mostra os valores para cada medida da rebarba. A média de todos os ensaios com seu respectivo desvio padrão encontram-se na tabela 4.8. Deve ser lembrado que a altura da rebarba para o ensaio 35 foi estimada. Para tanto foi utilizada a análise de regressão, conforme descrito no item 3.1.3.

Tabela 4.7 – Níveis normalizados das variáveis a serem utilizadas

| Níveis codificados | Variáveis | | | | |
|--------------------|------------|---------------|---------|-------------------------|------------|
| | Vc (m/min) | fz (mm/dente) | ap (mm) | VB _{Bmax} (mm) | Ψ (°) |
| -1,7244 | 70 | 0,04 | 0,35 | 0,02 | 47 |
| -1 | 85 | 0,06 | 0,5 | 0,10 | 67 |
| 0 | 105 | 0,08 | 0,7 | 0,20 | 94,5 |
| 1 | 125 | 0,10 | 0,9 | 0,30 | 122 |
| 1,7244 | 140 | 0,12 | 1,04 | 0,37 | 141 |

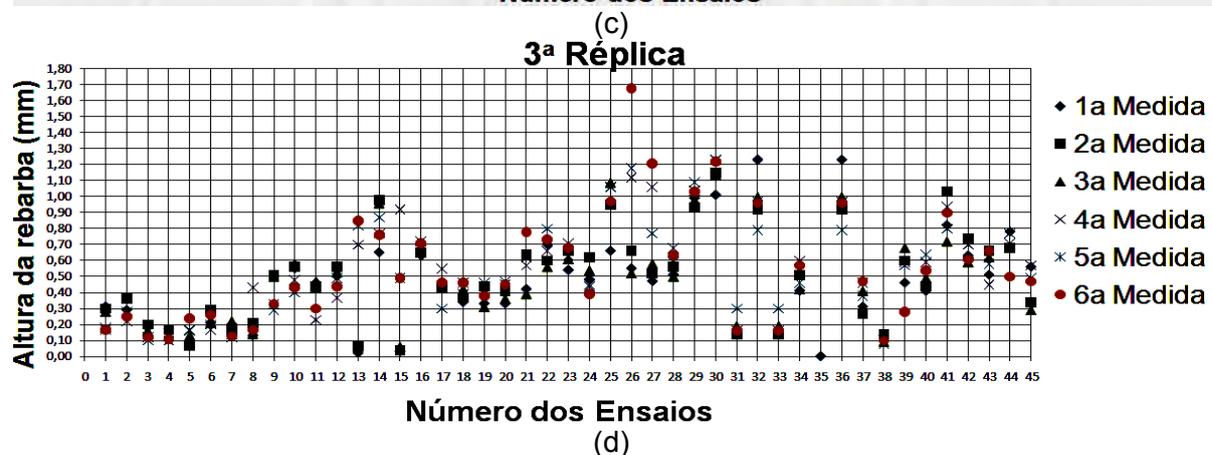
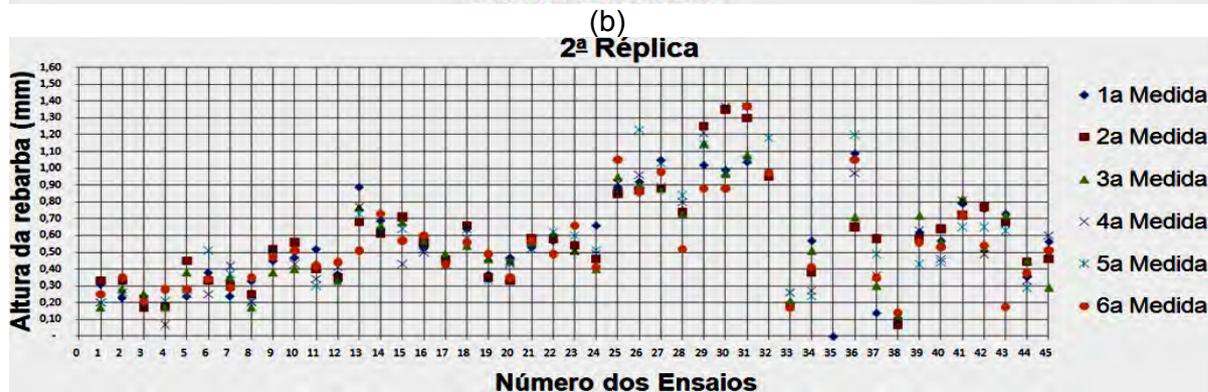
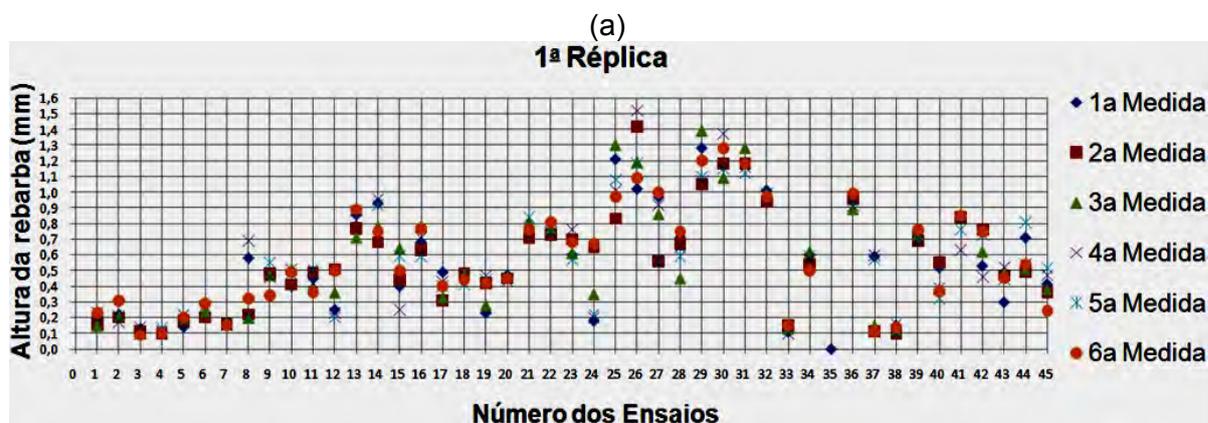
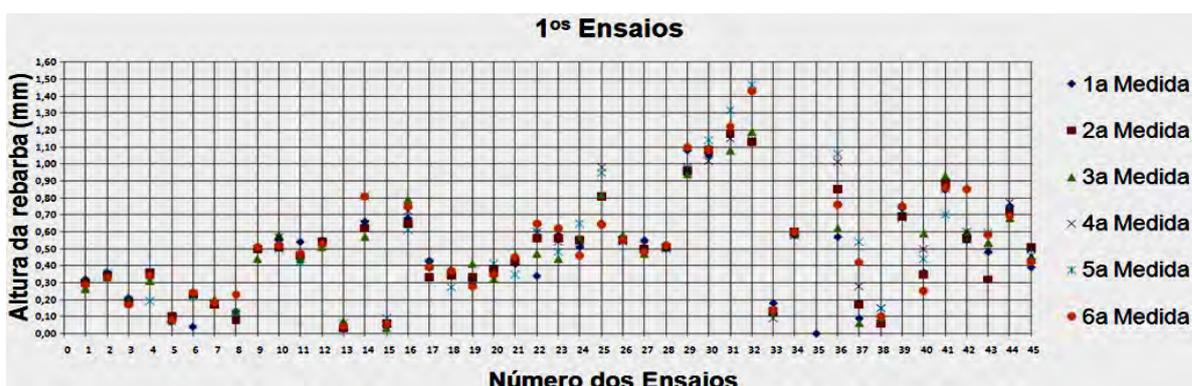


Figura 4.19 - Nível da altura das rebarbas para os ensaios, a) - primeiros ensaios b) - 1^o Réplica c) - 2^o Réplica e d) - 3^o Réplica

Tabela 4.8 – Média da altura da rebarba, em mm, e o desvio padrão, em mm, para os primeiros ensaios e as réplicas 1, 2 e 3

| Ensaio | 1 ^{os} Ensaio | | 1 ^o Réplica | | 2 ^o Réplica | | 3 ^o Réplica | | Média geral | DesPad geral |
|--------|------------------------|--------|------------------------|--------|------------------------|--------|------------------------|--------|-------------|--------------|
| | Média | DesPad | Média | DesPad | Média | DesPad | Média | DesPad | | |
| 1 | 0,292 | 0,020 | 0,197 | 0,034 | 0,243 | 0,065 | 0,235 | 0,068 | 0,242 | 0,0590 |
| 2 | 0,343 | 0,014 | 0,220 | 0,047 | 0,297 | 0,047 | 0,295 | 0,060 | 0,289 | 0,0618 |
| 3 | 0,188 | 0,015 | 0,112 | 0,019 | 0,212 | 0,032 | 0,147 | 0,039 | 0,165 | 0,0472 |
| 4 | 0,315 | 0,064 | 0,110 | 0,011 | 0,180 | 0,068 | 0,130 | 0,033 | 0,184 | 0,0940 |
| 5 | 0,083 | 0,012 | 0,188 | 0,027 | 0,313 | 0,083 | 0,142 | 0,063 | 0,182 | 0,0997 |
| 6 | 0,198 | 0,078 | 0,245 | 0,038 | 0,358 | 0,086 | 0,223 | 0,044 | 0,256 | 0,0869 |
| 7 | 0,180 | 0,011 | 0,158 | 0,008 | 0,328 | 0,064 | 0,162 | 0,040 | 0,207 | 0,0805 |
| 8 | 0,128 | 0,055 | 0,368 | 0,214 | 0,252 | 0,073 | 0,215 | 0,111 | 0,241 | 0,1493 |
| 9 | 0,493 | 0,027 | 0,463 | 0,068 | 0,467 | 0,050 | 0,412 | 0,105 | 0,459 | 0,0709 |
| 10 | 0,415 | 0,192 | 0,467 | 0,049 | 0,475 | 0,057 | 0,500 | 0,075 | 0,464 | 0,1069 |
| 11 | 0,465 | 0,041 | 0,437 | 0,058 | 0,402 | 0,077 | 0,388 | 0,099 | 0,423 | 0,0737 |
| 12 | 0,535 | 0,014 | 0,342 | 0,138 | 0,375 | 0,042 | 0,482 | 0,068 | 0,425 | 0,1107 |
| 13 | 0,047 | 0,016 | 0,822 | 0,070 | 0,725 | 0,126 | 0,420 | 0,409 | 0,504 | 0,3693 |
| 14 | 0,682 | 0,103 | 0,835 | 0,113 | 0,655 | 0,048 | 0,832 | 0,128 | 0,751 | 0,1279 |
| 15 | 0,057 | 0,021 | 0,470 | 0,140 | 0,622 | 0,107 | 0,338 | 0,359 | 0,372 | 0,2826 |
| 16 | 0,697 | 0,069 | 0,693 | 0,076 | 0,547 | 0,037 | 0,673 | 0,036 | 0,654 | 0,0816 |
| 17 | 0,390 | 0,050 | 0,393 | 0,066 | 0,455 | 0,023 | 0,437 | 0,080 | 0,419 | 0,0616 |
| 18 | 0,345 | 0,040 | 0,453 | 0,028 | 0,603 | 0,050 | 0,407 | 0,049 | 0,452 | 0,1053 |
| 19 | 0,322 | 0,048 | 0,377 | 0,097 | 0,412 | 0,069 | 0,388 | 0,060 | 0,375 | 0,0744 |
| 20 | 0,368 | 0,031 | 0,452 | 0,013 | 0,412 | 0,057 | 0,412 | 0,056 | 0,411 | 0,0505 |
| 21 | 0,418 | 0,039 | 0,760 | 0,054 | 0,555 | 0,024 | 0,570 | 0,146 | 0,576 | 0,1455 |
| 22 | 0,533 | 0,113 | 0,752 | 0,033 | 0,575 | 0,046 | 0,675 | 0,088 | 0,634 | 0,1129 |
| 23 | 0,540 | 0,067 | 0,653 | 0,072 | 0,562 | 0,058 | 0,638 | 0,060 | 0,598 | 0,0779 |
| 24 | 0,547 | 0,063 | 0,378 | 0,226 | 0,488 | 0,095 | 0,487 | 0,082 | 0,475 | 0,1387 |
| 25 | 0,797 | 0,149 | 1,067 | 0,170 | 0,918 | 0,074 | 0,965 | 0,159 | 0,937 | 0,1661 |
| 26 | 0,553 | 0,014 | 1,237 | 0,194 | 0,957 | 0,139 | 0,952 | 0,457 | 0,925 | 0,3458 |
| 27 | 0,498 | 0,028 | 0,812 | 0,201 | 0,952 | 0,078 | 0,768 | 0,305 | 0,758 | 0,2422 |
| 28 | 0,510 | 0,009 | 0,637 | 0,106 | 0,730 | 0,111 | 0,578 | 0,070 | 0,614 | 0,1140 |
| 29 | 1,002 | 0,069 | 1,182 | 0,134 | 1,108 | 0,136 | 1,010 | 0,055 | 1,076 | 0,1242 |
| 30 | 1,088 | 0,030 | 1,207 | 0,101 | 1,090 | 0,213 | 1,163 | 0,085 | 1,137 | 0,1284 |
| 31 | 1,192 | 0,078 | 1,185 | 0,053 | 1,202 | 0,161 | 1,110 | 0,116 | 1,172 | 0,1090 |
| 32 | 1,297 | 0,163 | 0,973 | 0,029 | 1,005 | 0,086 | 1,183 | 0,215 | 1,115 | 0,1860 |
| 33 | 0,133 | 0,029 | 0,130 | 0,021 | 0,213 | 0,039 | 0,183 | 0,060 | 0,165 | 0,0516 |
| 34 | 0,590 | 0,009 | 0,570 | 0,044 | 0,397 | 0,130 | 0,495 | 0,079 | 0,513 | 0,2368 |
| 35 | 0,267 | | 0,178 | | 0,251 | | 0,178 | | 0,219 | |
| 36 | 0,812 | 0,200 | 0,945 | 0,039 | 0,945 | 0,219 | 0,978 | 0,144 | 0,920 | 0,1265 |
| 37 | 0,260 | 0,190 | 0,355 | 0,254 | 0,370 | 0,153 | 0,383 | 0,080 | 0,342 | 0,1757 |
| 38 | 0,108 | 0,035 | 0,128 | 0,026 | 0,108 | 0,025 | 0,113 | 0,027 | 0,114 | 0,0278 |
| 39 | 0,723 | 0,033 | 0,720 | 0,028 | 0,590 | 0,096 | 0,530 | 0,141 | 0,641 | 0,1185 |
| 40 | 0,415 | 0,121 | 0,422 | 0,092 | 0,533 | 0,074 | 0,518 | 0,088 | 0,472 | 0,1081 |
| 41 | 0,847 | 0,078 | 0,793 | 0,087 | 0,752 | 0,066 | 0,868 | 0,111 | 0,815 | 0,2105 |
| 42 | 0,618 | 0,116 | 0,642 | 0,126 | 0,398 | 0,124 | 0,643 | 0,063 | 0,575 | 0,1033 |
| 43 | 0,501 | 0,101 | 0,446 | 0,077 | 0,601 | 0,212 | 0,580 | 0,085 | 0,532 | 0,1318 |
| 44 | 0,725 | 0,035 | 0,600 | 0,129 | 0,375 | 0,063 | 0,687 | 0,101 | 0,597 | 0,1090 |
| 45 | 0,455 | 0,046 | 0,397 | 0,094 | 0,488 | 0,109 | 0,453 | 0,115 | 0,448 | 0,0895 |

Utilizando-se as informações da Tab.4.8, juntamente com a Eq. (2.10) obteve-se a Tab. 4.9. Nota-se nesta tabela os níveis codificados das cinco variáveis de entrada e a interação entre elas, ou seja, os efeitos principais e os efeitos secundários. Ainda, na mesma tabela, é possível identificar média geral da rebarba, na primeira coluna. Através destas informações torna-se possível gerar uma matriz com dimensão de 45 x 16, chamada de matrizes do coeficiente de contraste. Conforme nesta tabela, a última coluna é formada

pela altura média da rebarba de cada ensaio, sendo que essa não faz parte da matriz de contraste, mas sim da matriz de resultados.

Tabela 4.9 – Níveis codificados das cinco variáveis e as suas interações

| Nº do Ens. | M | VBB | Ψ | ap | f | Vc | Vcf | Vcap | Vc Ψ | VcVBB | fap | f Ψ | fVBB | ap Ψ | apVBB | Ψ VBB | $h_{\text{médio}}$ [mm] |
|------------|----|-------|--------|-------|-------|-------|-----|------|-----------|-------|-----|----------|------|-----------|-------|------------|-------------------------|
| 1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 0,242 |
| 2 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 0,289 |
| 3 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 0,165 |
| 4 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 0,184 |
| 5 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | 0,182 |
| 6 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | 0,256 |
| 7 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | 0,207 |
| 8 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | 0,241 |
| 9 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | 0,459 |
| 10 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | 0,464 |
| 11 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | 0,423 |
| 12 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | 0,425 |
| 13 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | 0,504 |
| 14 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | 0,751 |
| 15 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | 0,372 |
| 16 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | 0,654 |
| 17 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | 0,419 |
| 18 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | 0,452 |
| 19 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | 0,375 |
| 20 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | 0,411 |
| 21 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | 0,576 |
| 22 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | 0,634 |
| 23 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | 0,598 |
| 24 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | 0,475 |
| 25 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | 0,937 |
| 26 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | 0,925 |
| 27 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | 0,758 |
| 28 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | 0,614 |
| 29 | +1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 1,076 |
| 30 | +1 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 1,137 |
| 31 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 1,172 |
| 32 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 1,115 |
| 33 | +1 | -1,72 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,165 |
| 34 | +1 | +1,72 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,513 |
| 35 | +1 | 0 | -1,72 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,219 |
| 36 | +1 | 0 | +1,72 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,920 |
| 37 | +1 | 0 | | -1,72 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,342 |
| 38 | +1 | 0 | 0 | +1,72 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,114 |
| 39 | +1 | 0 | 0 | 0 | -1,72 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,641 |
| 40 | +1 | 0 | 0 | 0 | +1,72 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,472 |
| 41 | +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1,72 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,815 |
| 42 | +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | +1,72 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,575 |
| 43 | +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,532 |
| 44 | +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,597 |
| 45 | +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,448 |

4.3.3 - Análise de significância entre os efeitos

Determina-se a significância dos efeitos, conforme o item 2.12.4. A matriz de contraste do planejamento foi formada pelas dezesseis colunas da Tab. 4.9, sendo elas da segunda até a décima sexta. Na última coluna da mesma tabela é encontrado a média da altura das rebarbas, dado por $h_{\text{médio}}$. Esta coluna formou a matriz resposta do planejamento.

Durante os ensaios foram observados prováveis fatores que possam interferir na qualidade das respostas do experimento. Dentre eles podem ser destacados a diferença no intervalo de tempo entre os primeiros ensaios e entre as réplicas. Este fator pode interferir

nas medidas das rebarbas, pois a qualidade do silicone de condensação utilizado, depende do tempo da reação química entre o fluido e o catalisador. Foram utilizadas barras diferentes do material durante a confecção dos CPs. Ainda que comprovadamente o material seja o mesmo, para todos CPs, pequenas variações durante a “corrida” e principalmente no tratamento térmico pode influenciar nas propriedades mecânicas do material.

Portanto, com o objetivo de reduzir os prováveis problemas causados pelos fatores, citados no parágrafo anterior, os 180 ensaios foram divididos em blocos, sendo que o bloco número 1 foi composto pelos primeiros ensaios. No bloco número 2 foi utilizada a primeira réplica. Enquanto que o bloco número 3 foi formado pela segunda réplica e no último bloco, número 3, utilizou-se os ensaios da terceira réplica.

Com a ajuda de recursos computacionais as resoluções das equações e a blocagem que envolve o planejamento dos ensaios tornaram-se mais rápidas e confiáveis. Utilizando-se um *software* dedicado à estatística, conhecido por STATISTICA 6.0, foram obtidos os valores dos efeitos principais e de interações, juntamente com o intervalo de confiança e o erro padrão dos mesmos. Os seus valores encontram-se Tab. 4.10.

Tabela 4.10 – Efeitos das variáveis e suas interações

| Fatores | Efeitos | Erro Padrão | p | Intervalo de confiança (95%) | |
|--------------------------------|------------------|-------------|----------|------------------------------|-----------|
| | | | | Mínimo | Máximo |
| Média | 0,480843 | 0,028590 | 0,000000 | 0,414914 | 0,546772 |
| Réplica 1 | 0,047500 | 0,031246 | 0,166947 | -0,012276 | 0,059776 |
| Réplica 2 | 0,036344 | 0,031246 | 0,278274 | -0,017854 | 0,054199 |
| Réplica 3 | 0,001944 | 0,031246 | 0,951906 | -0,035054 | 0,036999 |
| VB _B | 0,339907 | 0,019645 | 0,000000 | 0,147303 | 0,192604 |
| VB _B ² | -0,073167 | 0,028776 | 0,034568 | -0,069762 | -0,003405 |
| Ψ | 0,384556 | 0,019645 | 0,000000 | 0,169628 | 0,214928 |
| Ψ ² | 0,081776 | 0,028776 | 0,021751 | 0,007709 | 0,074067 |
| a _p | 0,105700 | 0,019645 | 0,000661 | 0,030199 | 0,075500 |
| a _p ² | -0,147654 | 0,028776 | 0,000895 | -0,107006 | -0,040649 |
| f _z | -0,073615 | 0,019645 | 0,005646 | -0,059458 | -0,014157 |
| f _z ² | 0,073117 | 0,028776 | 0,034662 | 0,003380 | 0,069737 |
| V _c | 0,013381 | 0,019645 | 0,515007 | -0,015960 | 0,029341 |
| V _c ² | 0,185268 | 0,028776 | 0,000201 | 0,059455 | 0,125813 |
| VB _B Ψ | 0,093672 | 0,021392 | 0,002353 | 0,022170 | 0,071502 |
| VB _B a _p | 0,086703 | 0,021392 | 0,003669 | 0,018686 | 0,068017 |
| VB _B f _z | -0,010547 | 0,021392 | 0,635247 | -0,029939 | 0,019392 |
| VB _B V _c | -0,054141 | 0,021392 | 0,035210 | -0,051736 | -0,002405 |
| Ψ a _p | 0,070828 | 0,021392 | 0,010684 | 0,010748 | 0,060080 |
| Ψ f _z | -0,019984 | 0,021392 | 0,377547 | -0,034658 | 0,014673 |
| Ψ V _c | 0,013359 | 0,021392 | 0,549697 | -0,017986 | 0,031345 |
| a _p f _z | 0,033859 | 0,021392 | 0,152132 | -0,007736 | 0,041595 |
| a _p V _c | 0,036203 | 0,021392 | 0,129042 | -0,006564 | 0,042767 |
| f _z V _c | -0,028734 | 0,021392 | 0,216064 | -0,039033 | 0,010298 |

Considerando os resultados obtidos, conforme a Tab.4.10, as cinco variáveis de entrada do experimento terão seus comportamentos discutidos a seguir, independente da significância, pois a notabilidade destas variáveis recebe destaque não só na formação da rebarba no fresamento, mas também em outros processos de usinagem.

A velocidade de corte linear demonstrou não ter nenhuma significância na formação da rebarba (o nível da probabilidade p chega a 51% aproximadamente), sendo este comportamento diferente das demais variáveis. O gráfico da Fig. 4.20 mostra a tendência da relação entre a altura da rebarba e a variação da velocidade, para os ensaios que vão de 1 até 32 e suas respectivas réplicas. No mesmo, nota-se um pequeno aumento da altura da rebarba em relação ao crescimento da velocidade. Ainda observa-se, que boa parte da altura da rebarba tem dimensões semelhantes para as duas velocidades de corte proposta. No mesmo gráfico observa-se ainda uma elevada dispersão da altura da rebarba em relação à velocidade de corte.

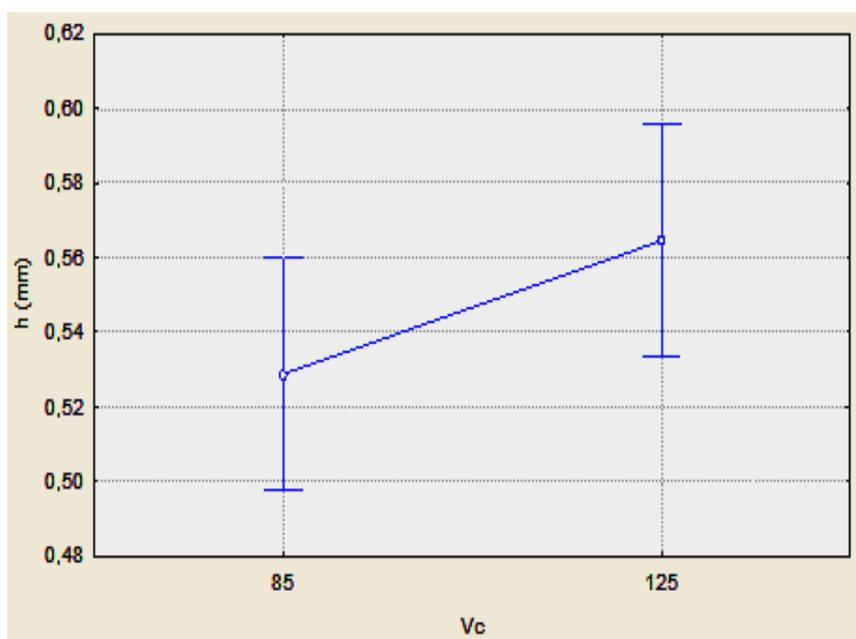


Figura 4.20 – Comportamento da altura da rebarba para os dois níveis da velocidade de corte. Sendo: $f_z = 0,08$ mm/dente, $a_p = 0,7$ mm, $V_{Bb} = 0,2$ mm e $\Psi = 94,5^\circ$

O valor médio da altura da rebarba para a velocidade de 85 m/min (valor básico inferior) é de aproximadamente 0,530 mm, enquanto que para a velocidade de 125 m/min (valor básico superior) mede aproximadamente 0,565 mm. A diferença entre as duas alturas vale 0,035 mm. Este valor é muito pequeno quando comparado com a sua dispersão.

Como já é conhecida da literatura, a velocidade de corte tem um efeito pequeno, mas positivo, no fresamento. A formação da rebarba é decisivamente influenciada pelas forças

de corte que por sua vez não depende da velocidade de corte, mas sim da espessura do cavaco (HEISEL et al., 2009).

Da Silva (2004), durante o fresamento do ferro fundido cinzento, observou reduzida dependência da altura da rebarba em relação à variação da velocidade de corte. O aumento da velocidade de corte causa a redução do tempo de contato cavaco ferramenta na interface, proporcionando o aumento do ângulo de cisalhamento e conseqüentemente um menor grau de recalque (MACHADO; DA SILVA, 2009). Estes são fatores que reduzem a deformação plástica na zona de cisalhamento primária e como conseqüência a formação de rebarbas com dimensões reduzidas. Por outro lado, o aumento da velocidade de corte promove a elevação da temperatura, tornando-se a deformação plástica do material da peça maior. Este fato poderá causar um pequeno aumento na altura da rebarba, como foi notado na Fig. 4.20. Ocorre que no planejamento proposto, as outras variáveis em estudo têm influência muito maior que a velocidade de corte. Este fato torna o efeito da velocidade de corte praticamente desprezível.

O avanço por dente apresentou considerável significância. O seu efeito tem um comportamento negativo em relação à altura da rebarba. Ou seja, na medida em que o avanço aumenta a altura da rebarba decresce. O gráfico da Fig. 4.21 relaciona a altura da rebarba com o avanço, para os ensaios entre 1 e 32 e as suas respectivas réplicas. No mesmo observa-se uma altura média da rebarba de aproximadamente de 0,58 mm para um avanço de 0,06 mm por dente. Aumentando o avanço para 0,10 mm por dente, verifica-se a redução da altura média da rebarba para 0,51 mm aproximadamente. Em avanços menores, (neste trabalho são valores próximos do nível básico inferior, ou seja, 0,06 mm/dente) o material da peça é comprimido pelas arestas da ferramenta de corte. Essa compressão irá gerar uma grande deformação plástica do material. Essa deformação proporciona o aumento da altura da rebarba, que tem o mecanismo de formação identificado pelo tipo *Poisson*. Conforme o avanço aumenta, observa-se o cisalhamento do material da peça e a formação do cavaco, proporcionando à redução da deformação plástica, como conseqüência a redução da altura da rebarba. O mecanismo de formação dessa rebarba é identificado pelo tipo *Tear* ou *Rollover* ou até mesmo pelas duas.

No fresamento do aço AISI 1040 Olvera e Barrow (1996), notaram a participação do avanço na formação da rebarba de saída. Foi observada uma redução na altura da rebarba quando o avanço aumenta.

Quando o fresamento ocorre com avanços menores, o cavaco tem espessura reduzida. A aresta da ferramenta toca a peça (superfície encruada devido ao corte anterior), gerando atrito em excesso, elevada temperatura e, em conseqüência, alta deformação plástica, portanto, não acontecendo o corte. Esta deformação promove o deslocamento de

material, sendo este fenômeno denominado de sulcamento (*ploughing*). Na medida em que a espessura do material aumenta, isto ocorre com o aumento do avanço, a pressão da aresta cortante atinge o valor acima da tensão de ruptura e a aresta da ferramenta penetra no material, iniciando a formação do cavaco (OLVERA; BARROW, 1995).

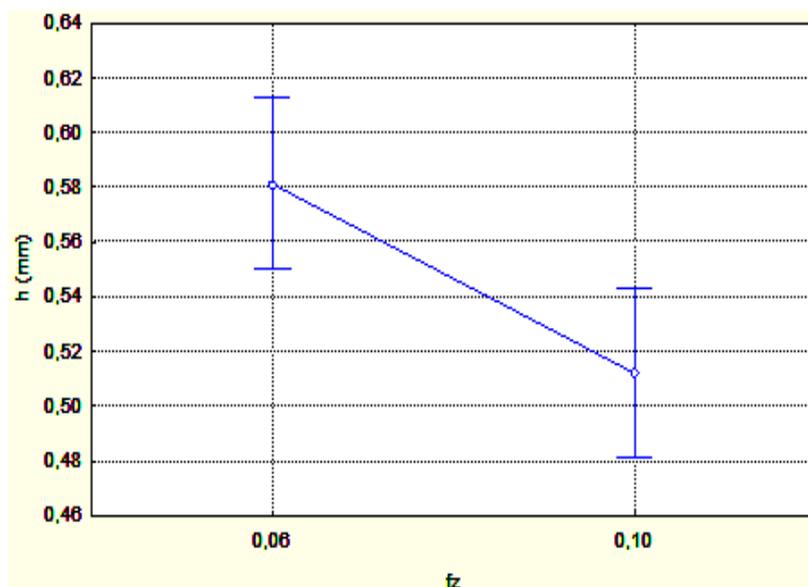


Figura 4.21 - Comportamento da altura da rebarba para os dois níveis do avanço por dente. Sendo: $V_c = 105$ m/min, $a_p = 0,7$ mm, $VB_B = 0,2$ mm e $\Psi = 94,5^\circ$

Conforme verifica-se na décima linha da Tab. 4.10, a profundidade de corte é de grande importância na formação da rebarba investigada. Considerando os ensaios de 1 até 32 e as suas réplicas, o intervalo da profundidade de corte utilizada foi de 0,5 mm a 0,9 mm (para evitar a formação da rebarba secundária). Observou-se uma rebarba com altura média de 0,47 mm para a profundidade de corte de 0,5 mm, enquanto que para uma profundidade de corte de 0,9 mm a altura média aumentou para 0,63 mm (Fig. 4.22).

As rebarbas formadas durante os ensaios são caracterizadas por rebarbas primárias. Esta é uma imposição verificada pelos níveis do ângulo de saída da peça, raio de arredondamento da ferramenta e principalmente da profundidade de corte. Acredita-se que em alguns ensaios formou-se, de forma aleatória, rebarba secundária.

Nos ensaios 3, 4 e 5 formaram rebarbas com altura média de 0,165, 0,184 e 0,182 mm respectivamente. Obviamente na Fig. 4.22 a interação entre a profundidade de corte e as demais variáveis não foi considerada. Portanto, na referida figura, não se apresenta altura das rebarbas menores que 0,43 mm.

No gráfico da Fig. 4.22, verificou-se a dependência, de forma proporcional, da altura da rebarba em relação à profundidade de corte, para os intervalos onde ocorreu a formação

da rebarba primária. Quanto à rebarba secundária, não observou-se nenhuma relação entre a sua altura e a profundidade de corte.

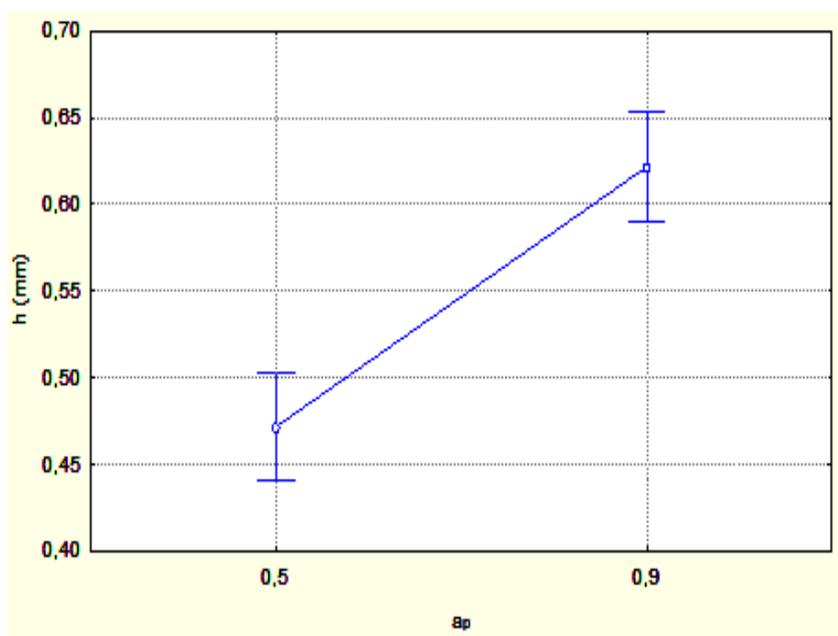


Figura 4.22 - Comportamento da altura da rebarba para os dois níveis da profundidade de corte. Sendo: $V_c = 105$ m/min, $f_z = 0,08$ mm/dente, $V_{BB} = 0,2$ mm e $\Psi = 94,5^\circ$

No fresamento, a dimensão da seção do cavaco é de responsabilidade da largura do corte, que por sua vez, depende da profundidade de corte, dentre outros. Portanto, o cavaco terá a sua seção maior na medida em que a profundidade de corte é aumentada. Conforme foi comentado no item 2.6, a formação da rebarba ocorre após a deformação plástica do material formador do cavaco, quando a ferramenta de corte aproxima-se da borda da peça, tornando desta forma a altura da rebarba primária diretamente proporcional a profundidade de corte.

O ângulo de saída da peça, no planeamento em exposição é a variável que tem a maior influência, dentre as demais. Notou-se, neste caso, uma considerável elevação da altura rebarba conforme pode ser visto no gráfico da Fig. 4.23, correspondente aos ensaios 1 até o 32 e as suas réplicas. Para um ângulo Ψ de 67° a altura média da rebarba é de aproximadamente 0,35 mm. Enquanto que para Ψ de 122° a altura média da rebarba vale aproximadamente de 0,75 mm. O aumento do ângulo Ψ , do nível inferior de 67° para o nível superior de 122° , promoveu a elevação da rebarba em um valor acima do dobro. Ainda pode ser observado, no gráfico da Fig. 4.23, a baixa dispersão entre os valores medidos, atingindo pouco mais de 0,05 mm.

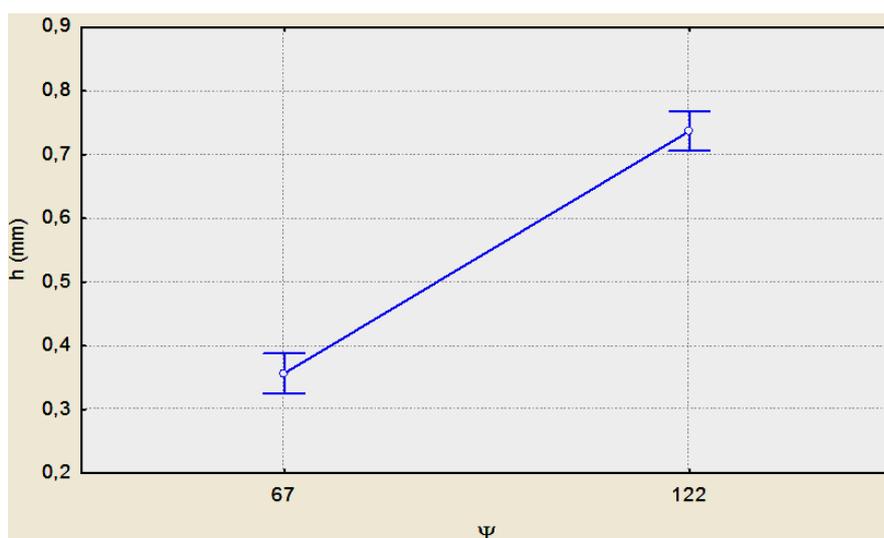


Figura 4.23 - Comportamento da altura da rebarba para os dois níveis do ângulo de saída da peça. Sendo: $V_c = 105$ m/min, $f_z = 0,08$ mm/dente, $VB_B = 0,2$ mm e $a_p = 0,7$ mm

Conforme se prevê em várias outras informações literárias, (TRIPATHI; DORNFELD, 2004) há uma considerável dependência das dimensões da rebarba com o ângulo da saída da peça, uma vez que utilizado um ângulo Ψ menor que 30° , a dimensão da rebarba passa a ser desconsiderada. No fresamento das ligas de Al 2024-T4 e Al 6061-T6, Chern (2006b) verificou a elevação da altura da rebarba de saída, em relação ao aumento ângulo de saída da peça (Ψ).

Nesta investigação, o ângulo Ψ é diretamente proporcional a penetração de trabalho, conforme descreve a relação formulada pela Eq. (4.2). É possível observar, de forma clara, que as variações ocorridas na penetração de trabalho altera a EOS da ferramenta de corte. Essa alteração modifica o fluxo de cavaco na borda de saída da ferramenta, determinando a dimensão da rebarba formada nesta borda.

Na maioria dos ensaios onde utilizou-se o nível inferior do ângulo de saída da peça, aliado ao nível inferior do desgaste da ferramenta, formou-se rebarbas com morfologia semelhante aquelas do tipo faca. Esse tipo de rebarba predominou-se em quase todas as bordas da peça nos ensaios 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8. Diferente do que ocorreu com quase todos os ensaios onde o Ψ foi de 122° e o VB_B de 0,10 mm. Nas bordas das peças analisadas nos ensaios 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 e 16 predominaram-se rebarbas com morfologia do tipo onda.

O desgaste da ferramenta de corte teve elevada significância no planejamento. O gráfico da Fig. 4.24 analisa os ensaios entre 1 a 32 e as suas respectivas réplicas. Conforme verifica-se no mesmo, a altura média da rebarba, para os desgaste de 0,10 mm, passou de 0,35 mm aproximadamente para uma media acima de 0,70 mm para VB_B de 0,30

mm. Percebeu-se uma tendência para o predomínio da rebarba do tipo caracol nos ensaios onde a ferramenta de corte tem desgaste elevado, no caso $VB_B = 0,30$ mm. Isto ocorre porque o mecanismo de formação da rebarba e a sua altura dependem da geometria da ponta da ferramenta (OLVERA; BARROW, 1998).

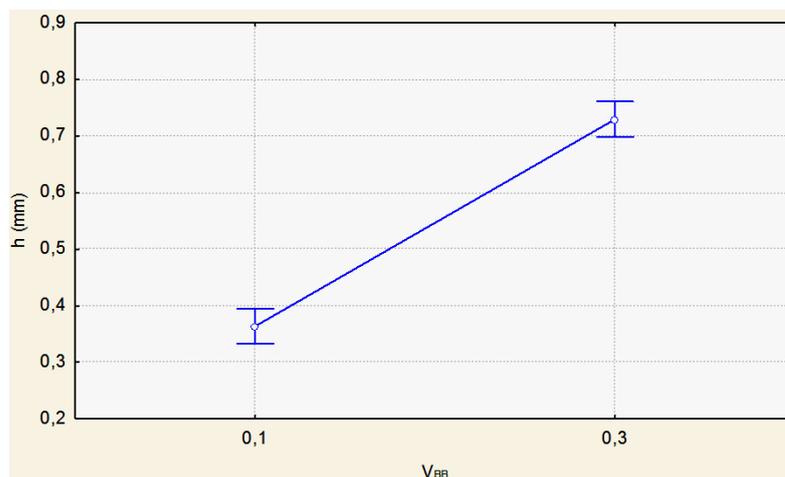


Figura 4.24 – Comportamento da altura da rebarba para os dois níveis do desgaste da ferramenta. Sendo: $V_c = 105$ m/min, $f_z = 0,08$ mm/dente, $\Psi = 94,5^\circ$ e $a_p = 0,7$ mm

Durante a usinagem do ferro fundido cinzento Souza Jr (2001) e Da Silva (2004) observaram que o desgaste da ferramenta de corte foi uma variável que mais modificou a altura da rebarba, pois na medida em que o desgaste da ferramenta de corte evolui, a altura da rebarba aumenta. Isso ocorreu para ferramentas de cerâmica e de PCBN em qualquer condição de corte. Lin (1999), durante o fresamento do aço inoxidável, verificou que não só no fresamento frontal, mas em quase todos os processos de usinagem, as dimensões da rebarba dependem do nível de desgaste da ferramenta, pois o desgaste altera a geometria original da ferramenta de corte, alterando a área de contato na interface cavaco-ferramenta. Como consequência ocorre o aumento na geração do calor, aumento das forças de usinagem, e a elevação da deformação plástica (MACHADO; Da SILVA, 2009). Esses fatores podem promover a alteração dimensional da rebarba.

Dentre os efeitos das interações de segunda ordem, destacaram aqueles que confrontaram principalmente, o desgaste da ferramenta de corte com o ângulo de saída da peça, o desgaste da ferramenta de corte com a profundidade de corte, o desgaste da ferramenta de corte com a velocidade de corte e o ângulo de saída da peça e a profundidade de corte. As interações que envolveram o avanço não foram consideradas significativas.

O gráfico da Fig. 4.25 retrata comportamento das duas variáveis pertencentes a interações significativas, de segunda ordem para os ensaios que vão de 1 até 32. A Fig. 2.25a mostra o comportamento das variáveis da interação entre o desgaste da ferramenta com o ângulo de saída da peça. No mesmo observou-se uma diferença, de 0,29 mm, entre as alturas da rebarba formadas nos dois níveis dos ângulos Ψ (122° e 67°), para VB_B de 0,1 mm. Para o desgaste VB_B de 0,3 mm a diferença foi de 0,45. Verificando-se as diferenças da altura da rebarba entre os níveis das variáveis de interação mostradas nos gráficos das Fig. 4.25b, 4.25c e 4.25d, conclui-se que a interação de $VB_B\Psi$ é maior, dentre as demais, seguida pela interação VB_Ba_p . Portanto, o maior crescimento da rebarba foi verificado quando o ângulo de saída da peça (Ψ) aumentou, desde que, durante o corte, sejam utilizadas ferramentas de corte desgastadas (VB_B próximos de 0,30 mm).

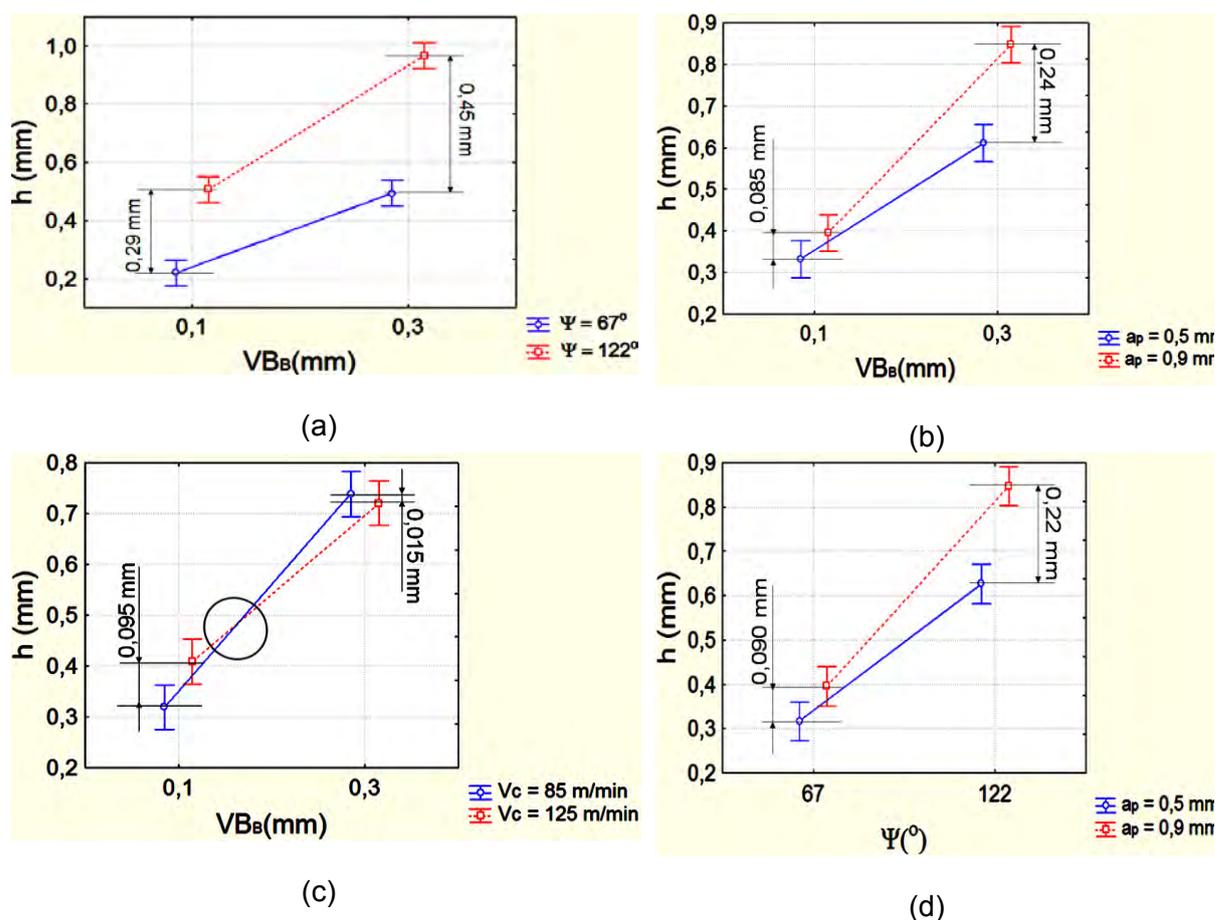


Figura 4.25 - Efeito das interações de segunda ordem. a) - interação $VB_B\Psi$, b) - interação VB_Ba_p , c) - interação VB_BV_c d) - interação Ψa_p

Na Fig. 4.25b é mostrado as variáveis da interação entre o desgaste da ferramenta de corte e a profundidade de corte. Na mesma pode ser identificada a igualdade na altura da

rebarba para os dois níveis da profundidade de corte, quando o desgaste da ferramenta VB_B medir 0,1 mm. Isto mostra reduzidíssimo crescimento da rebarba quando a profundidade de corte é aumentada, desde que seja utilizado um desgaste de flanco próximo de 0,10 mm. O mesmo não se verifica quando o desgaste da ferramenta de corte aumenta.

No experimento, a velocidade de corte linear parece não demonstrar nenhuma importância na formação da rebarba, quando comparado com as outras quatro variáveis. No entanto a sua interação com e o desgaste da ferramenta de corte foi significativa. O gráfico da Fig. 4.25c retrata a interação entre as duas variáveis. No mesmo gráfico observou-se que para o desgaste da ferramenta de corte ($VB_B = 0,15$ mm aproximadamente), aparece uma mesma altura da rebarba (0,475 mm aproximadamente) para duas velocidades de corte, conforme mostra a região circulada no referido gráfico. Na mesma figura nota-se que inicialmente o aumento da velocidade de corte proporciona o aumento da altura da rebarba. Após a região circulada a altura da rebarba irá diminuir, na medida em que a velocidade de corte aumenta. Isto se deve ao fato do efeito de interação das duas variáveis ($VB_B V_C$) ser negativo.

Dentre as quatro variáveis significativas, consideradas importantes, no estudo das interações de segunda ordem, a profundidade de corte tem o menor efeito principal, conforme verifica-se na Tab.4.10. Esta reduzida participação da profundidade de corte, durante a análise da sua interação com o ângulo da saída da peça e o desgaste da ferramenta de corte, pode ser notada na Fig. 4.22, pois a diferença da altura média da rebarba entre as profundidades de 05 mm e 0,9 mm é de aproximadamente 0,15 mm.

4.3.4 – Modelo matemático para predição da altura da rebarba

O planejamento utilizado permite a elaboração de um modelo matemático capaz de estimar a altura da rebarba. É de responsabilidade do PCC a geração de um modelo matemático de segunda ordem, pois para a elaboração do mesmo foram utilizados 5 níveis para cada variável. Os coeficientes foram determinados, conforme a análise de regressão, pelo arranjo operacional entre as matrizes do coeficiente de contraste e a matriz resposta, ambas retiradas da Tab. 4.9. Utilizando os mesmos recursos computacionais do item 4.3.3, obteve-se a Tab. 4.11 com os coeficientes do modelo matemático.

O referido modelo matemático é dado por pela Eq. (4.4). A qualidade do mesmo dependerá do comportamento do resíduo. A análise de variância para o ajuste do modelo matemático, com todos os fatores aparece na Tab. 4.12. O coeficiente de determinação (R^2) do modelo que descreve o experimento vale 0,8320 ou seja, 83,20% da variação total dos valores medidos, em torno da media, são descritas pelo modelo. Este é um valor razoavelmente bom, ficando, portanto 16,80% para o resíduo.

Tabela 4.11 – Coeficientes para o modelo matemático devido a regressão

| Fatores | Coeficientes | Erro Padrão | p | Intervalo de confiança (95%) | |
|------------|------------------|-------------|----------|------------------------------|-----------|
| | | | | Mínimo | Máximo |
| Média | 0,480843 | 0,028590 | 0,000000 | 0,414914 | 0,546772 |
| Réplica 1 | 0,023750 | 0,015623 | 0,166947 | -0,012276 | 0,059776 |
| Réplica 2 | 0,018172 | 0,015623 | 0,278274 | -0,017854 | 0,054199 |
| Réplica 3 | 0,000972 | 0,015623 | 0,951906 | -0,035054 | 0,036999 |
| VB_B | 0,169954 | 0,009822 | 0,000000 | 0,147303 | 0,192604 |
| VB_B^2 | -0,036584 | 0,014388 | 0,034568 | -0,069762 | -0,003405 |
| Ψ | 0,192278 | 0,009822 | 0,000000 | 0,169628 | 0,214928 |
| Ψ^2 | 0,040888 | 0,014388 | 0,021751 | 0,007709 | 0,074067 |
| a_p | 0,052850 | 0,009822 | 0,000661 | 0,030199 | 0,075500 |
| a_p^2 | -0,073827 | 0,014388 | 0,000895 | -0,107006 | -0,040649 |
| f_z | -0,036808 | 0,009822 | 0,005646 | -0,059458 | -0,014157 |
| f_z^2 | 0,036558 | 0,014388 | 0,034662 | 0,003380 | 0,069737 |
| V_c | 0,006690 | 0,009822 | 0,515007 | -0,015960 | 0,029341 |
| V_c^2 | 0,092634 | 0,014388 | 0,000201 | 0,059455 | 0,125813 |
| $VB_B\Psi$ | 0,046836 | 0,010696 | 0,002353 | 0,022170 | 0,071502 |
| $VB_B a_p$ | 0,043352 | 0,010696 | 0,003669 | 0,018686 | 0,068017 |
| $VB_B f_z$ | -0,005273 | 0,010696 | 0,635247 | -0,029939 | 0,019392 |
| $VB_B V_c$ | -0,027070 | 0,010696 | 0,035210 | -0,051736 | -0,002405 |
| Ψa_p | 0,035414 | 0,010696 | 0,010684 | 0,010748 | 0,060080 |
| Ψf_z | -0,009992 | 0,010696 | 0,377547 | -0,034658 | 0,014673 |
| ΨV_c | 0,006680 | 0,010696 | 0,549697 | -0,017986 | 0,031345 |
| $a_p f_z$ | 0,016930 | 0,010696 | 0,152132 | -0,007736 | 0,041595 |
| $a_p V_c$ | 0,018102 | 0,010696 | 0,129042 | -0,006564 | 0,042767 |
| $f_z V_c$ | -0,014367 | 0,010696 | 0,216064 | -0,039033 | 0,010298 |

$$\hat{h} = (48,08 - 3,68f_z + 5,28a_p + 16,99VB_B + 19,22\Psi - 2,70V_cVB_B + 3,54a_p\Psi + 4,33a_pVB_B + 4,68\Psi VB_B + 9,26V_c^2 + 3,65f_z^2 - 7,38a_p^2 - 3,65VB_B^2 + 4,08\Psi^2)/100 \text{ (mm)} \quad (4.4)$$

O coeficiente de determinação (R^2) é de 0,8320, considerado razoável. Verificou-se na Tab. 4.12, que o nível probabilidade (p) é de 0,4543. Para a falta de ajuste do modelo, p

> 5%, não ficou evidenciada. Desta forma as respostas obtidas pelo experimento se ajustam ao modelo matemático mostrado pela Eq. (4.4).

Tabela 4.12 – Análise de variância para o ajuste do modelo

| Fatores | SQ | gdf | MQ | F | P |
|-----------------|----------|-----|----------|----------|-----------------|
| Blocos | 0,12308 | 3 | 0,041028 | 2,8016 | 0,108473 |
| VB_B | 4,38431 | 1 | 4,384314 | 299,3847 | 0,000000 |
| VB_B^2 | 0,09468 | 1 | 0,094678 | 6,4651 | 0,034568 |
| Ψ | 5,61178 | 1 | 5,611780 | 383,2027 | 0,000000 |
| Ψ^2 | 0,11827 | 1 | 0,118268 | 8,0760 | 0,021751 |
| ap | 0,42396 | 1 | 0,423964 | 28,9505 | 0,000661 |
| ap^2 | 0,38557 | 1 | 0,385573 | 26,3290 | 0,000895 |
| fz | 0,20564 | 1 | 0,205643 | 14,0424 | 0,005646 |
| fz^2 | 0,09455 | 1 | 0,094547 | 6,4562 | 0,034662 |
| Vc | 0,00679 | 1 | 0,006794 | 0,4640 | 0,515007 |
| Vc^2 | 0,60704 | 1 | 0,607037 | 41,4518 | 0,000201 |
| $VB_B\Psi$ | 0,28078 | 1 | 0,280781 | 19,1733 | 0,002353 |
| $VB_B ap$ | 0,24056 | 1 | 0,240558 | 16,4266 | 0,003669 |
| $VB_B fz$ | 0,00356 | 1 | 0,003560 | 0,2431 | 0,635247 |
| $VB_B Vc$ | 0,09380 | 1 | 0,093799 | 6,4051 | 0,035210 |
| Ψap | 0,16053 | 1 | 0,160532 | 10,9620 | 0,010684 |
| Ψfz | 0,01278 | 1 | 0,012780 | 0,8727 | 0,377547 |
| ΨVc | 0,00571 | 1 | 0,005711 | 0,3900 | 0,549697 |
| apfz | 0,03669 | 1 | 0,036687 | 2,5052 | 0,152132 |
| apVc | 0,04194 | 1 | 0,041941 | 2,8640 | 0,129042 |
| fzVc | 0,02642 | 1 | 0,026421 | 1,8042 | 0,216064 |
| Falta de ajuste | 2,49913 | 148 | 0,016886 | 1,1531 | 0,454327 |
| Erro puro | 0,11716 | 8 | 0,014644 | | |
| Total | 15,57474 | 179 | | | |

Utilizando o valor dos níveis codificados para cada variável, foi obtido o valor estimado da altura da rebarba para cada ensaio. Conhecido o valor medido da altura da rebarba dos ensaios, conforme no anexo I do capítulo 8, elaborou-se a Tab. 4.13, com os resíduos de cada ensaio.

Tabela 4.13 – Altura da rebarba com valores medidos, estimados e os resíduos

| Ensaio | Medido | Estimado | Resíduo | Ensaio | Medido | Estimado | Resíduo |
|------------------|----------|----------|-----------|------------|----------|----------|-----------|
| Primeiros Ensaio | | | | 1ª Réplica | | | |
| 1 | 0,292000 | 0,223263 | 0,068737 | 46 | 0,197000 | 0,289908 | -0,092908 |
| 2 | 0,343000 | 0,269957 | 0,073043 | 47 | 0,220000 | 0,336601 | -0,116601 |
| 3 | 0,188000 | 0,175055 | 0,012945 | 48 | 0,112000 | 0,241699 | -0,129699 |
| 4 | 0,315000 | 0,164279 | 0,150721 | 49 | 0,110000 | 0,230924 | -0,120924 |
| 5 | 0,083000 | 0,101369 | -0,018369 | 50 | 0,188000 | 0,168014 | 0,019986 |
| 6 | 0,198000 | 0,220469 | -0,022469 | 51 | 0,245000 | 0,287114 | -0,042114 |
| 7 | 0,180000 | 0,120879 | 0,059121 | 52 | 0,158000 | 0,187524 | -0,029524 |
| 8 | 0,128000 | 0,182510 | -0,054510 | 53 | 0,368000 | 0,249155 | 0,118845 |
| 9 | 0,493000 | 0,449945 | 0,043055 | 54 | 0,463000 | 0,516589 | -0,053589 |
| 10 | 0,415000 | 0,523357 | -0,108357 | 55 | 0,467000 | 0,590001 | -0,123001 |
| 11 | 0,465000 | 0,361767 | 0,103233 | 56 | 0,437000 | 0,428411 | 0,008589 |
| 12 | 0,535000 | 0,377710 | 0,157290 | 57 | 0,342000 | 0,444355 | -0,102355 |
| 13 | 0,047000 | 0,469707 | -0,422707 | 58 | 0,822000 | 0,536351 | 0,285649 |
| 14 | 0,682000 | 0,615525 | 0,066475 | 59 | 0,835000 | 0,682170 | 0,152830 |
| 15 | 0,057000 | 0,096224 | -0,039224 | 60 | 0,470000 | 0,515892 | -0,045892 |
| 16 | 0,697000 | 0,537598 | 0,159402 | 61 | 0,693000 | 0,604242 | 0,088758 |
| 17 | 0,390000 | 0,447483 | -0,057483 | 62 | 0,393000 | 0,514127 | -0,121127 |
| 18 | 0,345000 | 0,385895 | -0,040895 | 63 | 0,453000 | 0,452540 | 0,000460 |
| 19 | 0,322000 | 0,378180 | -0,056180 | 64 | 0,377000 | 0,444825 | -0,067825 |
| 20 | 0,368000 | 0,259124 | 0,108876 | 65 | 0,452000 | 0,325768 | 0,126232 |
| 21 | 0,418000 | 0,498995 | -0,080995 | 66 | 0,760000 | 0,565640 | 0,194360 |
| 22 | 0,533000 | 0,509814 | 0,023186 | 67 | 0,752000 | 0,576458 | 0,175542 |
| 23 | 0,540000 | 0,497411 | 0,042589 | 68 | 0,653000 | 0,564056 | 0,088944 |
| 24 | 0,547000 | 0,450761 | 0,096239 | 69 | 0,378000 | 0,517406 | -0,139406 |
| 25 | 0,797000 | 0,861508 | -0,064508 | 70 | 1,067000 | 0,928152 | 0,138848 |
| 26 | 0,553000 | 0,826639 | -0,273639 | 71 | 1,237000 | 0,893283 | 0,343717 |
| 27 | 0,498000 | 0,752237 | -0,254237 | 72 | 0,812000 | 0,818881 | -0,006881 |
| 28 | 0,510000 | 0,659899 | -0,149899 | 73 | 0,637000 | 0,726543 | -0,089543 |
| 29 | 1,002000 | 1,054676 | -0,052676 | 74 | 1,182000 | 1,121321 | 0,060679 |
| 30 | 1,088000 | 1,092214 | -0,004214 | 75 | 1,207000 | 1,158858 | 0,048142 |
| 31 | 1,192000 | 1,013124 | 0,178876 | 76 | 1,185000 | 1,079768 | 0,105232 |
| 32 | 1,297000 | 1,266620 | 0,030380 | 77 | 0,973000 | 1,059837 | -0,086837 |
| 33 | 0,133000 | 0,036088 | 0,096912 | 78 | 0,130000 | 0,102732 | 0,027268 |
| 34 | 0,590000 | 0,622235 | -0,032235 | 79 | 0,570000 | 0,688879 | -0,118879 |
| 35 | 0,267000 | 0,227966 | 0,039034 | 80 | 0,178000 | 0,294610 | -0,116610 |
| 36 | 0,812000 | 0,891107 | -0,079107 | 81 | 0,945000 | 0,957751 | -0,012751 |
| 37 | 0,260000 | 0,127275 | 0,132725 | 82 | 0,355000 | 0,193920 | 0,161080 |
| 38 | 0,108000 | 0,309547 | -0,201547 | 83 | 0,128000 | 0,376192 | -0,248192 |
| 39 | 0,723000 | 0,610133 | 0,112867 | 84 | 0,720000 | 0,676778 | 0,043222 |
| 40 | 0,415000 | 0,483189 | -0,068189 | 85 | 0,422000 | 0,549834 | -0,127834 |
| 41 | 0,847000 | 0,701874 | 0,145126 | 86 | 0,793000 | 0,768518 | 0,024482 |
| 42 | 0,618000 | 0,724949 | -0,106949 | 87 | 0,642000 | 0,791593 | -0,149593 |
| 43 | 0,501000 | 0,437949 | 0,063051 | 88 | 0,446000 | 0,504593 | -0,058593 |
| 44 | 0,725000 | 0,437949 | 0,287051 | 89 | 0,600000 | 0,504593 | 0,095407 |
| 45 | 0,455000 | 0,437949 | 0,017051 | 90 | 0,397000 | 0,504593 | -0,107593 |
| 2ª Réplica | | | | 3ª Réplica | | | |
| 91 | 0,243000 | 0,284330 | -0,041330 | 136 | 0,235000 | 0,267130 | -0,032130 |
| 92 | 0,297000 | 0,331024 | -0,034024 | 137 | 0,295000 | 0,313824 | -0,018824 |

| | | | | | | | |
|-----|----------|----------|-----------|-----|----------|----------|-----------|
| 93 | 0,212000 | 0,236121 | -0,024121 | 138 | 0,147000 | 0,218921 | -0,071921 |
| 94 | 0,180000 | 0,225346 | -0,045346 | 139 | 0,130000 | 0,208146 | -0,078146 |
| 95 | 0,313000 | 0,162436 | 0,150564 | 140 | 0,142000 | 0,145236 | -0,003236 |
| 96 | 0,358000 | 0,281536 | 0,076464 | 141 | 0,223000 | 0,264336 | -0,041336 |
| 97 | 0,328000 | 0,181946 | 0,146054 | 142 | 0,162000 | 0,164746 | -0,002746 |
| 98 | 0,252000 | 0,243577 | 0,008423 | 143 | 0,215000 | 0,226377 | -0,011377 |
| 99 | 0,467000 | 0,511011 | -0,044011 | 144 | 0,412000 | 0,493811 | -0,081811 |
| 100 | 0,475000 | 0,584423 | -0,109423 | 145 | 0,500000 | 0,567223 | -0,067223 |
| 101 | 0,402000 | 0,422834 | -0,020834 | 146 | 0,388000 | 0,405634 | -0,017634 |
| 102 | 0,375000 | 0,438777 | -0,063777 | 147 | 0,482000 | 0,421577 | 0,060423 |
| 103 | 0,725000 | 0,530773 | 0,194227 | 148 | 0,420000 | 0,513573 | -0,093573 |
| 104 | 0,655000 | 0,676592 | -0,021592 | 149 | 0,832000 | 0,659392 | 0,172608 |
| 105 | 0,622000 | 0,510315 | 0,111685 | 150 | 0,338000 | 0,493115 | -0,155115 |
| 106 | 0,547000 | 0,598664 | -0,051664 | 151 | 0,673000 | 0,581464 | 0,091536 |
| 107 | 0,455000 | 0,508550 | -0,053550 | 152 | 0,437000 | 0,491350 | -0,054350 |
| 108 | 0,603000 | 0,446962 | 0,156038 | 153 | 0,407000 | 0,429762 | -0,022762 |
| 109 | 0,412000 | 0,439247 | -0,027247 | 154 | 0,388000 | 0,422047 | -0,034047 |
| 110 | 0,412000 | 0,320191 | 0,091809 | 155 | 0,412000 | 0,302991 | 0,109009 |
| 111 | 0,555000 | 0,560062 | -0,005062 | 156 | 0,570000 | 0,542862 | 0,027138 |
| 112 | 0,575000 | 0,570880 | 0,004120 | 157 | 0,675000 | 0,553680 | 0,121320 |
| 113 | 0,562000 | 0,558478 | 0,003522 | 158 | 0,638000 | 0,541278 | 0,096722 |
| 114 | 0,488000 | 0,511828 | -0,023828 | 159 | 0,487000 | 0,494628 | -0,007628 |
| 115 | 0,918000 | 0,922575 | -0,004575 | 160 | 0,965000 | 0,905375 | 0,059625 |
| 116 | 0,957000 | 0,887706 | 0,069294 | 161 | 0,952000 | 0,870506 | 0,081494 |
| 117 | 0,952000 | 0,813303 | 0,138697 | 162 | 0,768000 | 0,796103 | -0,028103 |
| 118 | 0,730000 | 0,720965 | 0,009035 | 163 | 0,578000 | 0,703765 | -0,125765 |
| 119 | 1,108000 | 1,115743 | -0,007743 | 164 | 1,010000 | 1,098543 | -0,088543 |
| 120 | 1,090000 | 1,153280 | -0,063280 | 165 | 1,163000 | 1,136080 | 0,026920 |
| 121 | 1,202000 | 1,074190 | 0,127810 | 166 | 1,110000 | 1,056990 | 0,053010 |
| 122 | 1,005000 | 1,054259 | -0,049259 | 167 | 1,183000 | 1,037059 | 0,145941 |
| 123 | 0,213000 | 0,097155 | 0,115845 | 168 | 0,183000 | 0,079955 | 0,103045 |
| 124 | 0,397000 | 0,683301 | -0,286301 | 169 | 0,495000 | 0,666101 | -0,171101 |
| 125 | 0,251000 | 0,289033 | -0,038033 | 170 | 0,178000 | 0,271833 | -0,093833 |
| 126 | 0,945000 | 0,952173 | -0,007173 | 171 | 0,978000 | 0,934973 | 0,043027 |
| 127 | 0,370000 | 0,188342 | 0,181658 | 172 | 0,383000 | 0,171142 | 0,211858 |
| 128 | 0,108000 | 0,370614 | -0,262614 | 173 | 0,113000 | 0,353414 | -0,240414 |
| 129 | 0,590000 | 0,671200 | -0,081200 | 174 | 0,530000 | 0,654000 | -0,124000 |
| 130 | 0,533000 | 0,544256 | -0,011256 | 175 | 0,518000 | 0,527056 | -0,009056 |
| 131 | 0,752000 | 0,762941 | -0,010941 | 176 | 0,868000 | 0,745741 | 0,122259 |
| 132 | 0,622000 | 0,786015 | -0,164015 | 177 | 0,643000 | 0,768815 | -0,125815 |
| 133 | 0,601000 | 0,499015 | 0,101985 | 178 | 0,580000 | 0,481815 | 0,098185 |
| 134 | 0,375000 | 0,499015 | -0,124015 | 179 | 0,687000 | 0,481815 | 0,205185 |
| 135 | 0,488000 | 0,499015 | -0,011015 | 180 | 0,453000 | 0,481815 | -0,028815 |

Resumidamente, os resíduos entre o valores medidos e os estimados podem ser melhor analisados através dos gráficos da Fig. 4.26. Aparentemente os resíduos deixados pelos 180 ensaios distribuem de forma normal e aleatória, conforme nota-se na Fig. 4.26a. O valor do resíduo para os 180 ensaios encontram-se representados na Fig. 4.26b.

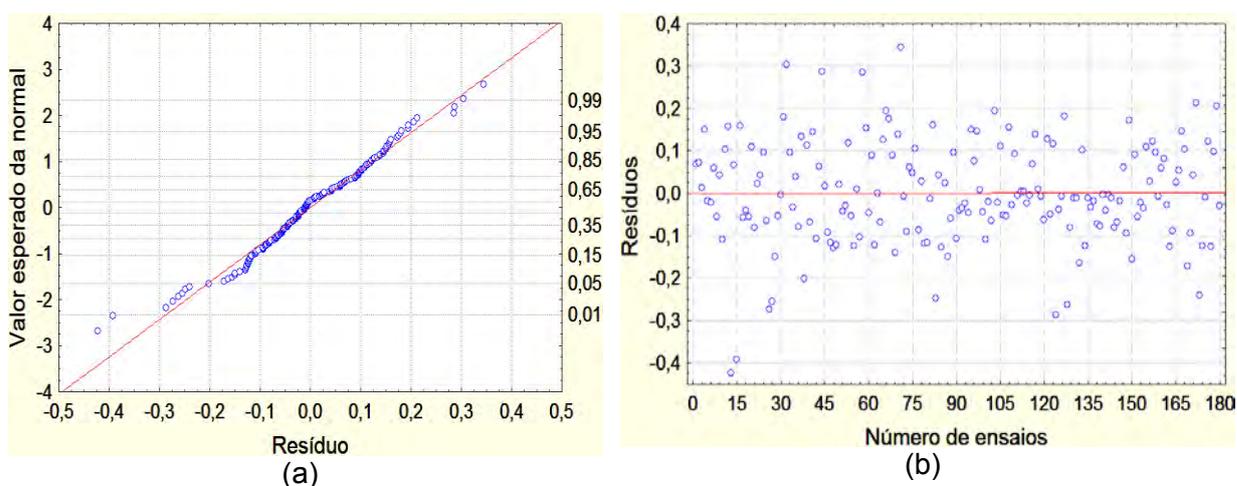


Figura 4.26 – Resíduo entre os valores medidos e estimados. a) – Distribuição normal do resíduo, b) – Valor do resíduo para os 180 ensaios

Os valores dos resíduos mostrados na Tab. 4.13 e apresentados nos gráficos da Fig. 4.26, foram obtidos pela diferença entre o valor medido da rebarba e o valor da rebarba estimada pelo modelo da Eq. 4.4, ou seja, $\text{Resíduo} = h - \hat{h}$. Sabe-se que o resíduo deve ter média igual a zero e variância constante e igual 1, $\text{resíduo} \cong N(0, 1)$.

Um teste de homocedasticidade foi realizado para verificar o comportamento da variância dos resíduos, pois a análise gráfica deles, conforme Fig. 4.26, não foi suficiente para notar se a variância dos resíduos permaneceu constante. Portanto, utilizando os resíduos apresentados na Tab. 4.13 realizou-se os testes de Hartley, Cochran, Bartlett e Levene (CALADO; MONTGOMERY, 2003), (BARROS NETO et al., 2003). O resultado dos mesmos (conforme Tab. 4.14) mostram que o nível probabilidade (p) para os três primeiros teste é de 0,2149, enquanto que para o último teste e de 0,1999. Nos quatro casos o valor do nível probabilidade (p) é maior que 0,05, aceitando, desta forma, a hipótese de homogeneidade dos resíduos da variância.

Tabela 4.14 – Teste de homocedasticidade para verificação da variância dos resíduos

| | Testes | | | gdf | p |
|-----------------|------------------|----------------|----------------------|----------------|-----------------|
| | Hartley F max | Cochran C | Bartlett χ^2 | | |
| Resíduos | 1,658294 | 0,317045 | 4,470415 | 179 | 0,214944 |
| Teste de Levene | | | | | |
| | MQ efeitos | MQ resíduos | F | p | |
| Resíduos | 0,008066 | 0,005160 | 1,563318 | 0,19999 | |

4.3.5 - Otimização do processo de formação da rebarba

É praticamente impossível evitar o surgimento por completo da rebarba. Por tratar-se de um resíduo indesejável e capaz de trazer uma série de problemas, como já foi citado no item 2.2, torna-se, portanto, uma opção razoável utilizar níveis das condições de usinagem onde são formadas rebarbas menores.

Conhecido o modelo matemático gerado pelo PCC, será realizado a otimização do experimento utilizando, inicialmente, a Metodologia de Superfície de Resposta (RSM). O objetivo desta otimização é selecionar os níveis das variáveis para obter a menor altura da rebarba. Complementando a otimização do processo, realizou-se outra etapa onde foi aplicado um método de multivariáveis. Após a obtenção dos níveis considerados ótimos, gerados pelos dois processos de otimização, os mesmos devem ser instalados na máquina-ferramenta para a realização de novos ensaios. Estes novos ensaios deverão validar os níveis das variáveis, considerados ótimos.

Os gráficos da Fig. 4.27 mostram a superfície resposta da interação entre VB_{Ψ} considerando o avanço, a velocidade, e a profundidade de corte de 0,08 mm/dente, 105 m/min e 0,7mm, respectivamente. O comportamento das duas variáveis em relação à altura da rebarba é retratado na Fig. 4.27a, quando considerado os níveis mínimos e máximos. Conforme verifica-se nos gráficos destas figuras, principalmente na Fig. 4.27b, as menores rebarbas são formadas em regiões onde os ângulos Ψ estão entre 50° e 70° e o desgaste de flanco da ferramenta de corte em torno de 0,02 a 0,04 mm, sendo estes valores próximos do limite mínimo investigado. Para os referidos intervalos, o gráfico da Fig. 4.27b aponta para uma rebarba com altura máxima de 0,04 mm, aproximadamente. Conforme a norma ISO 13715, na Fig. 2.1c, nesta condição as bordas são consideradas livres de rebarba, pois as mesmas não ultrapassam 0,05 mm.

A redução do ângulo Ψ deve ser um procedimento cuidadoso, pois dependendo do valor que o mesmo assumir, as ferramentas de corte ficarão sujeitas a algum tipo de avaria em função do choque mecânico. Sendo a penetração de trabalho proporcional ao ângulo Ψ , conforme Eq. (4.2) deve ser lembrado, portanto, que a dimensão do mesmo está relacionada com a geometria da peça. Alterações na dimensão do referido ângulo poderá elevar o custo dos produtos usinados pelos seguintes fatores: poderão ocorrer o aumento no número de passadas, exigência de maior disponibilidade de ferramental e outros.

Ferramentas novas, ou seja, com reduzido desgaste de flanco promovem a obtenção de rebarbas menores. Esta solução é pouco adotada, pois critérios rigorosos definem o final de vida das ferramentas de corte no chão de fábrica. Na grande maioria das vezes estes critérios não levam em consideração as dimensões da rebarba, visto que o desgaste da ferramenta não atua isoladamente na formação da rebarba. No experimento em questão,

verificou-se rebarbas com dimensões aproximadas de 0,4 mm para ferramentas de corte com desgaste de flanco próximo de 0,20 mm, como é mostrado na Fig. 4.27a.

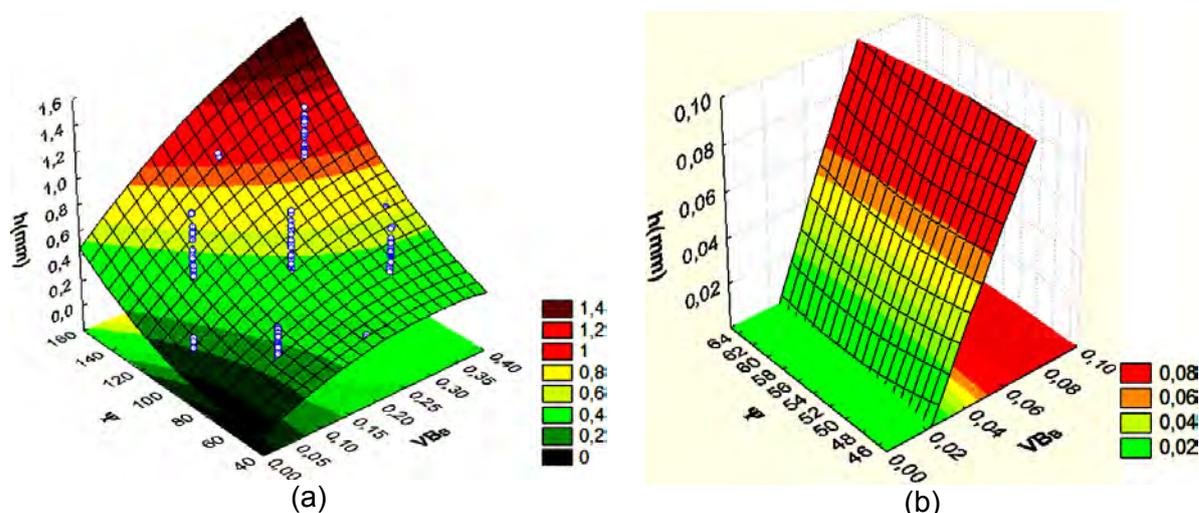


Figura 4.27 – Superfície resposta da interação entre $VB\Psi$, a) - Superfície resposta da interação entre $VB\Psi$ considerando o nível máximo e mínimo, b) - Superfície resposta da interação entre $VB\Psi$ para níveis onde forma a menor rebarba

A interação entre o desgaste da ferramenta e a profundidade de corte é mostrada no gráfico da figura Fig. 4.28. Para a obtenção do referido gráfico utilizou-se o avanço, a velocidade de corte, e o ângulo de saída da peça de 0,08 mm/dente, 105 m/min e 94,5°, respectivamente. Da mesma forma que ocorreu na interação entre $VB\Psi$, rebarbas primárias menores foram formadas no nível inferior da profundidade de corte e do desgaste, conforme verifica-se na Fig. 4.28a.

A manipulação da profundidade de corte é um procedimento que garante o sucesso no controle dimensional da rebarba. A sua redução leva, de forma direta, a redução da rebarba primária enquanto que o seu aumento proporciona a formação da rebarba secundária, sendo esta última a ideal, pois a sua dimensão é muito reduzida. Deve ser observado que o aumento da profundidade de corte causará a elevação da força de corte.

Para ferramentas de corte com desgaste de flanco até 0,10 mm e uma profundidade de corte um pouco menor que 0,4 mm, verificou-se a ausência de rebarbas, ou seja, foi formado rebarbas com altura de 0,05 mm, no máximo. Ainda foi observada a ausência da rebarba no intervalo das profundidades de corte que vão de 0,5 até 0,75 mm, quando utilizadas ferramentas novas, ou seja, desgaste de flanco de até 0,05 mm. Neste mesmo intervalo, quando utilizou-se ferramentas com desgaste entre 0,05 e 0,10 mm, a rebarba teve a sua altura aumentada de forma proporcional, conforme mostra a Fig. 4.28b.

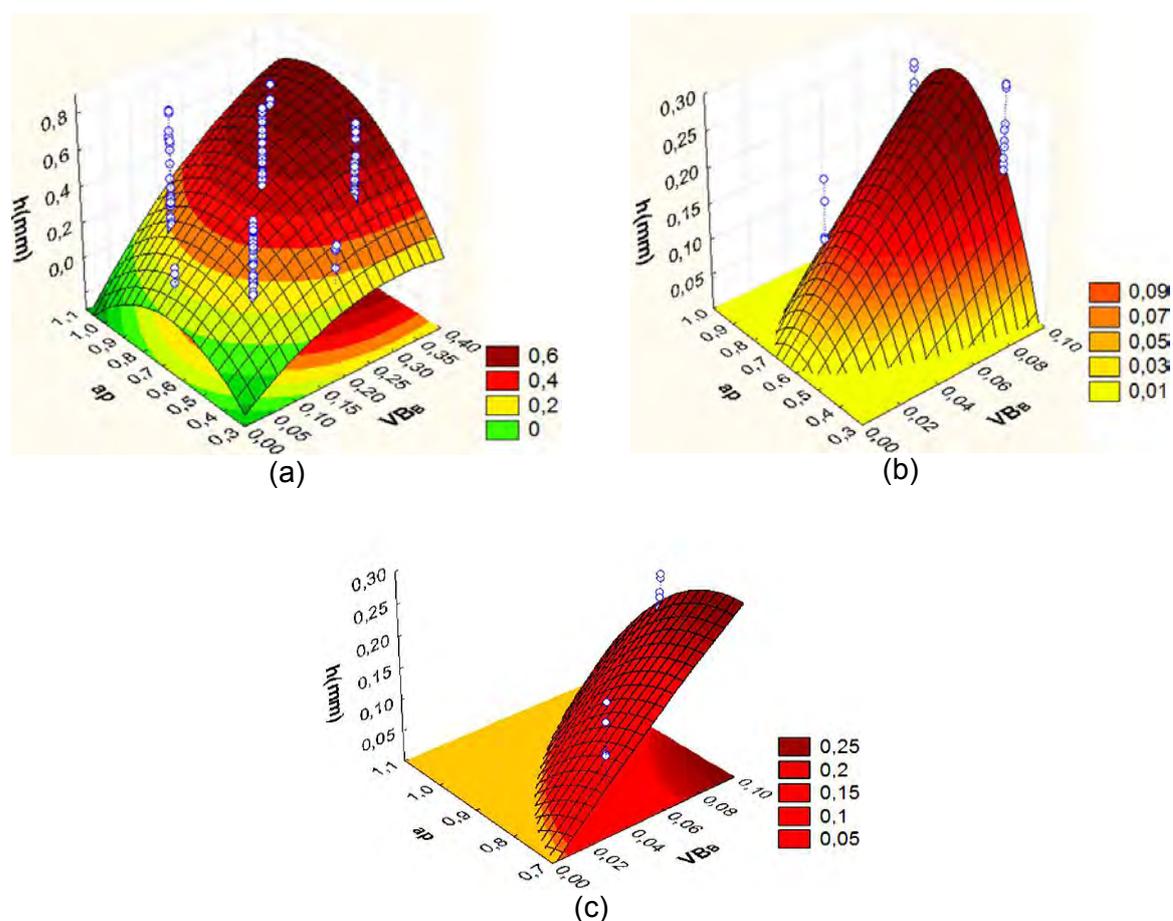


Figura 4.28 - Superfície resposta da interação VB_{ap} , a) - Superfície resposta da interação VB_{ap} considerando o nível máximo e mínimo, b) - Superfície resposta da interação VB_{ap} para níveis onde forma a menor rebarba, c) - Superfície resposta da interação VB_{ap} para profundidades de corte próximas do nível superior

Diferente do que se esperava, a rebarba passou a ter a sua altura reduzida quando a profundidade de corte ultrapassou 0,8 mm, mostrado na Fig. 4.28c. Na medida em que a profundidade de corte e o desgaste de flanco aumentam a rebarba tem a sua altura reduzida, podendo atingir valores mínimos, próximos de zero, para profundidades de corte próximas do nível superior (1,1 mm), e desgaste de flanco até 0,10 mm. Acredita-se que a rebarba formada nesta região sofre a influência dos mesmos mecanismos formadores da rebarba secundária, conforme foi discutido nos itens 2.7.4, 2.10.1 e 4.2.4.

A interação entre o desgaste de flanco da ferramenta e a velocidade de corte é mostrada no gráfico da Fig. 4.29, neste caso o avanço, profundidade de corte, o ângulo de saída da peça valem 0,08 mm/dente, 0,7 mm e $94,5^\circ$, respectivamente. Nota-se a considerável significância da velocidade de corte, enquanto que o desgaste apresenta-se o mesmo comportamento das interações mostradas anteriormente.

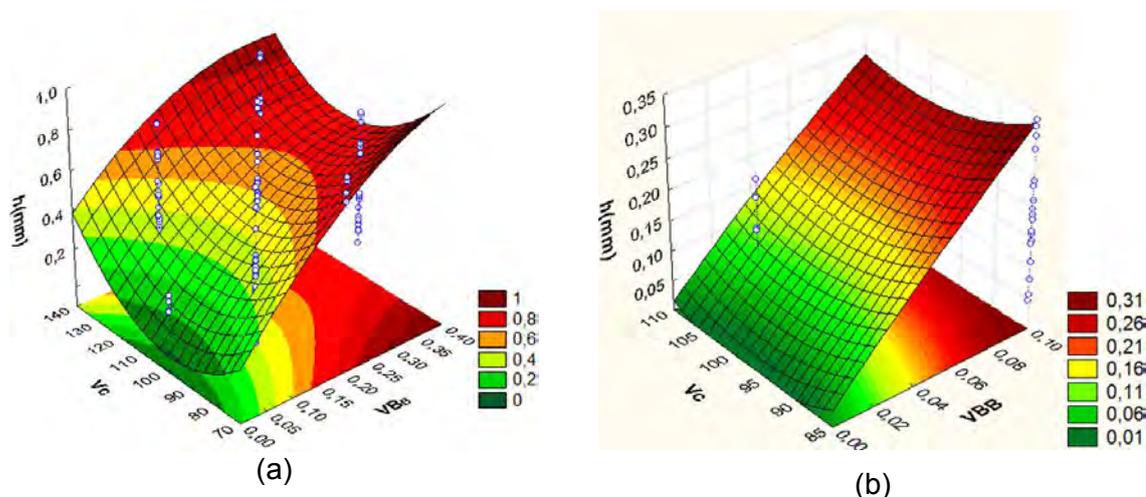


Figura 4.29 - Superfície resposta da interação entre V_B e V_c , a) - Superfície resposta da interação entre V_B e V_c considerando o nível máximo e mínimo. b) - Superfície resposta da interação entre V_B e V_c para níveis onde formou rebarbas menores

Na sela representada pela superfície da Fig. 4.29a é mostrada uma região onde a velocidade de corte juntamente com o nível mínimo do desgaste da ferramenta, formam as menores rebarbas. Esta região é identificada pelo intervalo de velocidade de corte entre 90 e 105 m/min aproximadamente. Para velocidades de corte próximas de 100 m/min irão formar bordas livres de rebarba quando forem utilizadas ferramentas novas, com desgaste de aproximadamente 0,05 mm, conforme é mostrado na Fig. 4.29b.

Apesar da influência reduzida da velocidade de corte a mesma pode ser manipulada no controle dimensional da rebarba, pois neste experimento rebarbas menores são formadas quando foram utilizadas velocidades de corte entre 90 e 105 m/min. Deve ser levada em consideração a redução na produtividade, pois a redução da velocidade de corte, quando for o caso, diminui o tempo de usinagem. Por outro lado, uma menor velocidade de corte proporciona a ferramenta uma redução no desgaste, pois a mesma estará sujeita a menores temperaturas de usinagem.

A interação entre o ângulo de saída da peça e a profundidade de corte é apresentada na Fig. 4.30, sendo que para a obtenção da mesma utilizou-se velocidade de corte, avanço e desgaste de flanco da ferramenta de corte de 105 m/min, 0,08 mm e 0,20 mm, respectivamente.

A profundidade de corte e o ângulo de saída da peça tiveram comportamento semelhantes na interação entre V_B e α , onde verificou-se rebarbas com tamanho reduzido para níveis mínimo e máximo da profundidade de corte e nos níveis mínimos do ângulo de saída da peça, conforme mostra a Fig. 4.30a. Para profundidades de corte em torno de 0,35

mm, aproximadamente, e o ângulo Ψ no intervalo entre 47° e 65° , aproximadamente, foi verificado rebarbas com alturas de no máximo de 0,07 mm, mostrado na Fig. 4.30b. Para o mesmo intervalo do ângulo Ψ , de 47° e 65° , rebarbas menores que 0,05 mm foram observadas em profundidades de corte entre 1,0 e 1,06 mm aproximadamente, conforme mostra a Fig. 4.30c. Estas rebarbas, conforme comentário para a interação entre V_B e Ψ , serão consideradas secundárias, devida a dimensão da profundidade de corte.

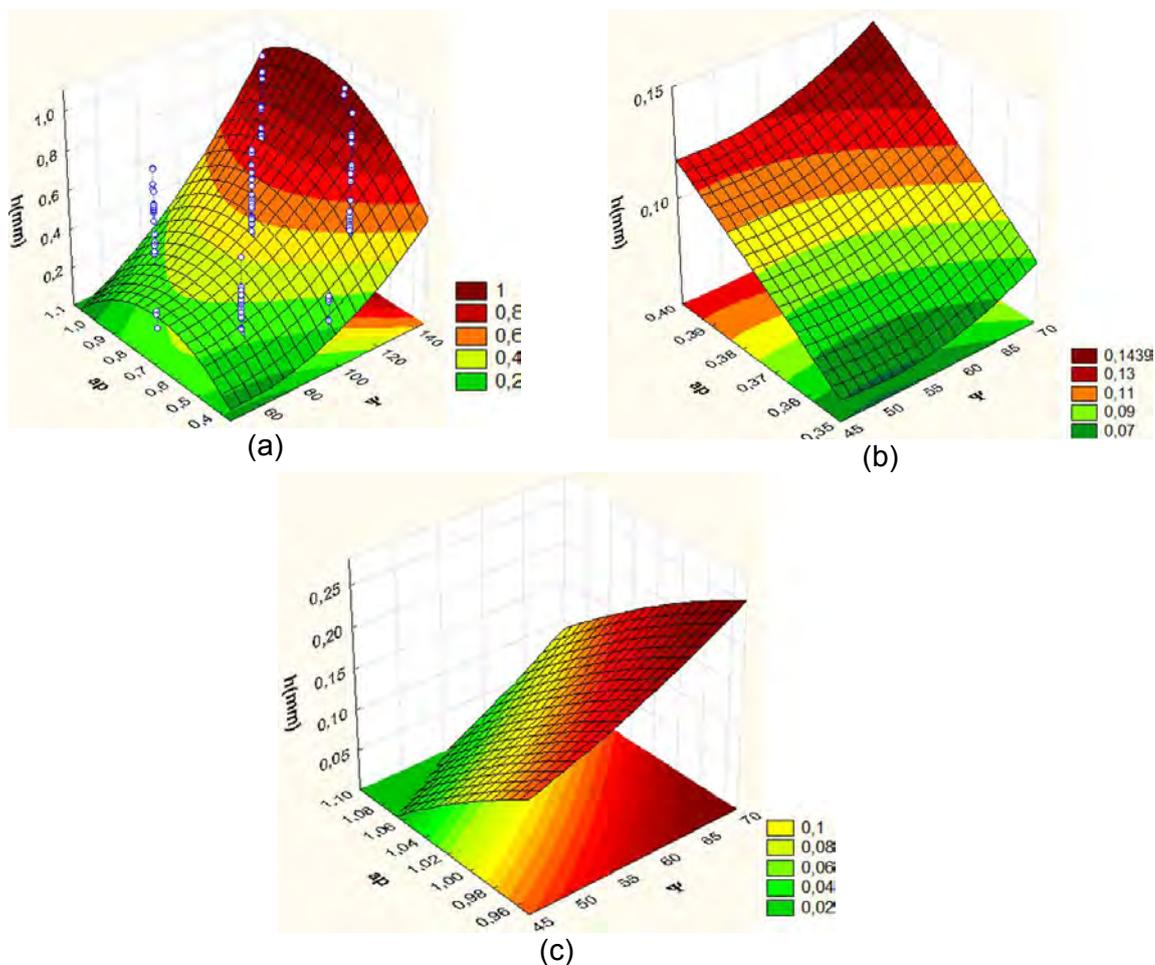


Figura 4.30 - Superfície resposta da interação $a_p\Psi$. a) - Superfície resposta da interação $a_p\Psi$ considerando o nível máximo e mínimo, b) - Superfície resposta da interação $a_p\Psi$ para profundidades de corte próximas do nível mínimo, c) - Superfície resposta da interação $a_p\Psi$ para profundidades de corte próximas do nível máximo

A redução da rebarba também ocorre com o aumento do avanço, conforme discussões anteriores, apesar da sua interação com outras variáveis não apresentar nenhuma significância. Por sua vez, este procedimento promove a elevação da força de corte e a redução da qualidade superficial dos usinados. Conforme verificou-se na interação entre o avanço e a profundidade de corte, maior dentre as que envolve o avanço ($p = 0,15$),

observa-se a redução da rebarba para níveis máximos do avanço quando a profundidade de corte é menor, como mostrado na Fig. 4.31.

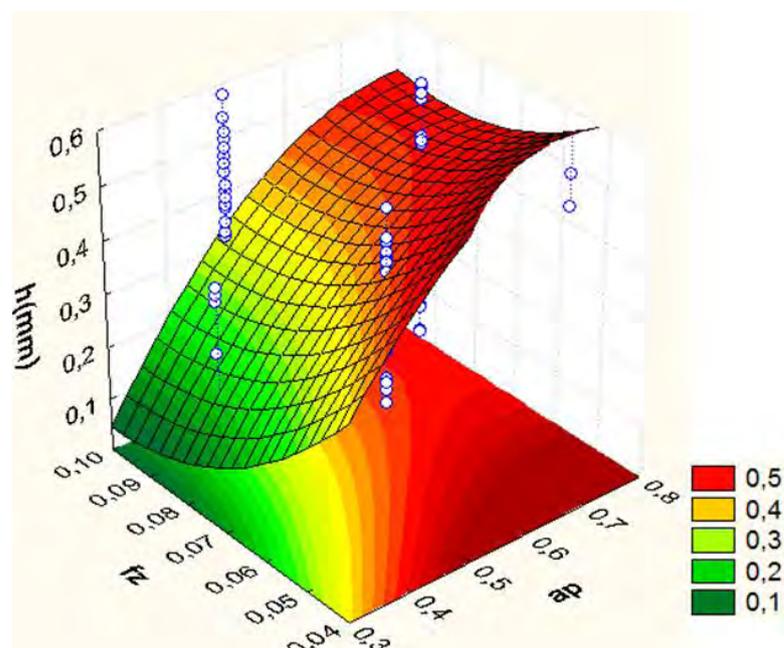


Figura 4.31 - Superfície resposta da interação entre fzap

Através da análise visual das superfícies respostas das Figs. 4.27, 4.28, 4.29, 4.30 e 4.31 conheceu-se os intervalos aproximados dos níveis das cinco variáveis onde ocorreram as menores rebarbas primárias. Estes valores estão mostrados na Tab. 4.15. As referidas superfícies respostas permitiram a análise do comportamento da rebarba em relação a duas variáveis de cada vez. Portanto, com o intuito de aumentar a confiabilidade nos resultados, tornou-se necessário utilizar outro método capaz de envolver as cinco variáveis em uma única análise.

Tabela 4.15 - Intervalo das variáveis de entrada onde serão formadas menores rebarbas

| Variáveis de entrada | Intervalos onde serão formadas rebarbas menores |
|----------------------|---|
| VBB (mm) | $0,02 \leq VBB \leq 0,07$ |
| Ψ (°) | $54 \leq \Psi \leq 75$ |
| ap (mm) | $0,35 \leq ap \leq 0,50$ |
| fz (mm/dente) | $0,95 \leq fz \leq 0,12$ |
| Vc (m/min) | $85 \leq Vc \leq 105$ |

O método de Derringer e Suich atende situações onde são aplicadas multivariáveis de entradas e/ou de saídas, como neste caso. Através deste método, também conhecido

por Função Desejabilidade Global (D), obteve-se os níveis das cinco variáveis onde foi formado rebarbas com altura de 0,05 mm aproximadamente, consideradas rebarbas reduzidas, conforme a norma ISO 13715. A Fig. 4.32 mostra o resultado da utilização do método de otimização. Durante a aplicação do método no experimento em questão utilizou-se os dados da Tab. 4.16.

Tabela 4.16 - Valores dos parâmetros aplicados na otimização pelo método da Função Desejabilidade Global

| Variável de saída | Valor mínimo | Valor desejável | Valor máximo | s | t |
|------------------------|--------------|-----------------|--------------|---|---|
| Altura da rebarba (mm) | 0,00 (d = 0) | 0,05 (d = 1) | 0,07 (d = 0) | 5 | 1 |

O gráfico da Fig. 4.32 mostra a otimização do processo em estudo pelo método da desejabilidade global D, neste é apresentado os níveis das variáveis V_c , f_z , a_p , Ψ e V_{BB} para rebarba com alturas de 0,05 mm. Para uma desejabilidade global, devido as variáveis de entrada, de 0,998 a altura da rebarba otimizada é de 0,05 mm. Para a obtenção deste valor as variáveis V_{BB} , Ψ , a_p , f_z e V_c devem medir 0,028 mm, 85,02°, 0,49 mm, 0,10 mm/dente e 91,2 m/min, respectivamente.

Ainda foi notado, na Fig. 4.32, outro valor para o ângulo de saída de peça considerado ótimo, com desejabilidade global de 0,998, sendo este de 65° aproximadamente. Neste ponto a altura da rebarba atingiu um valor de 0,053 mm. Para uma profundidade de corte de 0,80 mm verificou-se uma desejabilidade global de 0,90 aproximadamente, formando uma rebarba com altura de 0,088 mm. Acredita-se que os níveis das variáveis da profundidade de corte e do ângulo de saída da peça utilizados, neste caso, atendem a formação da rebarba secundária, portanto não utilizado. No avanço observou-se um intervalo, com uma desejabilidade global baixa, em relação ao ponto ótimo, portanto, da mesma forma não foi utilizado. O mesmo ocorre com a velocidade de corte para valores próximos de 125 m/min. Comparando os resultados obtidos, com o auxílio das superfícies respostas, apresentados na Tab. 4.15 e os resultados encontrados, pelo método da desejabilidade global, mostrado no gráfico da Fig. 4.32, pode-se afirmar que existe uma tendência para os mesmos resultados. Com o objetivo de analisar a qualidade do modelo otimizado, realizou se novos ensaios. Nos mesmos foram utilizados os níveis das variáveis que giram em torno dos níveis obtidos no gráfico da Fig. 4.32, e aqueles contidos nos intervalos apresentados na Tab. 4.15, sendo estes escolhidos de forma aleatória. Com o objetivo de observar a tendência dos resultados, foram realizadas três réplicas para todos os ensaios. A Tab. 4.17 mostra o nível das cinco variáveis utilizadas nos 48 ensaios.

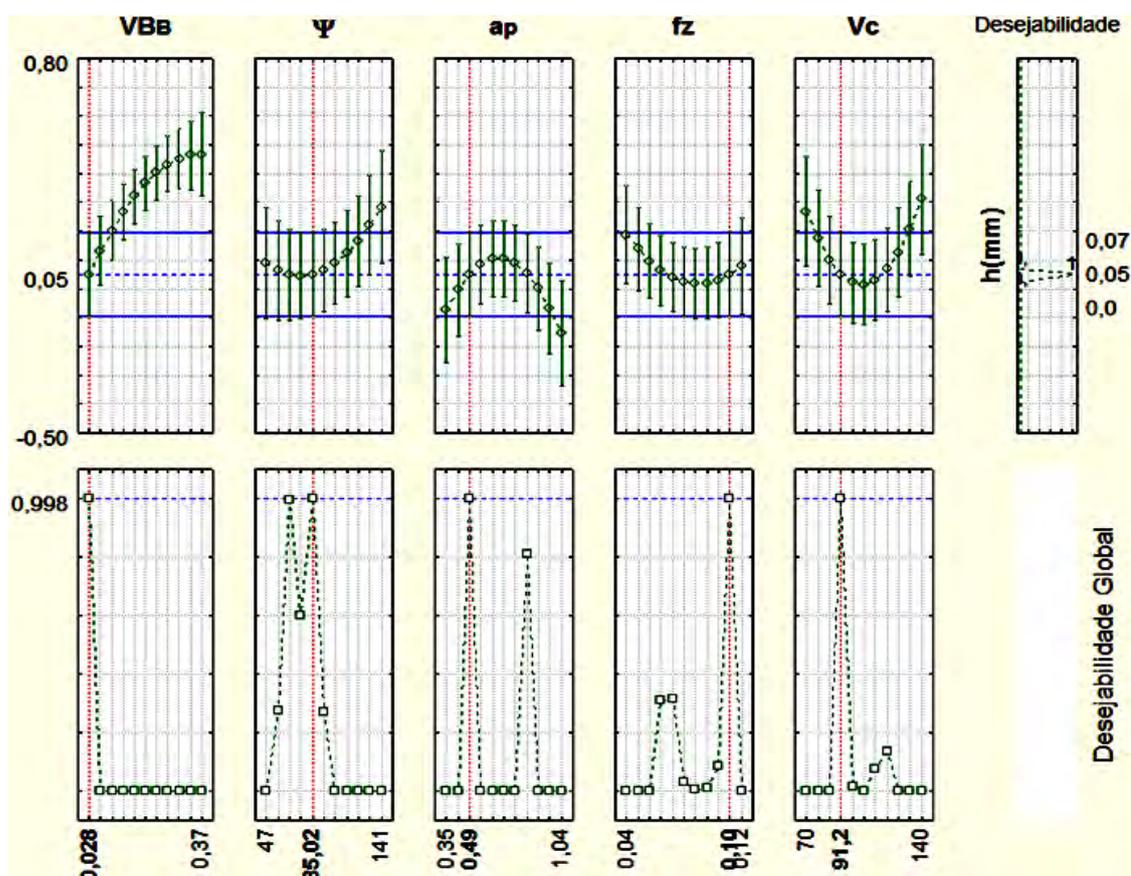


Figura 4.32 - Gráfico da função Desejabilidade Global para o experimento proposto

Tabela 4.17 – Número dos ensaios com os respectivos níveis das variáveis

| Nº Ensaio | Níveis das Variáveis | | | | |
|----------------------------|----------------------|-------|---------|---------------|------------|
| | VB _B (mm) | Ψ (°) | ap (mm) | fz (mm/dente) | Vc (m/min) |
| 1 | 0,02 | 54 | 0,35 | 0,120 | 85 |
| 2 | 0,02 | 59 | 0,37 | 0,120 | 87 |
| 3 | 0,03 | 62 | 0,39 | 0,115 | 89 |
| 4 | 0,03 | 65 | 0,41 | 0,115 | 91 |
| 5 | 0,04 | 68 | 0,43 | 0,110 | 93 |
| 6 | 0,04 | 71 | 0,45 | 0,110 | 95 |
| 7 | 0,05 | 74 | 0,47 | 0,100 | 97 |
| 8 | 0,05 | 77 | 0,49 | 0,100 | 99 |
| 9 | 0,06 | 80 | 0,51 | 0,095 | 101 |
| 10 | 0,06 | 83 | 0,53 | 0,095 | 103 |
| 11(Função D ₁) | 0,028 | 65 | 0,49 | 0,108 | 91,2 |
| 12(Função D ₂) | 0,028 | 85 | 0,49 | 0,108 | 91,2 |

Após a realização dos novos ensaios verificou-se uma considerável dispersão dos valores medidos da altura da rebarba, conforme pode ser notado no anexo III. O modelo matemático mostrado na Eq. 4.4 foi utilizado na obtenção da estimativa da altura da rebarba para os doze novos ensaios mostrado da Tab. 4.17. O valor médio da altura da rebarba para

os doze ensaios com os respectivos intervalos de confiança e seus valores estimados estão apresentados na Tab. 4.18.

Tabela 4.18 - Altura da rebarba estimada e medida com intervalos de confiança

| Nº do Ensaio | Altura da rebarba (mm) | | | | | | Erro (mm) |
|-----------------------|------------------------|------------------------------|--------|--------------|------------------------------|--------|--------------|
| | Valor Estimado | | | Valor medido | | | |
| | Médio | Intervalo de confiança (95%) | | Médio | Intervalo de confiança (95%) | | |
| | | Mínimo | Máximo | | Mínimo | Máximo | |
| 1 | 0,0646 | 0,0 | 0,3149 | 0,0671 | 0,0577 | 0,0765 | 0,0025 |
| 2 | 0,0483 | 0,0 | 0,2810 | 0,0642 | 0,0577 | 0,0706 | 0,0159 |
| 3 | 0,0339 | 0,0 | 0,2259 | 0,0533 | 0,0471 | 0,0595 | 0,0194 |
| 4 | 0,0310 | 0,0 | 0,2116 | 0,0550 | 0,0456 | 0,0644 | 0,0240 |
| 5 | 0,0289 | 0,0 | 0,1750 | 0,0625 | 0,0557 | 0,0693 | 0,0336 |
| 6 | 0,0318 | 0,0 | 0,1696 | 0,0683 | 0,0574 | 0,0793 | 0,0365 |
| 7 | 0,0297 | 0,0 | 0,1311 | 0,0679 | 0,0579 | 0,0779 | 0,0382 |
| 8 | 0,0392 | 0,0 | 0,1350 | 0,0671 | 0,0582 | 0,076 | 0,0279 |
| 9 | 0,0658 | 0,0 | 0,1457 | 0,0983 | 0,0868 | 0,1099 | 0,0325 |
| 10 | 0,0815 | 0,0044 | 0,1586 | 0,1079 | 0,0887 | 0,1213 | 0,0264 |
| 11(F D ₁) | 0,0510 | 0,0 | 0,2063 | 0,0629 | 0,0545 | 0,0713 | 0,0119 |
| 12(F D ₂) | 0,0496 | 0,0 | 0,1909 | 0,0821 | 0,0754 | 0,0888 | 0,0325 |

Como já se esperava, conforme as informações da Tab. 4.18, nota-se que as médias dos valores medidos encontram-se no intervalo de confiança do valor estimado, ou seja, o valor medido aproxima-se do valor estimado. Portanto, a minimização dimensional da rebarba tornou-se possível utilizando os níveis das variáveis obtidos a partir das superfícies respostas, mostrados pelos intervalos da Tab. 4.15 e da função desejabilidade global (D), proposto pela Fig. 4.32.

Cabe salientar que adotar os procedimentos sugeridos pela otimização trará alguns inconvenientes ao processo de fresamento, conforme foi discutido anteriormente, pois as rebarbas primárias menores serão formadas com a redução do ângulo de saída da peça, com a redução do desgaste de flanco das ferramentas de corte, com o aumento do avanço e a redução da profundidade de corte.

Utilizando-se os dados da Tab. 4.18, foi elaborado o gráfico da Fig. 4.33. Neste, a altura da rebarba obtida, após a realização dos doze ensaios e a altura da rebarba estimada pelo modelo matemático da Eq. (4.4), foram relacionadas. Observando o referido gráfico pode-se afirmar que, em todos os ensaios, o valor medido da altura da rebarba encontra-se contido no intervalo de confiança de 95% da rebarba estimada. Desta forma, pode-se afirmar que o critério para a minimização da altura da rebarba, adotado neste trabalho, foi satisfatório, fornecendo resultados próximos do esperado.

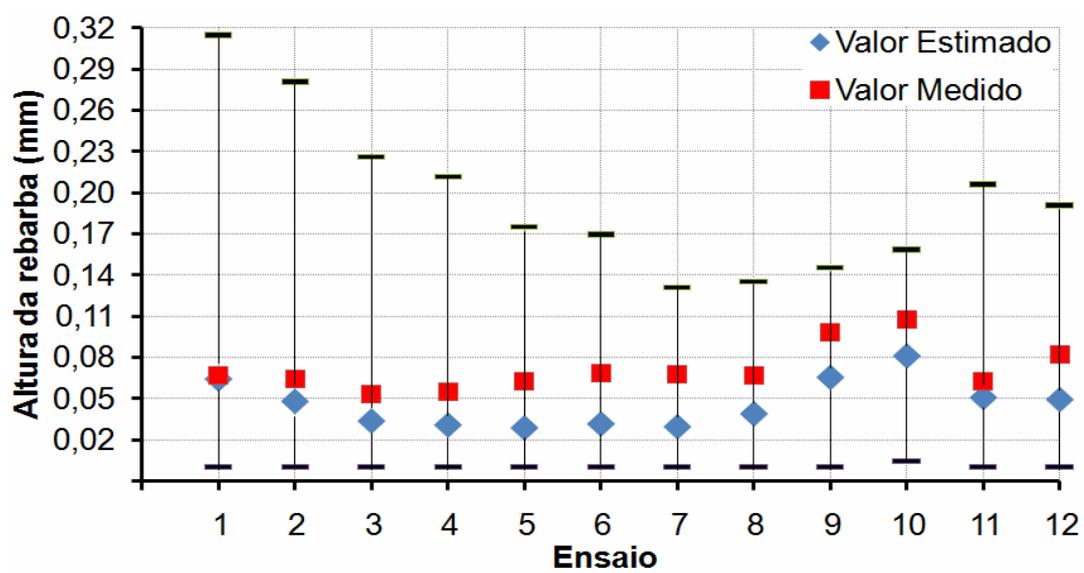


Figura 4.33 - Altura da rebarba formada nos doze ensaios da otimização e a altura da rebarba estimada pelo modelo matemático

CAPÍTULO V

5 - Conclusões

As conclusões relativas a este projeto serão apresentadas a seguir

- Em função do comportamento do material da peça durante o corte, acredita-se que o material tem elevada recuperação elástica.
- A aplicação do fluido de corte e a usinagem a seco não afetaram as dimensões das rebarbas.
- O carregamento da fresa (penetração de trabalho) demonstrou ser um fator importante na formação da rebarba. Grandes carregamentos são formadores de rebarba com elevadas dimensões.
- A formação da rebarba secundária ocorreu quando a profundidade de corte ultrapassou 2,1 mm para uma penetração de trabalho de 57 mm e 0,8 mm para a penetração de trabalho de 40 mm.
- A não retirada da rebarba remanescente proporcionou um aumento linear da rebarba a cada passada.
- A velocidade de corte apresentou-se menos influente nas dimensões da rebarba em relação às demais variáveis examinadas.
- O avanço exerceu grande importância na formação da rebarba. O seu aumento proporcionou rebarbas com dimensões menores.

- A dimensão da rebarba primária é diretamente proporcional a profundidade de corte. Isto ocorre antes da profundidade de transição.

- À medida que o desgaste da ferramenta de corte evolui a dimensão da rebarba aumenta.

- O ângulo de saída da peça foi a variável de maior influência. Considerando os níveis utilizados, o seu aumento proporcionou as maiores rebarbas primárias.

- O sistema de medição demonstrou eficiência na medição da altura da rebarba, grandeza que foi utilizada neste trabalho. A mesma eficiência não foi observada na medição da espessura, pois ocorreram falhas de medição nos ensaios onde foi detectada a presença da rebarbas do tipo caracol.

- Foram observadas bordas livres de rebarbas primárias quando se utilizou ferramentas de cortes novas, ou seja, com desgaste de flanco médio de até 0,07 mm e ângulo de saída da peça de 85°, no máximo. A profundidade de corte não deve ultrapassar 0,50 mm. Deve ser usado avanço mínimo de 0,95 mm/dente, enquanto que a velocidade de corte deve ser de no mínimo 85 m/min e máximo de 105 m/min.

Em geral, verificou-se que a altura da rebarba tende para dimensões maiores, principalmente nas condições de corte imposta para o acabamento superficial das peças. Pois nestas condições serão utilizados avanços pequenos que são formadores de rebarbas com grandes dimensões. Da mesma forma, as pequenas profundidades de corte não permitem a formação da rebarba secundária.

CAPÍTULO VI

6.0 - Propostas Para Trabalhos Futuros

No Brasil são pouquíssimas publicações que envolvem, de forma direta ou indireta, o estudo da rebarba. No exterior também a literatura é escassa. Portanto, tornam-se necessárias várias investigações sobre o assunto. Dentre elas podem ser sugeridas:

- Desenvolvimentos de trabalhos no qual traz informações sobre o custo das rebarbas na indústria brasileira. Quais são os métodos de rebarbação?
- Investigação de formação da rebarba no corte intermitente para peças e processos de revolução (ex. torneamento).
- Investigar a formação da rebarba em outros materiais metálicos de importância industrial, entre eles os aços para moldes e matrizes.
- Análise da formação da rebarba secundária a partir da variação dos principais parâmetros, entre eles o avanço por dente.
- Maior investigação dimensional e morfológica das rebarbas remanescentes nas bordas das peças fresadas, considerando variáveis importantes do processo (velocidade de corte, avanço por dente, profundidade de corte e outras).
- Relação dimensional entre a rebarba e o cavaco no processo de fresamento e furação.
- Desenvolvimento de outros sistemas de medições adequados às dimensões das rebarbas.

CAPÍTULO VII

7.0 - Referência Bibliográfica

AK Steel Corporation, 2004. AK Steel Comparator.

ALTINTAS, Y., 2000. **Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design**. 1st Ed. New York, USA: Cambridge University Press, 286 p.

ASM Handbook, 1997. Machining. Vol. 16, p. 681-707.

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

AURICH, J.C.; DORNFELD, D.; ARRAZOLA, P.J.; FRANKE, V.; LEITZ, L.; MIN, S., 2009. Burrs-Analysis, Control and Removal. International Conference on Burrs - CIRP Annals - Manufacturing Technology. Vol. 58, pp. 519–542

AVILA, M. C.; DORNFELD, D. A., 2004a. On the Face Milling Burr Formation Mechanisms and Minimization Strategies at High Tool Engagement. LMA. University of California at Berkeley, USA.

AVILA, M. C.; DORNFELD, D. A., 2004b, The Effect of Kinematical Parameters and Tool geometry on Burr Height in face Milling of Al-Si Alloys. LMA. University of California at Berkeley, USA.

BALLOU, J. R.; JOSHI, S. S.; DEVOR, R. E.; KAPOOR, S. G., 2007. Burr Formation in Drilling Intersecting Holes with Machinable Austempered Ductile Iron (MADITM). **Journal of Manufacturing Processes**. Vol. 9, N° 1, pp 35-46.

BARROS NETO, B.; SCARMINO, I. S.; BRUNS, R. E., 2003. **Como Fazer Experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2ª ed. Campinas, SP: Unicamp. 401p

BONIFÁCIO, M. E. R.; DINIZ, A. E., 1993. Correlating Tool Wear, Tool Life, Surface Roughness and Tool Vibration in Finish Turning With Coated Carbide Tools. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, vol. 173, pp. 137-144.

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G. & HUNTER, J. S., 1978. **Statistics for experimenters: An introduction to design, data analysis and model building**. New York: John Wiley & Sons, 1978.

CASTELETTI, L. C., 1996. **Aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação com o uso de nióbio nitretados por plasma**. 113f. Tese de doutorado: (Livre Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos SP.

CALADO, V.; MONTGOMERY, D. C., 2003. **Planejamento de Experimento Usando o Estatística**. Rio de Janeiro - RJ: E- papers Serviços Editoriais Ltda, 260 p.

CHANG, S.F.; GARY, M. B., 2009. Burr Height Model for Vibration Assisted Drilling of Aluminum 6061-T6. **Journal of Materials Processing Technology**. S0141-6359(09)00134-2 10.1016. Reference: PRE 5704. pp 1-34.

CHERN, G.L., 1993. **Analysis of burr formation and breakout in metal cutting**, Ph.D. Thesis. Department of Mechanical Engineering. University of California, Berkeley, CA.

CHERN, G.L.; DORNFELD D. A., 1996. Burr/Breakout Model Development and Experimental Verification. **Journal of Engineering Materials and Technology**. vol. 118, pp. 201-206.

CHERN, G. L., 2006a. Study on Mechanisms of Burr Formation and Edge Breakout Near the Exit of Orthogonal Cutting. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol. 176. pp. 152–157.

CHERN, G.L., 2006b. Experimental Observation and Analysis of Burr Formation Mechanisms in Face Milling of Aluminum Alloys. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. Vol. 46 pp.1417-1525.

CHOI, G. H., 1997. Experimental Investigations of Sideward Burr Formation in Rotary Machining. **KSME International Journal**. Vol. 11, N° 1, pp. 20-28.

CORRÊA, C. D., 2002. **Usinabilidade de Mancais Bimetálicos: Influência do Avanço no Desgaste e na Formação de Rebarbas**. 155f. Dissertação de Mestrado - Programa de pós-graduação em Eng^a. Automotiva. PUC-MG. Belo Horizonte MG.

COSTA, E. S.; PACHECO, M. S.; SILVA, R. B; MACHADO, A. R., 2008. **Influência da Forma de Entrada da Ferramenta na Peça no Fresamento Frontal de Faceamento do Aço ABNT 1045**. V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Salvador BA.

Da SILVA, L. C., 2004. **Estudo Da Rebarba No Fresamento De Faceamento Em Bloco De Motores e Ferro Fundido Cinzento Utilizando Inserto De Cerâmica E PCBN**. 184f. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia MG.

DENG, W. J.; XIA, W.; TANG Y., 2009. Finite Element Simulation for Burr Formation Near the Exit of Orthogonal Cutting. **Int J Adv Manuf Technol - Springer** DOI 10.1007/s00170-008-1784-y.vol. 43, pp. 1035–1045.

DIN 6784, 1982. Bordas das peças, Conceitos e Indicações nos desenhos

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. 2006. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 5a ed., São Paulo, Artliber Editora, 255 p.

FERRARESI, D., 1977. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo - Brasil: Editora Edgard Blücher Ltda, 751 p.

GILLESPIE, L. K.; BLOTTER, P. T., 1976. The Formation and Properties of Machining Burrs. **Journal of Engineering for Industry** Transactions of the ASME, vol 3, pp.66-74.

GILLESPIE, L. K., 1975. The Burr Produced by Side-Milling Cutters. Division Report BDX-613-1503. Bendix Cooperation Kansas City, Mo.

GILLESPIE, L. K., 1976. The Burr Produced by End-Milling. Division Report BDX-613-1503. Bendix Cooperation Kansas City, Mo.

GILLESPIE, L. K., 1999. **Deburring and Edge Finishing Handbook**, American Society Mechanical Engineers New York USA: SME - Society of Manufacturing Engineering, 400p.

GILLESPIE L. K. 2009. **Guia da Rebarba** - O custo de rebarbas na fabricação são surpreendentemente altos. Monitoramento e a redução de custos ou, melhor ainda, minimizar a formação da rebarba pode melhorar a produtividade. CUTTING TOOL ENGINEERING, Número 4, Volume 61. Disponível em www.ctemag.com. Acesso em 02/10

GUO, Y., 1995. Analysis of Burr Formation in Drilling Process. Research Reports. Edited by LMA, University of California, Berkeley USA.

GUO, Z.; SHA, W.; VAUMOUSSE, D., 2003 **Microstructural evolution in a PH13-8 stainless steel after ageing**. Acta Materialia, vol.51, pp. 101-116.

HASHIMURA, M.; HASSAMONTR, J.; DORNFELD D. A., 1999a. Effect of in-plane Exit Angle and Rake Angle on Burr Height and Thickness in Face Milling Operation. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**. Vol. 121, pp 13-24.

HASHIMURA, M.; CHANG, Y. P.; DORNFELD D. A., 1999b. Analysis of burr Formation Mechanism in Orthogonal Cutting. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**. Vol. 121, pp 1-10.

HASHIMURA, M.; UEDA, K.; DORNFELD. D.; MANABE, K., 1995. Analysis of Three-Dimensional Burr Formation in Oblique Cutting. *Annals of the CIRP Vol. 44, pp27-30*.

HEISEL, U.; SCHAAL, M.; WOLF, G., 2009. Burr Formation in Milling With Minimum Quantity Lubrication. Production Engineering Research Development, German Academic Society for Production Engineering DOI 10.1007/s11740-008-0138-9.

HIGH TEMP METALS INC, Catálogo de ligas de resistentes a altas temperaturas. Catálogo eletrônico de produtos, Sylmar CA. Disponível em www.hightempmetals.com. Acesso em 10/09/2010.

ISO 13715, 2000. Desenhos Técnicos - Arestas Sem Forma Definida - Vocabulário e Indicações.

JINSOO, K., 2000. Investigation on the Geometric Characteristics of Drilling Burr in Stainless Steel, LMA. University of California at Berkeley, USA.

KAMINISE, A. K.; SILVA, M. B.; GONÇALVES, R. A., GUILHERME, J. J.; 2001 **Study on Burr Formation in Turning of Carbon Steel ABNT 1045**. Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 16., Uberlândia, Minas Gerais, Brasil. pp. 105-111.

KAMINISE, A. K.; SILVA, M. B.; GONÇALVES, R. A.; 2004. **Study on Burr Formation in Turning**. In: 7th International Conference on Deburring and Surface Finishing. LMA. University of California at Berkeley, USA.

KAMINISE, A. K.; MACHADO, A. R.; SILVA, M. B.; GONÇALVES, R. A.; 2003. **Study on Burr Formation in Turning**. In: 17TH International Congress of Mechanical Engineering, Manufacturing Process, São Paulo, SP, Brazil. Proceedings . V. 14, pp 10-14.

KAMINISE, A. K.; 2004. **Estudo da Formação de Rebarbas no Torneamento Cilíndrico Externo de Aço-Carbono ABNT 1045**. 99 f. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia MG.

KIM, J.; DORNFELD, A. D., 1999. Investigation on the Geometric Characteristics of Drilling Burr in Stainless Steel. LMA. Annual Reports. University of California at Berkeley, USA.

KIM, J.; MIN, S.; DORNFELD, A. D., 2000. Optimization and Control of Drilling Burr Formation of AISI 304L and AISI 4118 Based on Drilling Burr Control Charts. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, LMA. University of California at Berkeley, USA. vol. 41.

KIM, Y. J.; KO, S. L.; KIM, J. H.; KIM, B.K., 2006. Development of Intelligent System to Minimize Burr Formation in Face Milling. **Int J Adv Manuf Technol** DOI 10.1007/s00170-005-2586-0. Vol. 29, pp. 879–884.

KISHIMOTO, W.; MIYAKE, T.; YAMAMOTO, A.; YAMANAKA, K.; TACANO, K., 1981. Study of Burr Formation in Face Milling. **Bull. Japan Soc. of Prec. Eng.** Vol 15 N° 1, pp. 51-52.

KITAJIMA, K.; MIYAKE, T.; YAMAMOTO, A.; TANAKA, Y., 1990. Study on Mechanism and Similarity of Burr Formation in Milling and Drilling. Technology Reports of kansai University, N° 32.

KRABBE, D. F. M.; DINIZ, A. E.; 2005. **Como obter a máxima remoção por vida de ferramenta na usinagem do aço 15-5PH**. Revista Máquinas e Metais, n. 471, pp 26-55, abril.

KO, S. L.; DORNFELD, D. A., 1996. Analysis of Fracture in Burr Formation at the Exit Stage of Metal Cutting. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 58, pp 189-200

KO, L. S.; KIM, S. W., 2004. Development of Effective Measurement Method for Burr Geometry. Department of Mechanical Design and Production Engineering, Konkuk University. Kwangjin-gu, Seoul Korea, 143 – 701.

Lauderbaugh, L. K., 2009. Analysis of the Effects of Process Parameters on Exit Burrs in Drilling Using a Combined Simulation and Experimental Approach. **journal of materials processing technology**. Vol. 209, pp. 1909–1919.

LEE, K. U.; Ko S. L., 2008. Development of Deburring Tool for Burrs at Intersecting Holes. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 201. pp. 454–459

LIMA, V. T.; LACERDA, E. B., 2003. Evaluation of Cutting Forces and Prediction of Chatter Vibrations in Milling. II Brazilian Manufacturing Congress, Vol 26 pp 74-81.

LIN, T. R., 1999, Experimental Study of Formation and Tool Chipping in the Face Milling of Stainless Steel, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 108, pp. 12–20.

LUO, M.; LIU, G.; CHEN, M., 2008. Mechanism of Burr Formation in Slot Milling Al-Alloy. **Int. J. Materials and Product Technology**. Vol. 31, N° 1, pp 63-71

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; Da SILVA, M. B., 2009. **Teoria da Usinagem dos Metais**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 371 p.

MANJUNATHA, N. N., 2007. **Ann Model to Predict Burr height and thickness**. 92f. Dissertation of Master of Science - Department of Industrial and Manufacturing Engineering Wichita State University. Wichita-KS USA.

MELO A. C. A., 2001. Estudo das Trincas de Origem Térmicas Geradas em Ferramentas de metal Duro Durante o Fresamento Frontal. 182f. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em engenharia mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia MG.

MENDES, A. L. S; DA SILVA M. B., 2005. Estudo da Formação de Rebarbas Formadas em Usinagem. LEPU. Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil.

MEOLA, T. M.; DUARTE, M. V.; Da SILVA, M. B., 2007. Estimativa das Forças no Torneamento Via Monitoramento de Sinais de Vibrações. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM), 12pgs

MEOLA, T.; DUARTE, M. A. V.; SOUSA, M. M.; Da SILVA, M. B., 2003. Monitoramento do Processo de Furação em Uma Fresadora CNC Utilizando Sinais de Vibração Mecânica. 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), 10 pgs.

MEUM, E., 2000. Development of Burr Measurement System. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. Vol. 41, LMA. University of California at Berkeley, USA.

MIN, S.; DORNFELD, D.; KIM, J.; SHYU, B., 2007. Finite Element Modeling of Burr Formation in Metal Cutting. Consortium on Deburring and Edge Finishing – LMAS Annual Reports. University of California at Berkeley, USA.

MODERN METAL CUTTING, 1994. Publicações Técnicas da Linha de Produtos da Indústrias Sandvik do Brasil , 98pp

MONTGOMERY, C. D.; RUNGER, G. C., 2003. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 2.ed. São Paulo: LTC.

MONTGOMERY, D. C., 1997 **Introduction to statistical quality control**. 3rd. ed. New York: Wile.

MONTGOMERY, D. C., 2005 **Design and analysis of experiments**. 6th edition. Arizona: John Wiley & Sons, Inc.

NAKAYAMA, K.; ARAI, M., 1987. Burr Formation in Metal Cutting. *Annals of the CIRP*. Vol. 36, pp. 33-36.

NARAYANASWAMI, R.; DORNFELD, D.A., 1997. Burr Minimization in Face Milling: A Geometric Approach, ASME, **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, Vol. 119, 170-177pp.

OLVERA, O.; BARROW, G., 1996. An Experimental Study of Burr Formation in Square Shoulder Face Milling, **Int. J. Mach Tools and Manufact.**, pp. 1005-1020.

ONWUBOLU, G. C., 2009. Prediction of Burr Formation During Face Milling Using a Hybrid GMDH Network Model With Optimized Cutting Conditions, **Int J Adv Manuf Technol - Springer** DOI 10.1007/s00170-008-1909-3. Vol. 44, pp. 1083–1093.

PEKELHARING, A. J., 1978. The Exit Failure in Interrupted Cutting, *Annals of the CIRP*, vol. 27/1/1978, pp. 5-10

REED-HILL, R. E., 1982. **Princípios de metalurgia física**. Editora Guanabara S.A., Segunda Edição, RJ, Brasil.

ROWLANDS, H.; ANTONY, F., 2003 **Application of design of experiments to a spot welding process**. *Assembly Automation*, v. 23, n. 3, pp. 273-279.

SAUNDERS, L. K. L., 2001. An Exit Burr Model for Drilling of Metals. *Transactions of the ASME*, Vol 123, pp. 562- 566

SCHÄFER, F., 1975. Deburring Processes in Perspective. SME MR75-482. Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers.

SCHÄFER, F., 1978. Burr and Deburring, VDI-Z120, 1/2, pp. 47-55.

SHAW, M. C., 1984. **Metal Cutting Principles**. 3. Ed. New York: Oxford Series on Advanced Manufacturing - ISBN 0-19-859002-4, 594 p.

SHEFELBINE, W.; DORNFELD, D. A., 2004. The Effect of Dry Machining on Burr Size. 7th International Conference on Deburring and Surface Finishing. LMA. University of California at Berkeley, USA.

SHEFELBINE W., 2004. Influences on Burr Size During Face-Milling of Aluminum-Silicon Alloys and Cast Iron, LMA, Annual Reports, University of California at Berkeley, USA., pp 76-81.

SILVA, J. D.; MACHADO, A. R.; VICENTE, D. A.; DA SILVA M. B., 2006. Estudo da Formação de Rebarbas no Fresamento de Blocos de Motores de Ferro Fundido Cinzento. Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil, 30pgs.

SOARES F. M., 1995. **Estudo da Formação de Rebarbas no Processo de Furação**. 159 f. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

SOUZA Jr, A. M., 2001. **Estudo da Utilização de PCBN e Cerâmica Mista no Fresamento de Blocos de Motores de Ferro Fundido Cinzento**. 143 f. Dissertação de Mestrado - Programa de pós-graduação em Eng^a. Automotiva. PUC-MG. Belo Horizonte MG.

Toropov, A. A.; Ko, S. L., 2006a. A New Burr Formation Model for Orthogonal Cutting of Ductile Materials. Annals of the CIRP Vol. 55/1/2006. 4 páginas.

Toropov, A. A.; Ko, S. L., 2006b. A Model of Burr Formation in The Feed Direction in Turning, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Vol. 46. pp. 1913–1920.

TRENT, E.M.; WRIGHT, P. K., 1991. **Metal Cutting**. 4rd Edition. Butterworths-Heinemann Ltd ISBN 0 – 7506-7069 – X: 444 p.

TRIPATHI, S.; DORNFELD, D. A., 2004. Review of Geometric Solutions for Milling Burr Prediction and Minimization. 7th International Conference on Deburring and Surface Finishing. LMA. University of California at Berkeley, USA.

VILLARES METALS. Ligas e aços especiais para aplicações aeronáuticas. Catálogo eletrônico, Sumaré-SP. Disponível em www.villaresmetals.com.br. Acesso em 25/10/2010.

WBTC-STD14.1997 – Worldwide Burr Technology Committee’s Standard, An Integrated International Standard for Burrs and Edge Conditions. Kansas City, MO: Deburring Technology International.

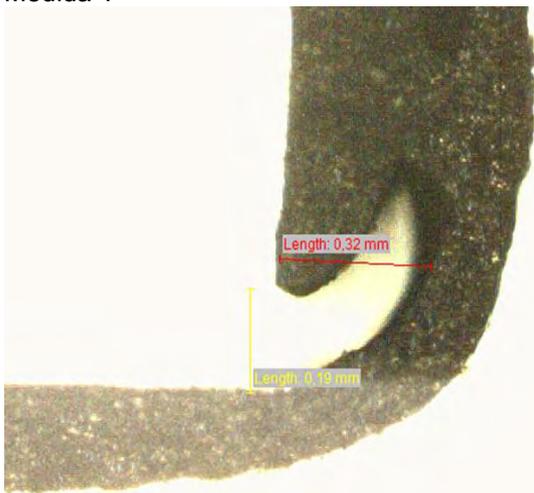
YUNMINGA, Z.; GUICHENGB, W.; SHUTIANC, F., 2009. Simulation Model and Mechanism of Burr Formation. **Journal of Modeling and Optimization** 1:1, pp 12-18.

CAPÍTULO VIII

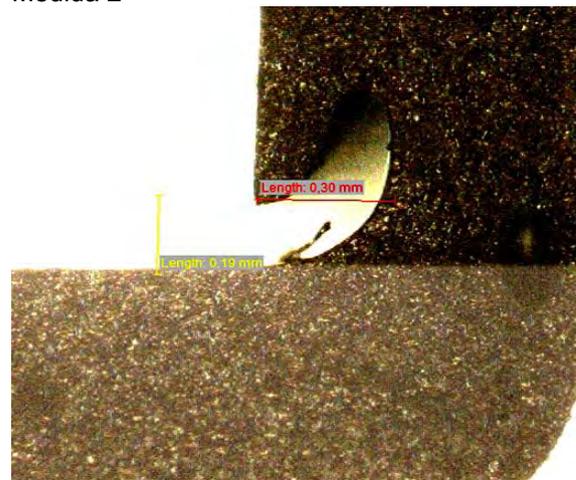
8.0 – Anexos

8.1 – Anexo I – Imagens das rebarbas obtidas a partir do sistema da aquisição para os primeiros ensaios. Foram escolhidas duas medidas, de forma aleatória, de cada ensaio.

Ensaio 1
Medida 1



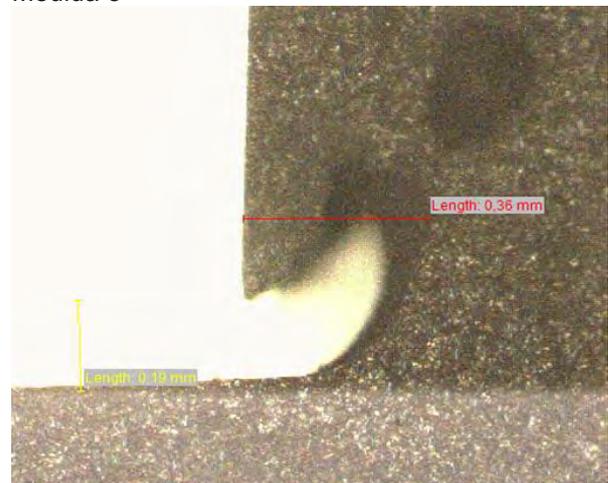
Medida 2



Ensaio 2
Medida 3



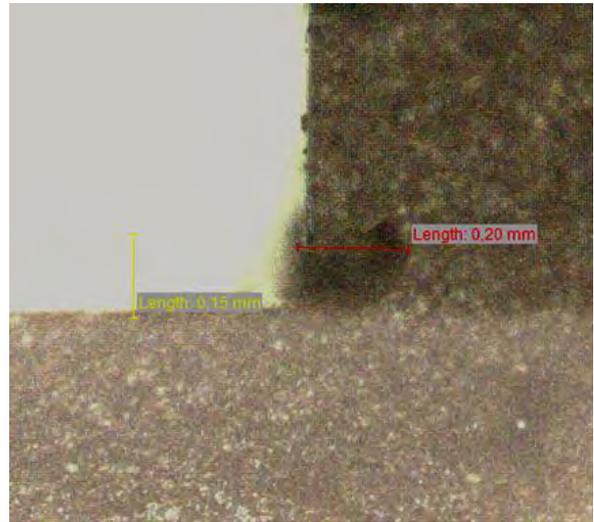
Medida 5



Ensaio 3
Medida 2



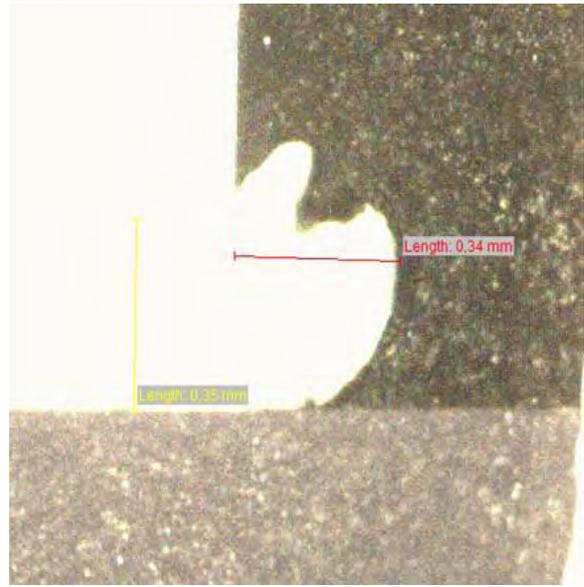
Medida 3



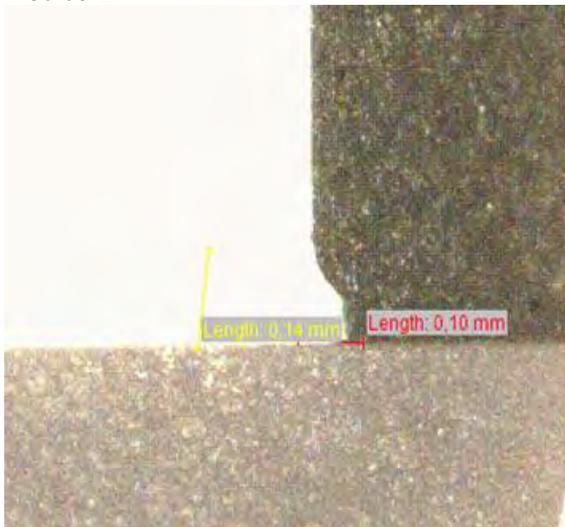
Ensaio 4
Medida 2



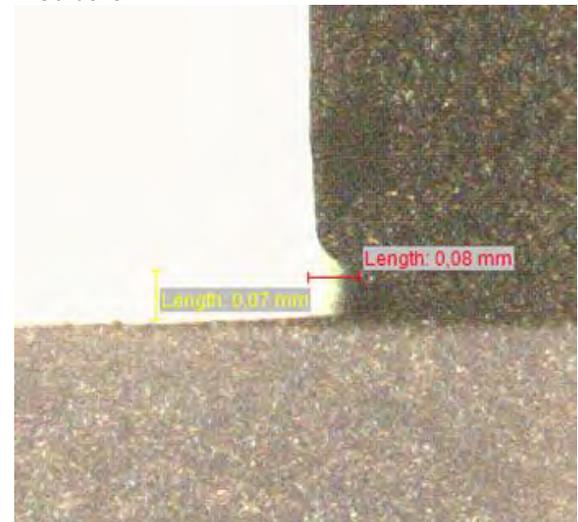
Medida 6



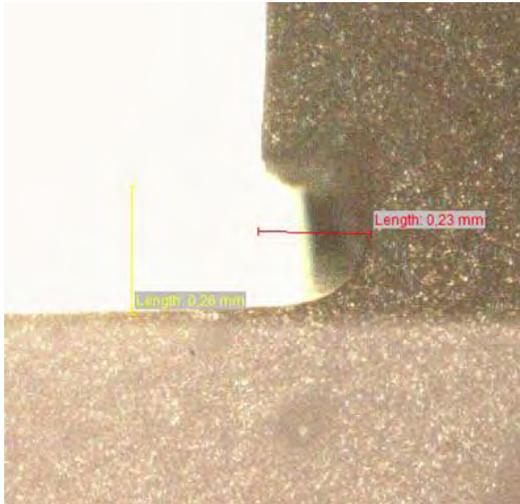
Ensaio 5
Medida 2



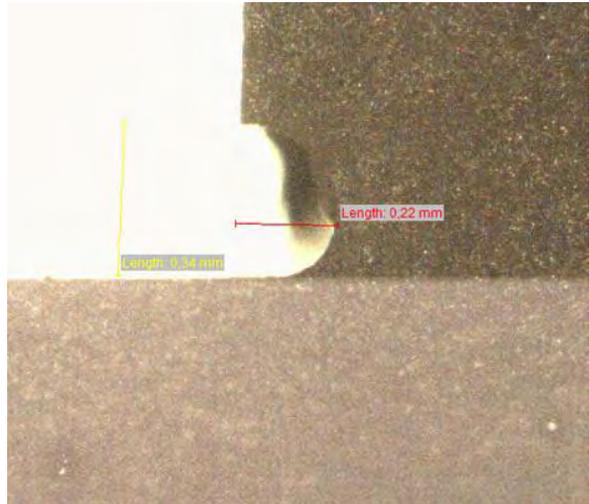
Medida 3



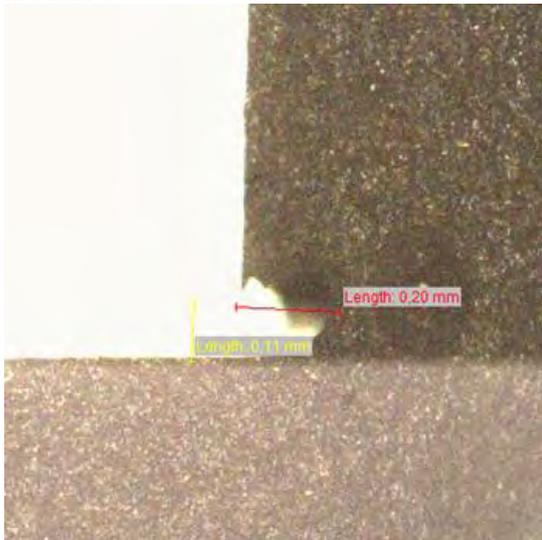
Ensaio 6
Medida 2



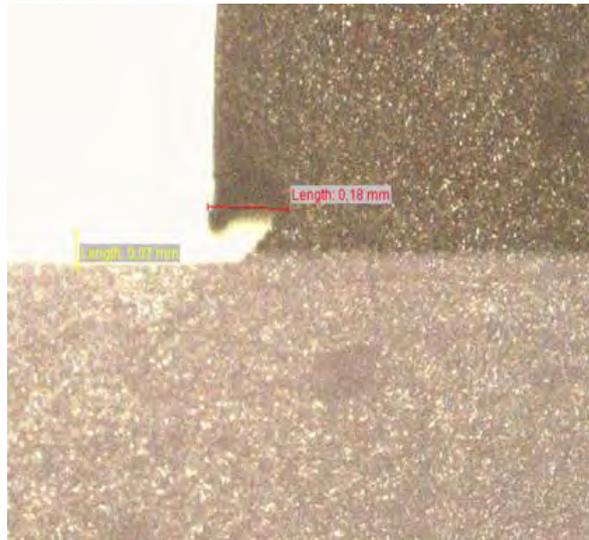
Medida 5



Ensaio 7
Medida 3



Medida 6



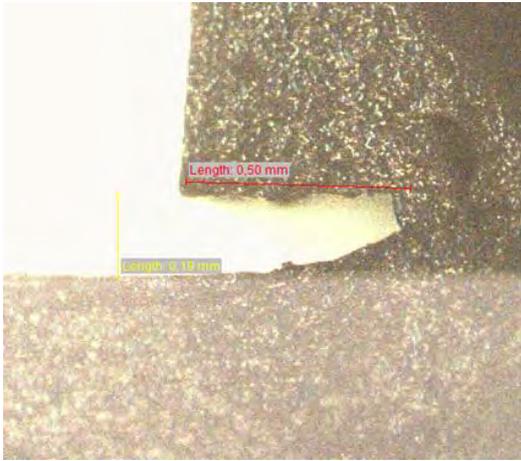
Ensaio 8
Medida 1



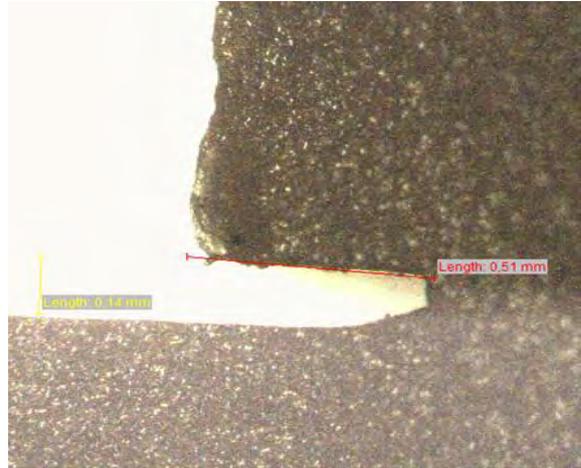
Medida 5



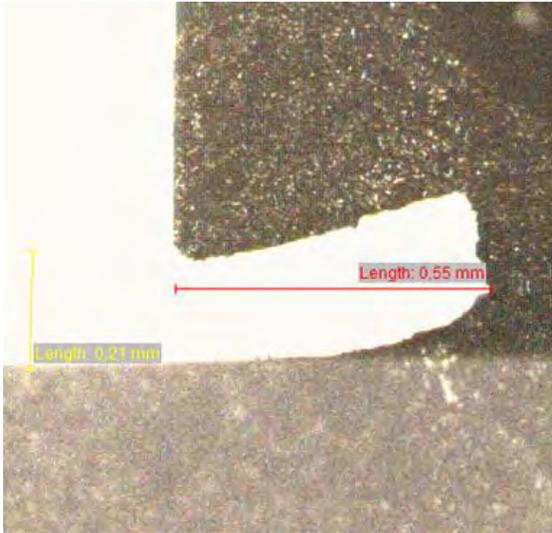
Ensaio 9
Medida 2



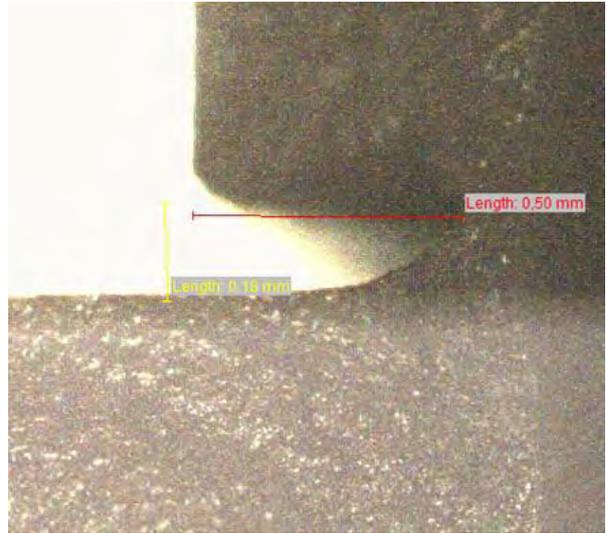
Medida 6



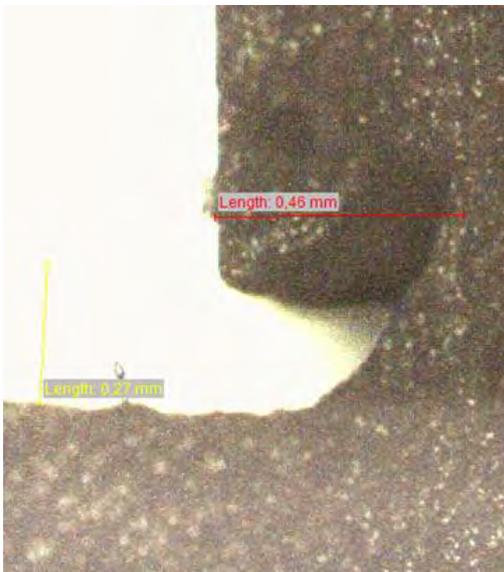
Ensaio 10
Medida 1



Medida 5



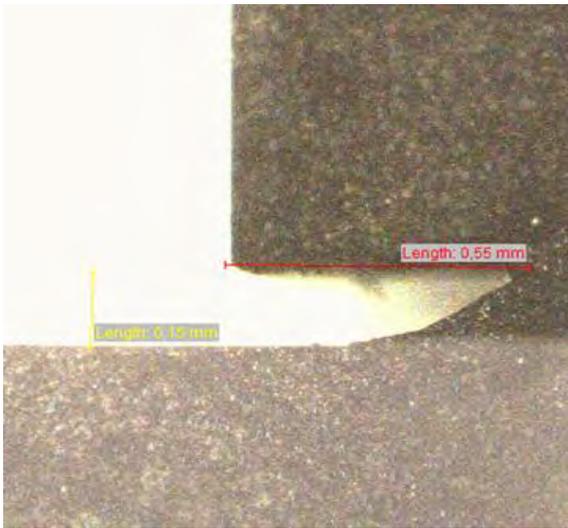
Ensaio 11
Medida 2



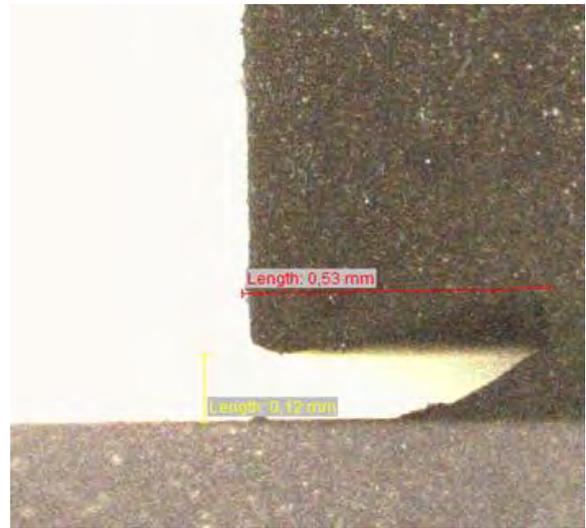
Medida 5



Ensaio 12
Medida 1



Medida 4



Ensaio 13
Medida 2



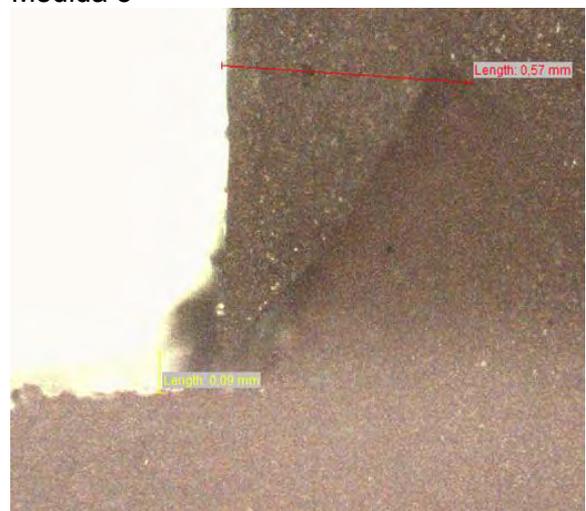
Medida 5



Ensaio 14
Medida 2



Medida 3



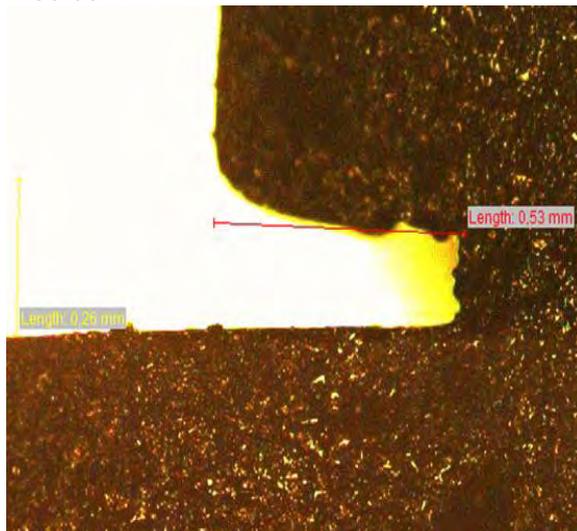
Ensaio 15
Medida 2



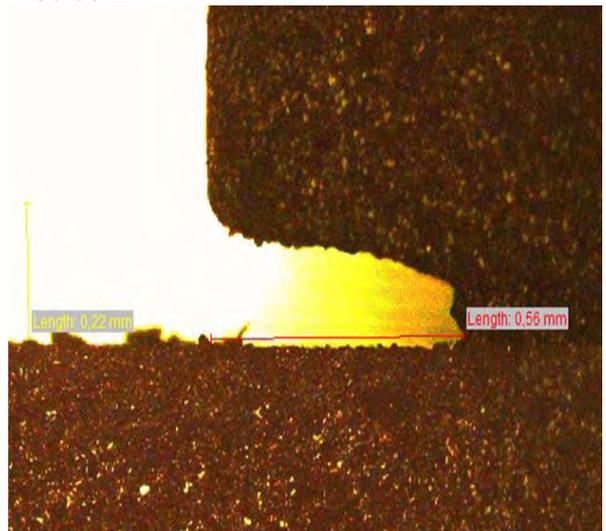
Medida 6



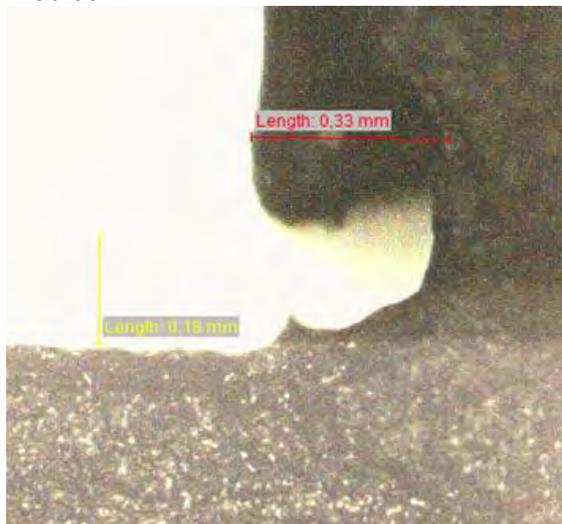
Ensaio 16
Medida 1



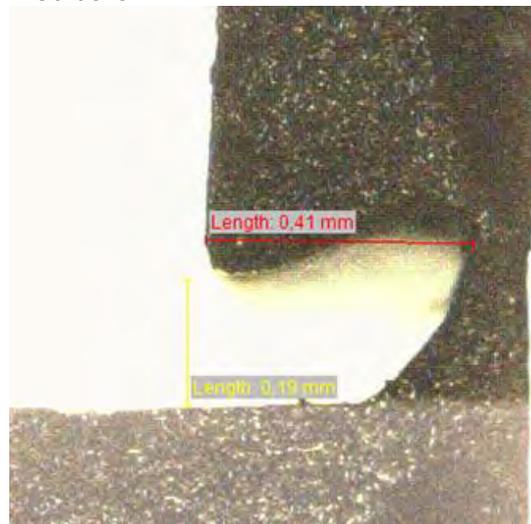
Medida 2



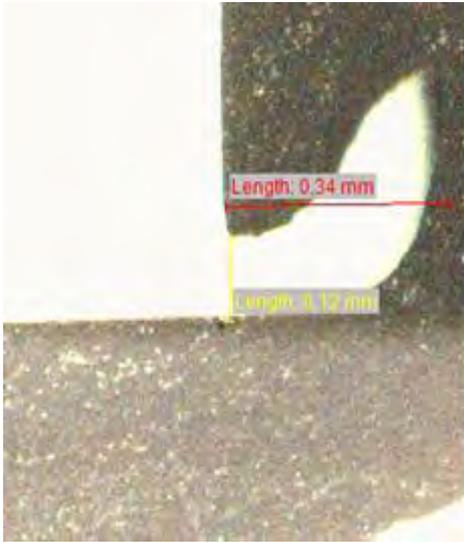
Ensaio 17
Medida 2



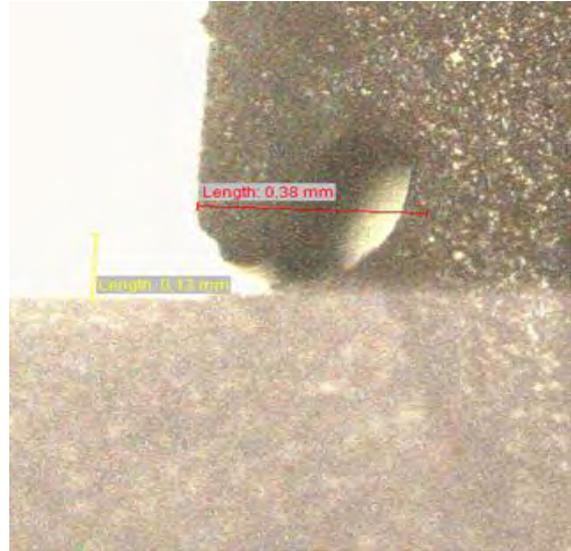
Medida 3



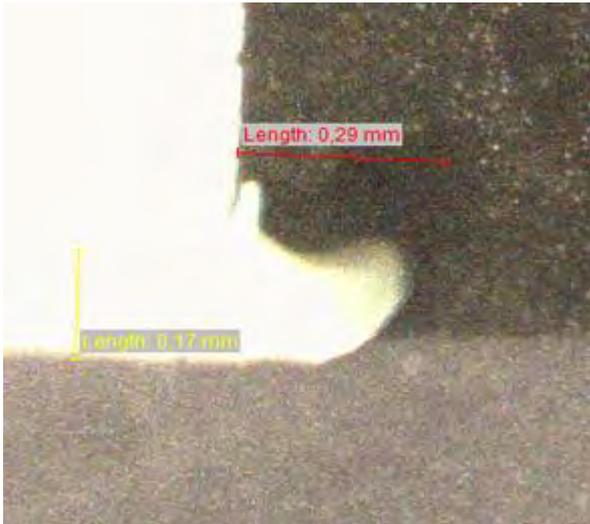
Ensaio 18
Medida 2



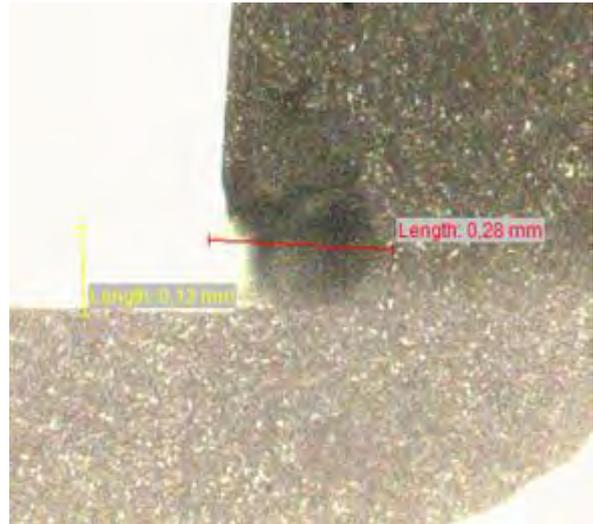
Medida 3



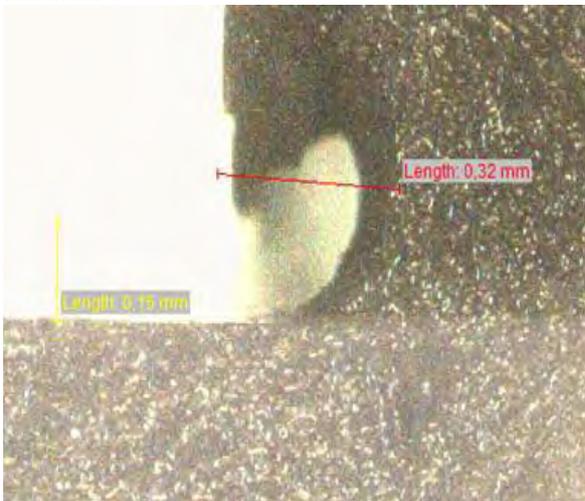
Ensaio 19
Medida 5



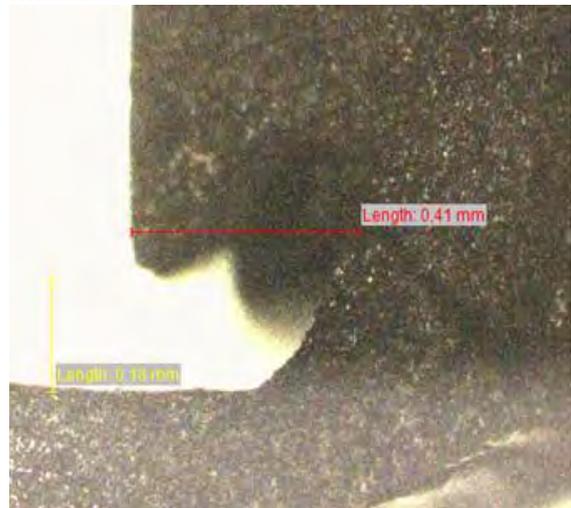
Medida 6



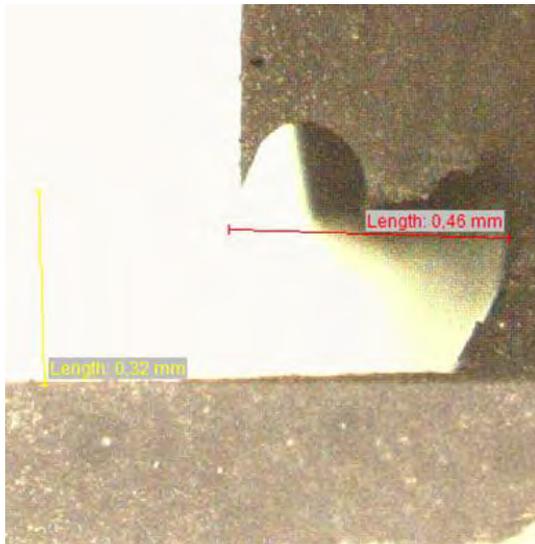
Ensaio 20
Medida 3



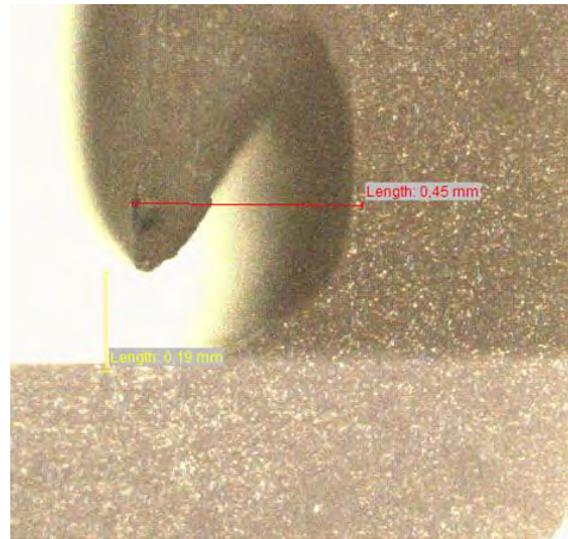
Medida 5



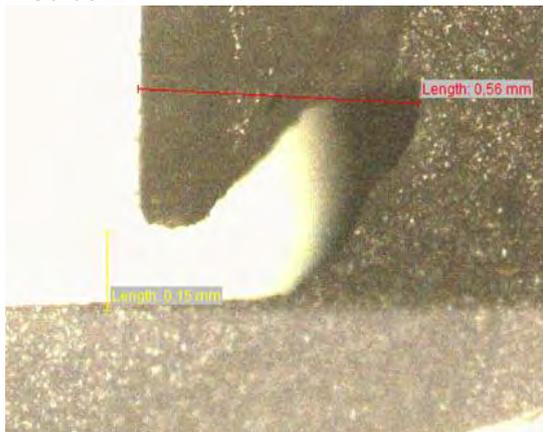
Ensaio 21
Medida 3



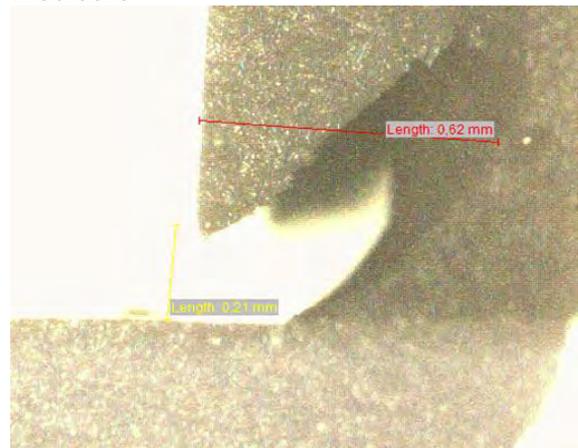
Medida 6



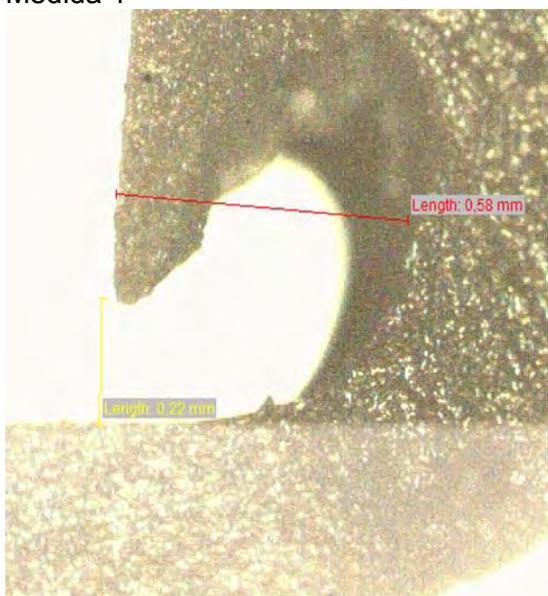
Ensaio 22
Medida 2



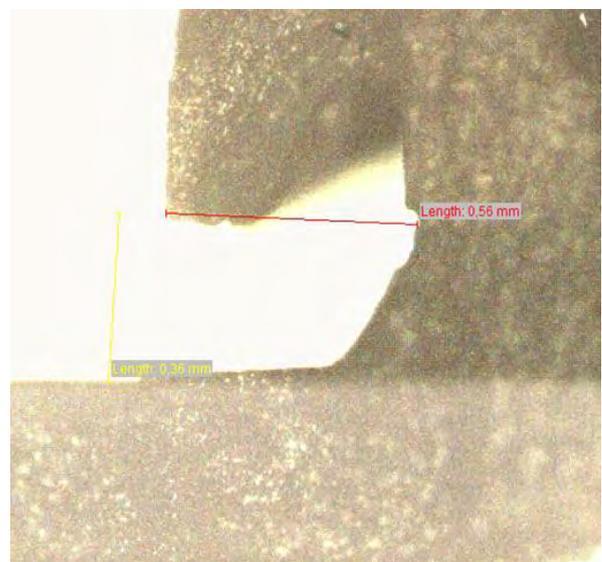
Medida 5



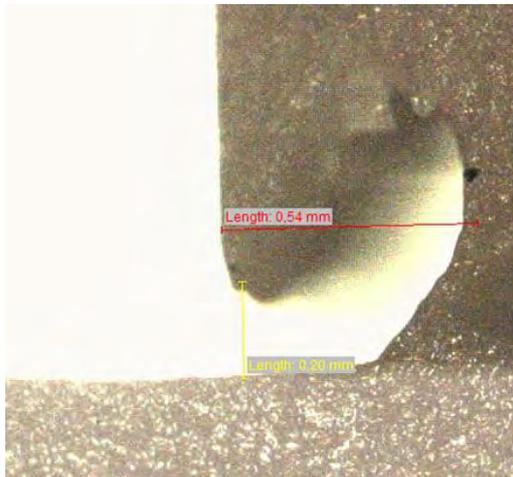
Ensaio 23
Medida 1



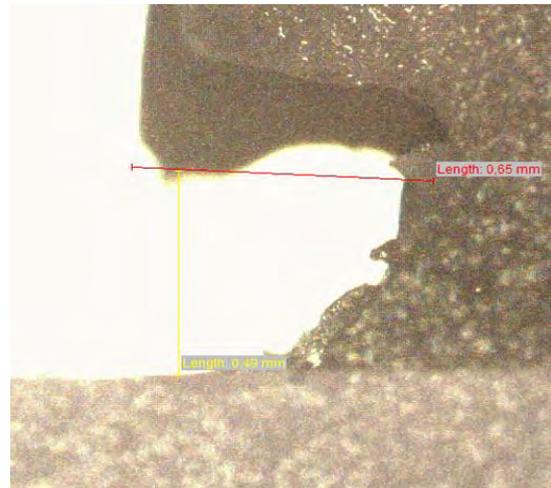
Medida 2



Ensaio 24
Medida 4



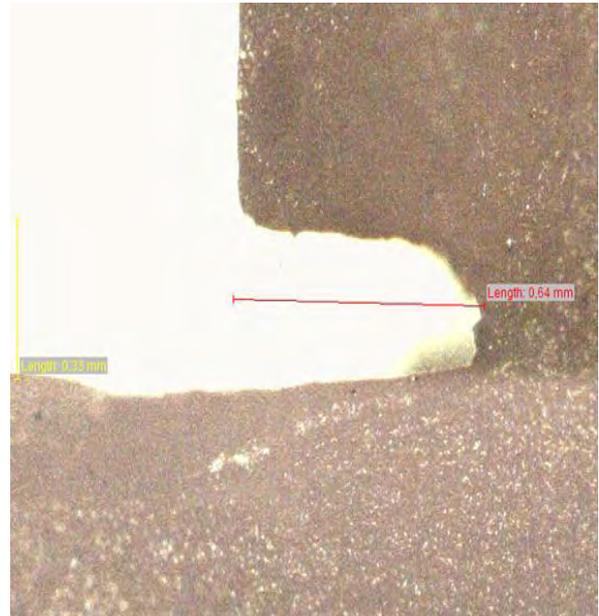
Medida 5



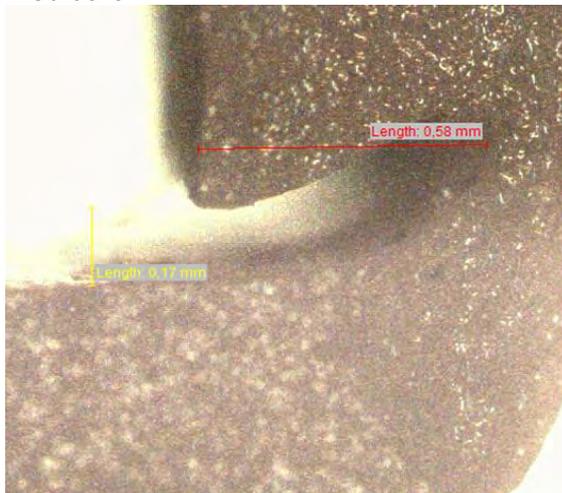
Ensaio 25
Medida 2



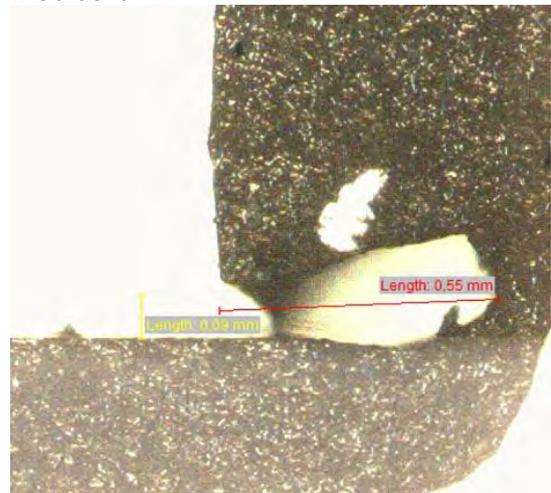
Medida 6



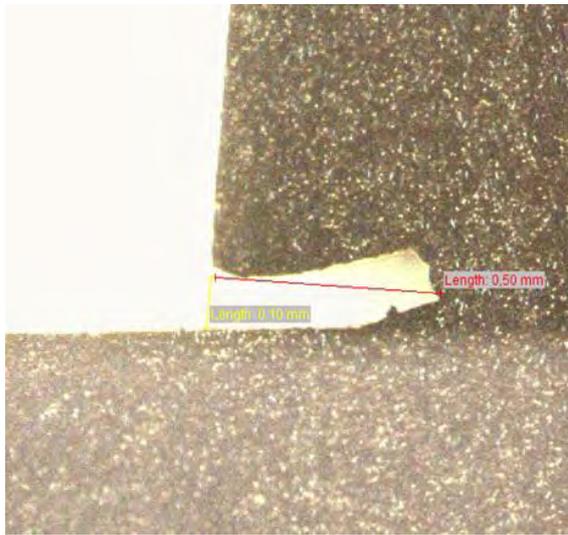
Ensaio 26
Medida 3



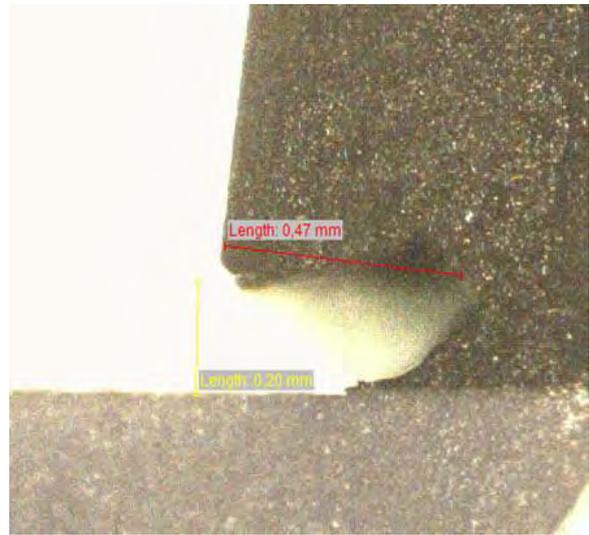
Medida 6



Ensaio 27
Medida 2



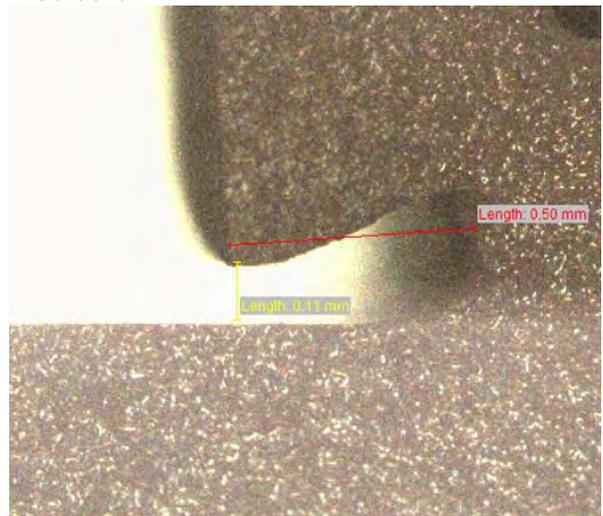
Medida 3



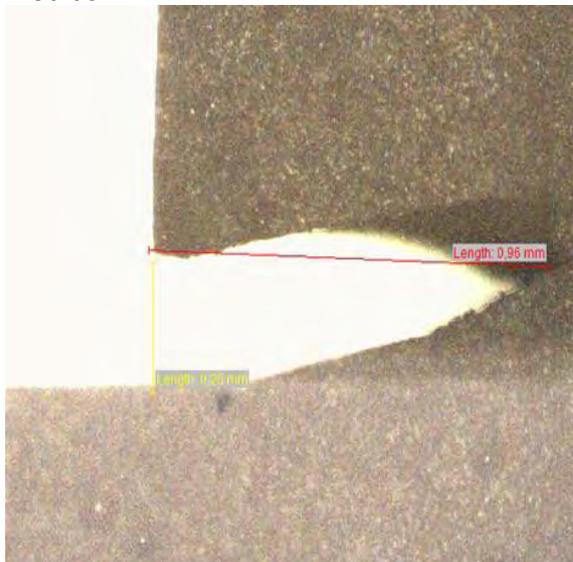
Ensaio 28
Medida 4



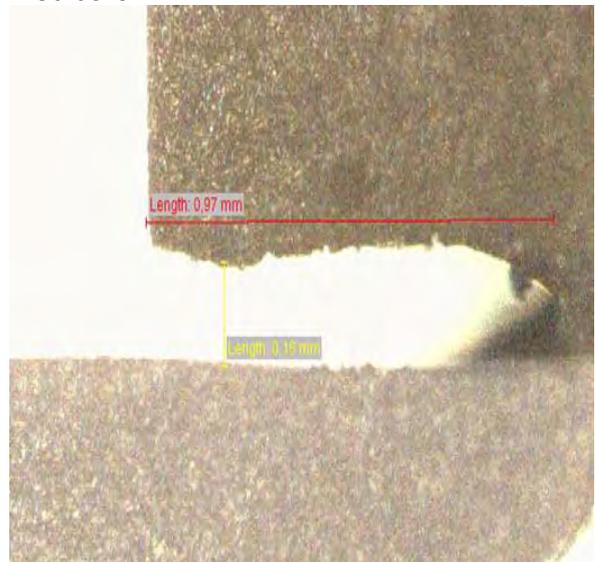
Medida 5



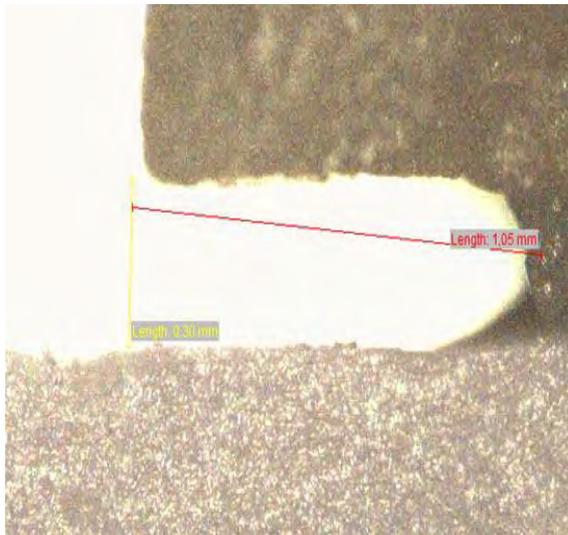
Ensaio 29
Medida 2



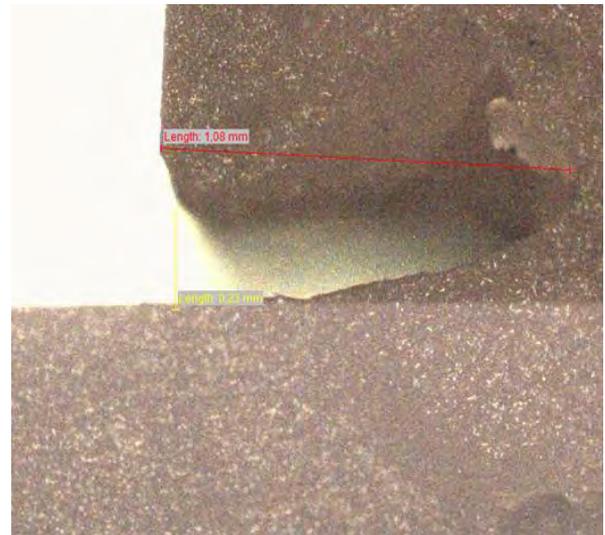
Medida 5



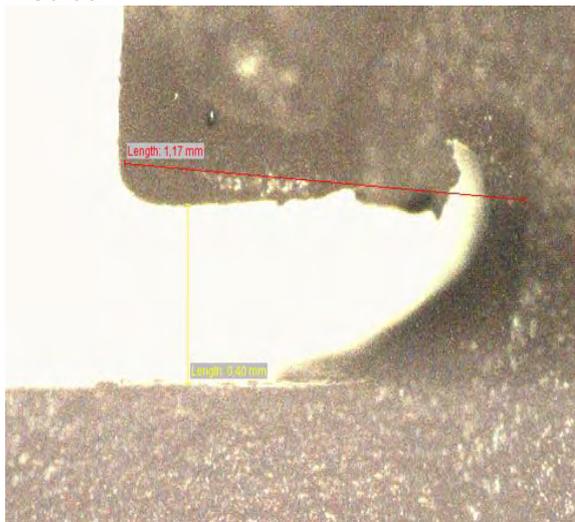
Ensaio 30
Medida 1



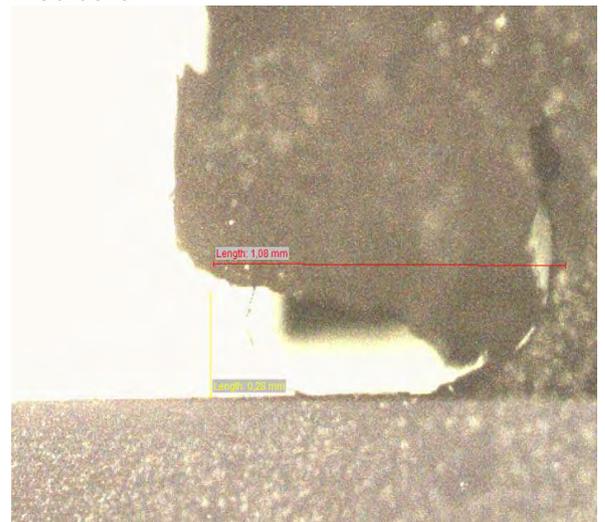
Medida 2



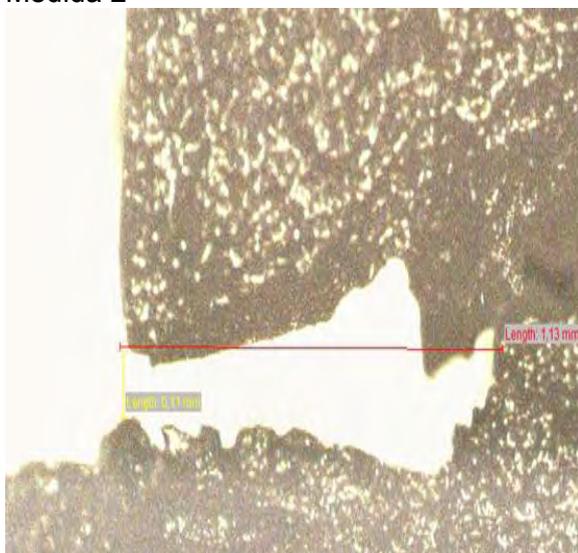
Ensaio 31
Medida 1



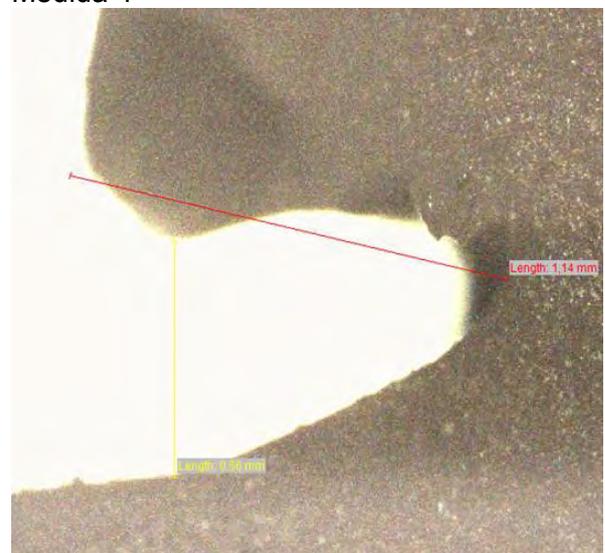
Medida 3



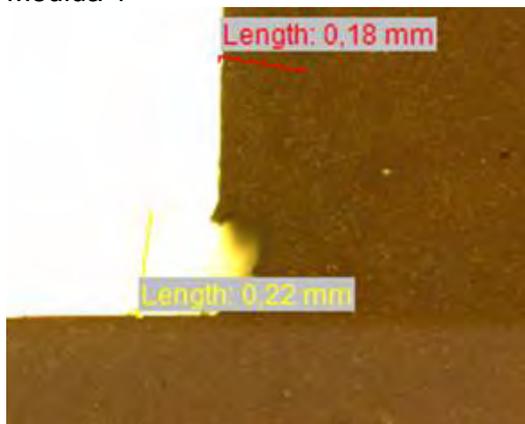
Ensaio 32
Medida 2



Medida 4



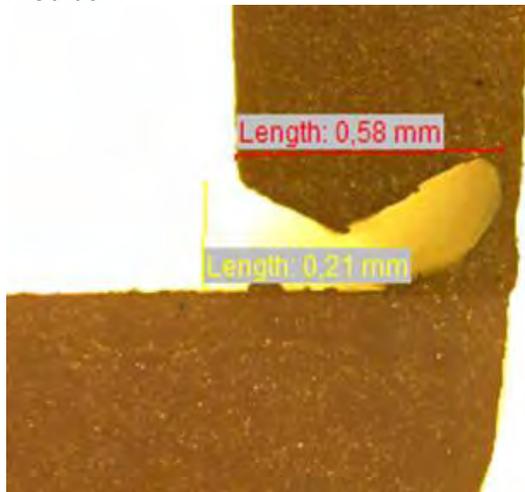
Ensaio 33
Medida 1



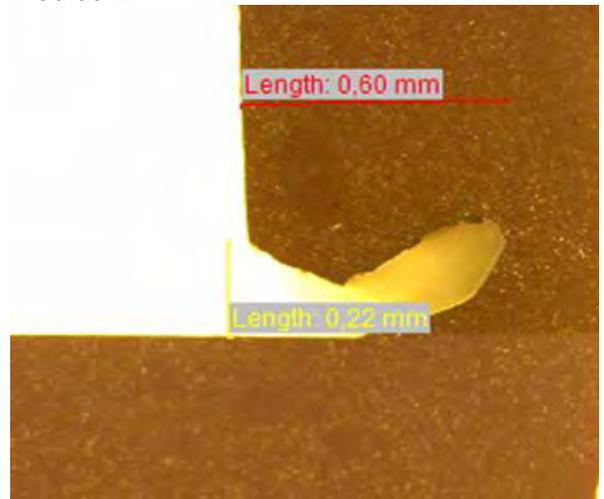
Medida 5



Ensaio 34
Medida 1

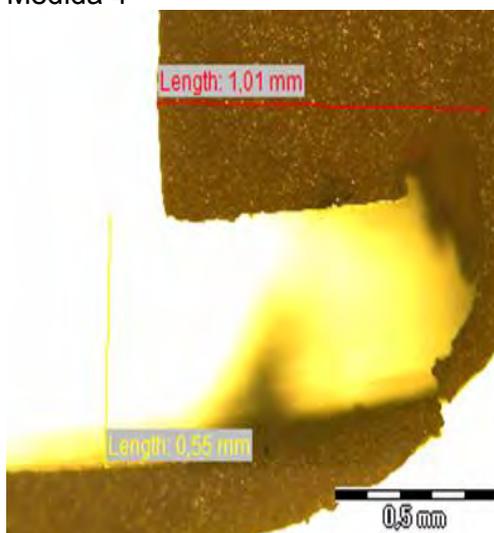


Medida 2

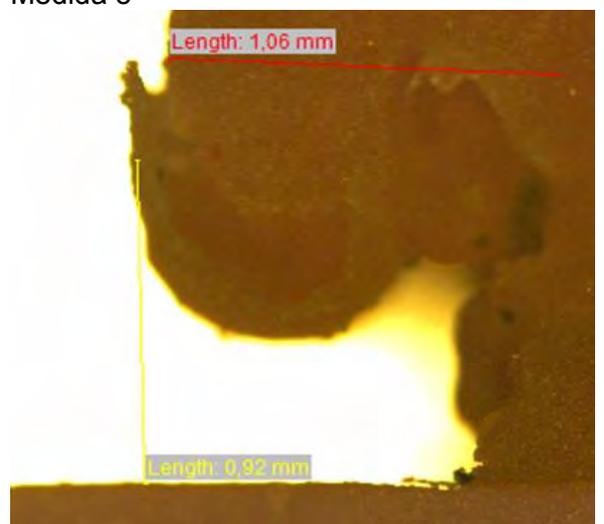


Ensaio 35 - Valor a ser estimado

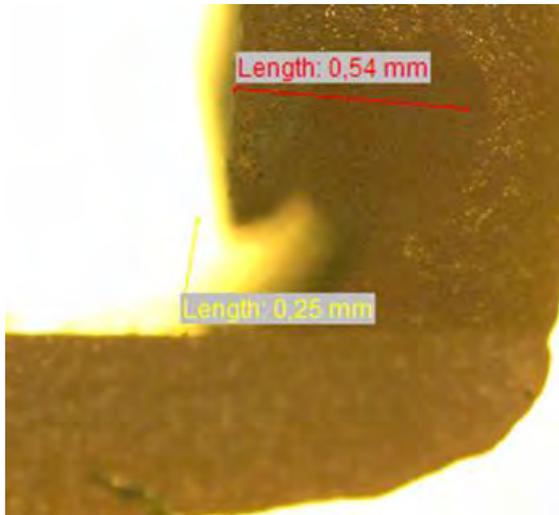
Ensaio 36
Medida 4



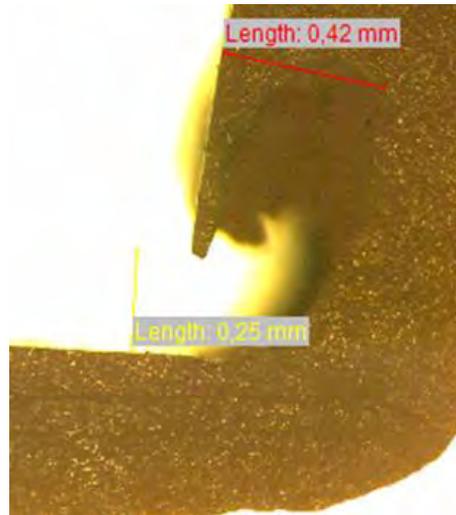
Medida 5



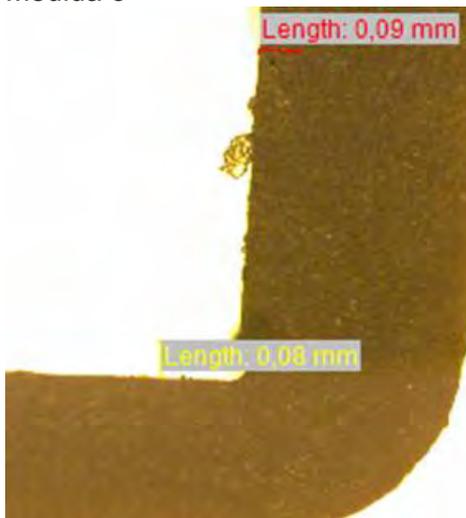
Ensaio 37
Medida 5



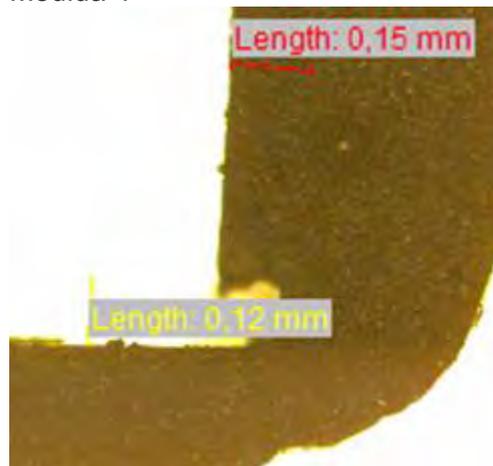
Medida 6



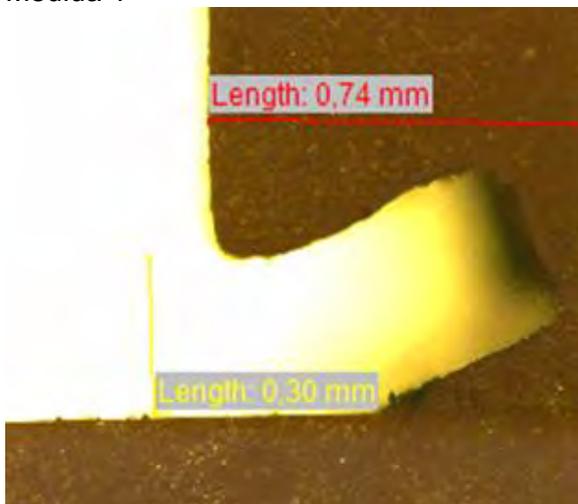
Ensaio 38
Medida 3



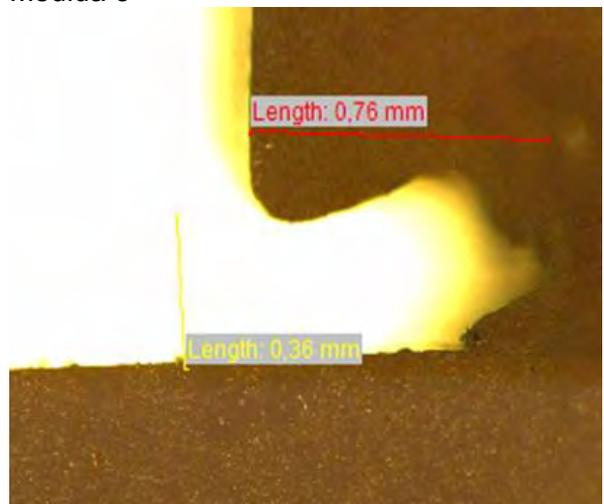
Medida 4



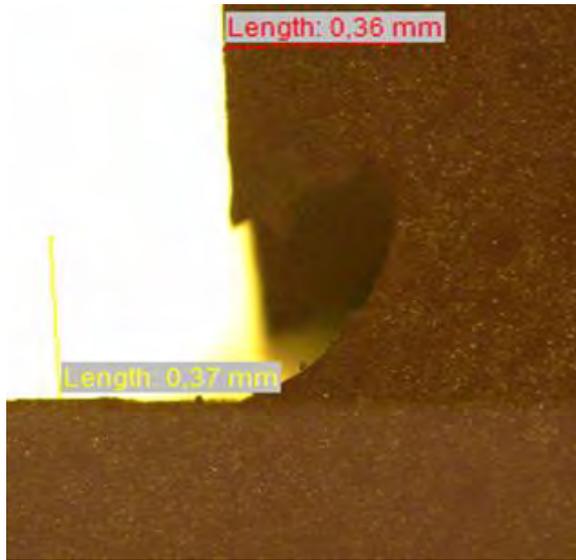
Ensaio 39
Medida 1



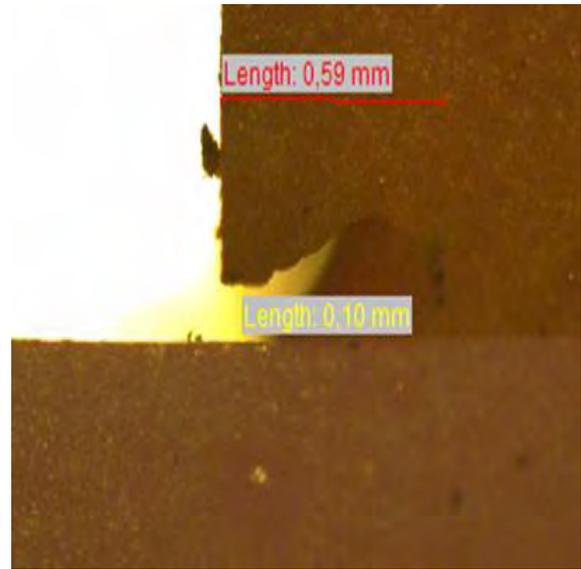
Medida 3



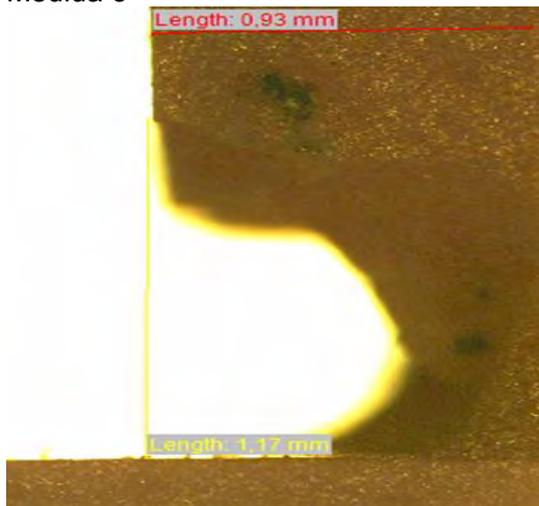
Ensaio 40
Medida 1



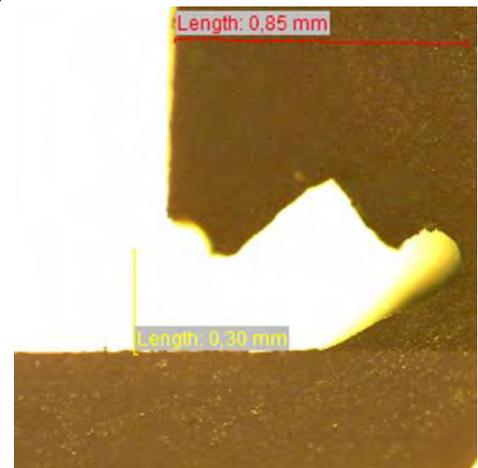
Medida 3



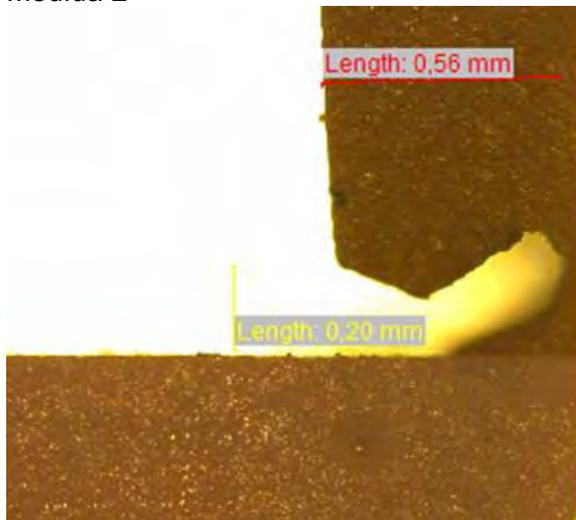
Ensaio 41
Medida 3



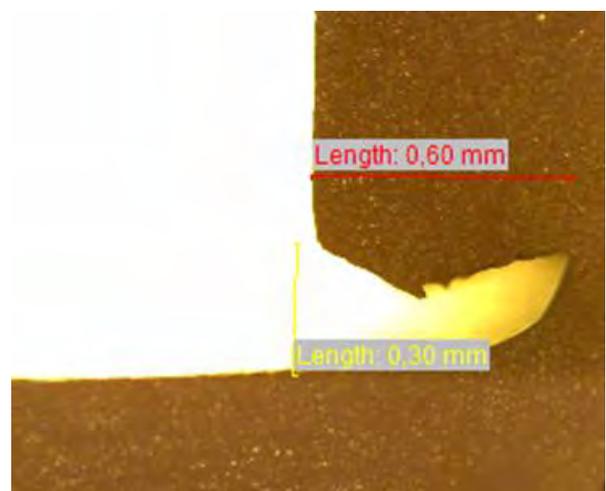
Medida 4



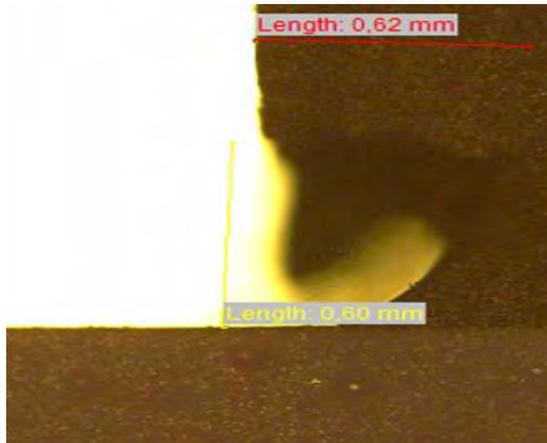
Ensaio 42
Medida 2



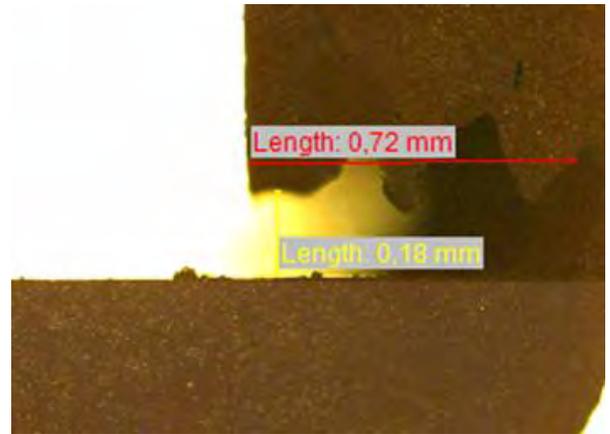
Medida 3



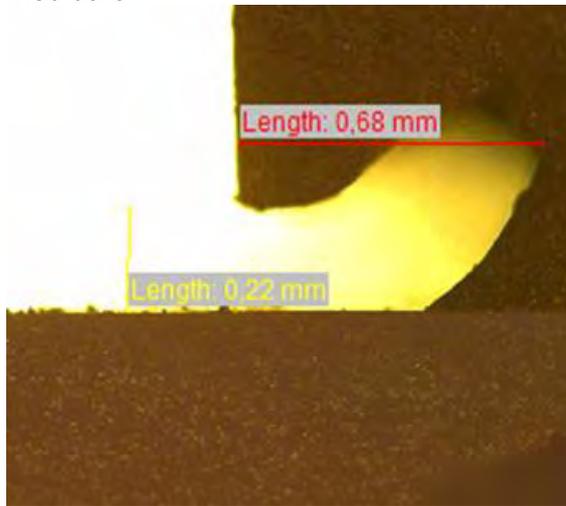
Ensaio 43
Medida 1



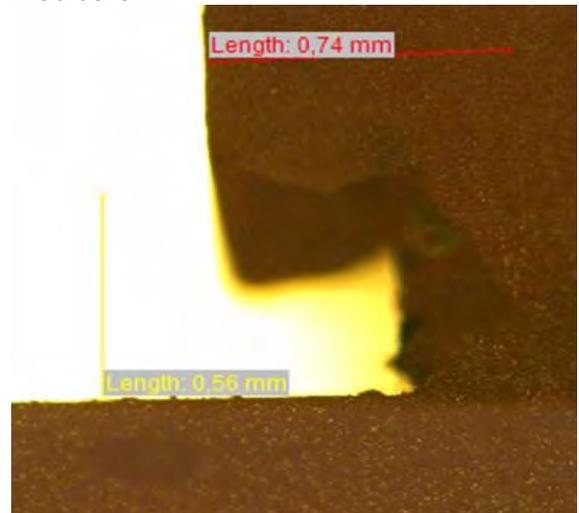
Medida 3



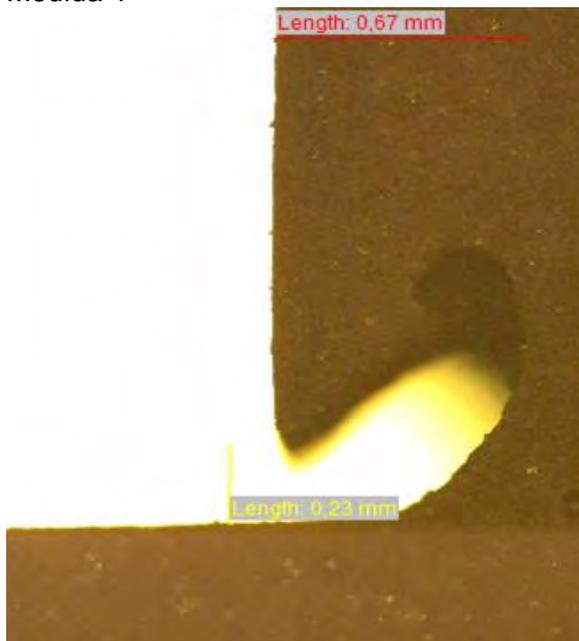
Ensaio 44
Medida 3



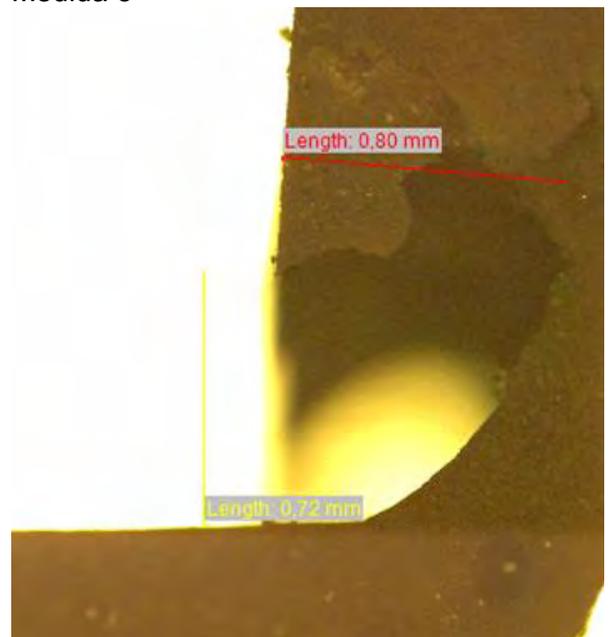
Medida 5



Ensaio 45
Medida 1



Medida 3



8.2 – Anexo II - Altura da rebarba medida nos seis pontos da borda, para cada ensaio e réplica da segunda etapa.

| 1 ^{os} Ensaio | | | | | | |
|------------------------|----------------------|------|------|------|------|------|
| Ensaio | Medidas | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 0,32 | 0,30 | 0,26 | 0,30 | 0,28 | 0,29 |
| 2 | 0,36 | 0,34 | 0,33 | 0,34 | 0,36 | 0,33 |
| 3 | 0,21 | 0,18 | 0,20 | 0,18 | 0,19 | 0,17 |
| 4 | 0,33 | 0,36 | 0,31 | 0,36 | 0,19 | 0,34 |
| 5 | 0,07 | 0,10 | 0,08 | 0,09 | 0,07 | 0,08 |
| 6 | 0,04 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,22 | 0,24 |
| 7 | 0,18 | 0,17 | 0,20 | 0,17 | 0,18 | 0,18 |
| 8 | 0,13 | 0,08 | 0,13 | 0,08 | 0,12 | 0,23 |
| 9 | 0,51 | 0,50 | 0,44 | 0,50 | 0,50 | 0,51 |
| 10 | 0,55 | 0,17 | 0,58 | 0,17 | 0,50 | 0,52 |
| 11 | 0,54 | 0,46 | 0,44 | 0,46 | 0,42 | 0,47 |
| 12 | 0,55 | 0,54 | 0,51 | 0,54 | 0,54 | 0,53 |
| 13 | 0,05 | 0,03 | 0,07 | 0,03 | 0,06 | 0,04 |
| 14 | 0,66 | 0,62 | 0,57 | 0,62 | 0,81 | 0,81 |
| 15 | 0,05 | 0,06 | 0,05 | 0,06 | 0,06 | 0,06 |
| 16 | 0,53 | 0,56 | 0,79 | 0,71 | 0,60 | 0,71 |
| 17 | 0,44 | 0,33 | 0,41 | 0,33 | 0,44 | 0,39 |
| 18 | 0,37 | 0,34 | 0,38 | 0,34 | 0,27 | 0,37 |
| 19 | 0,29 | 0,33 | 0,41 | 0,33 | 0,29 | 0,28 |
| 20 | 0,37 | 0,38 | 0,32 | 0,38 | 0,41 | 0,35 |
| 21 | 0,41 | 0,42 | 0,46 | 0,42 | 0,35 | 0,45 |
| 22 | 0,34 | 0,56 | 0,47 | 0,56 | 0,62 | 0,65 |
| 23 | 0,58 | 0,56 | 0,44 | 0,56 | 0,48 | 0,62 |
| 24 | 0,51 | 0,55 | 0,56 | 0,54 | 0,65 | 0,46 |
| 25 | 0,65 | 0,81 | 0,82 | 0,81 | 1,05 | 0,64 |
| 26 | 0,55 | 0,55 | 0,58 | 0,55 | 0,54 | 0,55 |
| 27 | 0,55 | 0,50 | 0,47 | 0,50 | 0,49 | 0,48 |
| 28 | 0,50 | 0,51 | 0,52 | 0,51 | 0,50 | 0,52 |
| 29 | 1,08 | 0,96 | 0,94 | 0,96 | 0,97 | 1,10 |
| 30 | 1,05 | 1,08 | 1,10 | 1,08 | 1,14 | 1,08 |
| 31 | 1,17 | 1,18 | 1,08 | 1,18 | 1,32 | 1,22 |
| 32 | 1,43 | 1,13 | 1,19 | 1,14 | 1,47 | 1,43 |
| 33 | 0,18 | 0,13 | 0,12 | 0,09 | 0,14 | 0,14 |
| 34 | 0,58 | 0,60 | 0,59 | 0,58 | 0,59 | 0,60 |
| 35 | Valor a ser estimado | | | | | |
| 36 | 0,57 | 0,85 | 0,62 | 1,01 | 1,06 | 0,76 |
| 37 | 0,09 | 0,17 | 0,06 | 0,28 | 0,54 | 0,42 |
| 38 | 0,10 | 0,06 | 0,09 | 0,15 | 0,15 | 0,10 |
| 39 | 0,74 | 0,69 | 0,76 | 0,68 | 0,72 | 0,75 |
| 40 | 0,36 | 0,35 | 0,59 | 0,50 | 0,44 | 0,25 |
| 41 | 0,85 | 0,89 | 0,93 | 0,85 | 0,70 | 0,86 |
| 42 | 0,55 | 0,56 | 0,60 | 0,60 | 0,55 | 0,85 |
| 43 | 0,62 | 0,69 | 0,72 | 0,55 | 0,62 | 0,58 |
| 44 | 0,75 | 0,72 | 0,68 | 0,77 | 0,74 | 0,69 |
| 45 | 0,67 | 0,69 | 0,80 | 0,67 | 0,70 | 0,62 |

| Replica 2 | | | | | | | |
|-----------|----------------|------|------|------|------|------|------|
| Ensaio | Medidas | | | | | | |
| | N ^o | NR | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | (91) | 0,31 | 0,33 | 0,17 | 0,20 | 0,20 | 0,25 |
| 2 | (92) | 0,23 | 0,33 | 0,28 | 0,26 | 0,33 | 0,35 |
| 3 | (93) | 0,24 | 0,17 | 0,25 | 0,22 | 0,18 | 0,21 |
| 4 | (94) | 0,17 | 0,18 | 0,17 | 0,07 | 0,21 | 0,28 |
| 5 | (95) | 0,24 | 0,45 | 0,38 | 0,28 | 0,25 | 0,28 |
| 6 | (96) | 0,38 | 0,33 | 0,34 | 0,25 | 0,51 | 0,34 |

| Réplica 1 | | | | | | | |
|-----------|----------------|----------------------|------|------|------|------|------|
| Ensaio | Medidas | | | | | | |
| | N ^o | NR | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | (46) | 0,21 | 0,16 | 0,15 | 0,23 | 0,20 | 0,23 |
| 2 | (47) | 0,22 | 0,20 | 0,21 | 0,17 | 0,21 | 0,31 |
| 3 | (48) | 0,13 | 0,11 | 0,10 | 0,14 | 0,10 | 0,09 |
| 4 | (49) | 0,11 | 0,10 | 0,11 | 0,11 | 0,13 | 0,10 |
| 5 | (50) | 0,14 | 0,18 | 0,20 | 0,22 | 0,19 | 0,20 |
| 6 | (51) | 0,20 | 0,20 | 0,24 | 0,27 | 0,27 | 0,29 |
| 7 | (52) | 0,16 | 0,16 | 0,17 | 0,15 | 0,16 | 0,15 |
| 8 | (53) | 0,58 | 0,22 | 0,20 | 0,69 | 0,20 | 0,32 |
| 9 | (54) | 0,48 | 0,48 | 0,47 | 0,46 | 0,55 | 0,34 |
| 10 | (55) | 0,40 | 0,41 | 0,51 | 0,51 | 0,48 | 0,49 |
| 11 | (56) | 0,45 | 0,49 | 0,39 | 0,42 | 0,51 | 0,36 |
| 12 | (57) | 0,25 | 0,31 | 0,36 | 0,23 | 0,20 | 0,50 |
| 13 | (58) | 0,86 | 0,77 | 0,71 | 0,82 | 0,88 | 0,89 |
| 14 | (59) | 0,93 | 0,68 | 0,78 | 0,95 | 0,92 | 0,75 |
| 15 | (60) | 0,40 | 0,44 | 0,64 | 0,25 | 0,59 | 0,50 |
| 16 | (61) | 0,68 | 0,65 | 0,79 | 0,71 | 0,60 | 0,75 |
| 17 | (62) | 0,49 | 0,31 | 0,33 | 0,43 | 0,40 | 0,40 |
| 18 | (63) | 0,44 | 0,48 | 0,48 | 0,47 | 0,41 | 0,44 |
| 19 | (64) | 0,23 | 0,42 | 0,28 | 0,47 | 0,44 | 0,42 |
| 20 | (65) | 0,47 | 0,45 | 0,46 | 0,43 | 0,45 | 0,45 |
| 21 | (66) | 0,72 | 0,71 | 0,81 | 0,72 | 0,84 | 0,76 |
| 22 | (67) | 0,72 | 0,73 | 0,77 | 0,74 | 0,74 | 0,81 |
| 23 | (68) | 0,60 | 0,70 | 0,61 | 0,76 | 0,57 | 0,68 |
| 24 | (69) | 0,18 | 0,65 | 0,35 | 0,20 | 0,22 | 0,67 |
| 25 | (70) | 1,21 | 0,83 | 1,30 | 1,01 | 1,08 | 0,97 |
| 26 | (71) | 1,02 | 1,42 | 1,19 | 1,52 | 1,18 | 1,09 |
| 27 | (72) | 0,97 | 0,56 | 0,86 | 0,92 | 0,56 | 1,00 |
| 28 | (73) | 0,71 | 0,67 | 0,45 | 0,65 | 0,59 | 0,75 |
| 29 | (74) | 1,28 | 1,05 | 1,39 | 1,07 | 1,10 | 1,20 |
| 30 | (75) | 1,17 | 1,18 | 1,09 | 1,37 | 1,15 | 1,28 |
| 31 | (76) | 1,19 | 1,18 | 1,28 | 1,16 | 1,12 | 1,18 |
| 32 | (77) | 1,01 | 0,94 | 0,99 | 0,94 | 0,99 | 0,97 |
| 33 | (78) | 0,11 | 0,15 | 0,13 | 0,10 | 0,14 | 0,15 |
| 34 | (79) | 0,60 | 0,54 | 0,62 | 0,57 | 0,59 | 0,50 |
| 35 | (80) | Valor a ser estimado | | | | | |
| 36 | (81) | 0,98 | 0,96 | 0,89 | 0,91 | 0,94 | 0,99 |
| 37 | (82) | 0,59 | 0,11 | 0,15 | 0,60 | 0,57 | 0,11 |
| 38 | (83) | 0,15 | 0,10 | 0,12 | 0,10 | 0,16 | 0,14 |
| 39 | (84) | 0,74 | 0,69 | 0,73 | 0,71 | 0,69 | 0,76 |
| 40 | (85) | 0,52 | 0,55 | 0,38 | 0,39 | 0,32 | 0,37 |
| 41 | (86) | 0,83 | 0,84 | 0,85 | 0,63 | 0,76 | 0,85 |
| 42 | (87) | 0,53 | 0,76 | 0,62 | 0,46 | 0,73 | 0,75 |
| 43 | (88) | 0,71 | 0,49 | 0,51 | 0,51 | 0,81 | 0,54 |
| 44 | (89) | 0,74 | 0,71 | 0,74 | 0,83 | 0,76 | 0,72 |
| 45 | (90) | 0,74 | 0,68 | 0,76 | 0,68 | 0,67 | 0,76 |

| Replica 3 | | | | | | | |
|-----------|----------------|------|------|------|------|------|------|
| Ensaio | Medidas | | | | | | |
| | N ^o | NR | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | (136) | 0,31 | 0,30 | 0,28 | 0,18 | 0,17 | 0,17 |
| 2 | (137) | 0,29 | 0,36 | 0,37 | 0,22 | 0,28 | 0,25 |
| 3 | (138) | 0,18 | 0,20 | 0,16 | 0,12 | 0,10 | 0,12 |
| 4 | (139) | 0,17 | 0,17 | 0,13 | 0,10 | 0,10 | 0,11 |
| 5 | (140) | 0,08 | 0,09 | 0,13 | 0,17 | 0,16 | 0,24 |
| 6 | (141) | 0,21 | 0,29 | 0,21 | 0,17 | 0,20 | 0,26 |

| | | | | | | | |
|----|-------|----------------------|------|------|------|------|------|
| 7 | (97) | 0,24 | 0,30 | 0,35 | 0,42 | 0,37 | 0,29 |
| 8 | (98) | 0,33 | 0,25 | 0,17 | 0,21 | 0,20 | 0,35 |
| 9 | (99) | 0,45 | 0,52 | 0,38 | 0,47 | 0,51 | 0,47 |
| 10 | (100) | 0,47 | 0,56 | 0,40 | 0,43 | 0,48 | 0,51 |
| 11 | (101) | 0,52 | 0,40 | 0,43 | 0,34 | 0,30 | 0,42 |
| 12 | (102) | 0,37 | 0,35 | 0,33 | 0,41 | 0,35 | 0,44 |
| 13 | (103) | 0,89 | 0,68 | 0,77 | 0,77 | 0,73 | 0,51 |
| 14 | (104) | 0,69 | 0,61 | 0,66 | 0,62 | 0,62 | 0,73 |
| 15 | (105) | 0,70 | 0,71 | 0,68 | 0,43 | 0,64 | 0,57 |
| 16 | (106) | 0,68 | 0,65 | 0,57 | 0,50 | 0,52 | 0,60 |
| 17 | (107) | 0,47 | 0,46 | 0,49 | 0,43 | 0,45 | 0,43 |
| 18 | (108) | 0,64 | 0,66 | 0,54 | 0,58 | 0,64 | 0,56 |
| 19 | (109) | 0,37 | 0,35 | 0,46 | 0,47 | 0,33 | 0,49 |
| 20 | (110) | 0,47 | 0,33 | 0,45 | 0,43 | 0,44 | 0,35 |
| 21 | (111) | 0,53 | 0,58 | 0,56 | 0,57 | 0,52 | 0,57 |
| 22 | (112) | 0,57 | 0,58 | 0,61 | 0,58 | 0,62 | 0,49 |
| 23 | (113) | 0,55 | 0,54 | 0,51 | 0,51 | 0,60 | 0,66 |
| 24 | (114) | 0,66 | 0,46 | 0,40 | 0,49 | 0,51 | 0,41 |
| 25 | (115) | 0,89 | 0,85 | 0,95 | 0,91 | 0,86 | 1,05 |
| 26 | (116) | 0,92 | 0,87 | 0,90 | 0,96 | 1,23 | 0,86 |
| 27 | (117) | 1,05 | 0,88 | 0,88 | 0,89 | 1,03 | 0,98 |
| 28 | (118) | 0,75 | 0,74 | 0,73 | 0,80 | 0,84 | 0,52 |
| 29 | (119) | 1,02 | 1,25 | 1,15 | 1,21 | 1,14 | 0,88 |
| 30 | (120) | 0,99 | 1,35 | 0,97 | 1,37 | 0,98 | 0,88 |
| 31 | (121) | 1,04 | 1,30 | 1,08 | 1,37 | 1,05 | 1,37 |
| 32 | (122) | 0,98 | 0,95 | 0,98 | 0,97 | 1,18 | 0,97 |
| 33 | (123) | 0,20 | 0,18 | 0,21 | 0,26 | 0,26 | 0,17 |
| 34 | (124) | 0,57 | 0,38 | 0,51 | 0,27 | 0,24 | 0,41 |
| 35 | (125) | Valor a ser estimado | | | | | |
| 36 | (126) | 1,09 | 0,65 | 0,71 | 0,97 | 1,20 | 1,05 |
| 37 | (127) | 0,14 | 0,58 | 0,30 | 0,36 | 0,49 | 0,35 |
| 38 | (128) | 0,11 | 0,07 | 0,12 | 0,09 | 0,12 | 0,14 |
| 39 | (129) | 0,62 | 0,58 | 0,72 | 0,63 | 0,43 | 0,56 |
| 40 | (130) | 0,57 | 0,64 | 0,56 | 0,46 | 0,44 | 0,53 |
| 41 | (131) | 0,79 | 0,72 | 0,82 | 0,81 | 0,65 | 0,72 |
| 42 | (132) | 0,76 | 0,77 | 0,52 | 0,49 | 0,65 | 0,54 |
| 43 | (133) | 0,73 | 0,68 | 0,72 | 0,67 | 0,75 | 0,17 |
| 44 | (134) | 0,72 | 0,77 | 0,69 | 0,29 | 0,60 | 0,76 |
| 45 | (135) | 0,46 | 0,78 | 0,63 | 0,62 | 0,73 | 0,85 |

| | | | | | | | |
|----|-------|----------------------|------|------|------|------|------|
| 7 | (142) | 0,20 | 0,16 | 0,22 | 0,12 | 0,14 | 0,13 |
| 8 | (143) | 0,13 | 0,21 | 0,13 | 0,43 | 0,21 | 0,17 |
| 9 | (144) | 0,51 | 0,51 | 0,50 | 0,33 | 0,29 | 0,33 |
| 10 | (145) | 0,55 | 0,56 | 0,58 | 0,48 | 0,40 | 0,43 |
| 11 | (146) | 0,46 | 0,43 | 0,47 | 0,23 | 0,44 | 0,30 |
| 12 | (147) | 0,50 | 0,56 | 0,53 | 0,37 | 0,49 | 0,44 |
| 13 | (148) | 0,02 | 0,82 | 0,06 | 0,70 | 0,07 | 0,85 |
| 14 | (149) | 0,65 | 0,98 | 0,96 | 0,77 | 0,87 | 0,76 |
| 15 | (150) | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,92 | 0,49 | 0,49 |
| 16 | (151) | 0,69 | 0,60 | 0,71 | 0,69 | 0,60 | 0,71 |
| 17 | (152) | 0,42 | 0,43 | 0,44 | 0,55 | 0,30 | 0,46 |
| 18 | (153) | 0,34 | 0,37 | 0,42 | 0,39 | 0,46 | 0,46 |
| 19 | (154) | 0,33 | 0,44 | 0,31 | 0,41 | 0,46 | 0,38 |
| 20 | (155) | 0,33 | 0,41 | 0,36 | 0,45 | 0,47 | 0,45 |
| 21 | (156) | 0,42 | 0,64 | 0,39 | 0,57 | 0,62 | 0,78 |
| 22 | (157) | 0,70 | 0,60 | 0,56 | 0,66 | 0,80 | 0,73 |
| 23 | (158) | 0,54 | 0,66 | 0,61 | 0,71 | 0,63 | 0,68 |
| 24 | (159) | 0,48 | 0,62 | 0,54 | 0,45 | 0,44 | 0,39 |
| 25 | (160) | 0,66 | 0,95 | 1,09 | 1,06 | 1,06 | 0,97 |
| 26 | (161) | 0,55 | 0,66 | 0,52 | 1,12 | 1,18 | 1,68 |
| 27 | (162) | 0,47 | 0,52 | 0,58 | 1,06 | 0,77 | 1,21 |
| 28 | (163) | 0,51 | 0,56 | 0,50 | 0,68 | 0,59 | 0,63 |
| 29 | (164) | 0,99 | 0,93 | 0,98 | 1,04 | 1,09 | 1,03 |
| 30 | (165) | 1,01 | 1,15 | 1,14 | 1,23 | 1,23 | 1,22 |
| 31 | (166) | 1,06 | 1,31 | 1,09 | 1,05 | 0,98 | 1,17 |
| 32 | (167) | 1,44 | 1,31 | 1,31 | 1,04 | 0,94 | 1,00 |
| 33 | (168) | 0,15 | 0,14 | 0,19 | 0,16 | 0,30 | 0,16 |
| 34 | (169) | 0,41 | 0,51 | 0,42 | 0,60 | 0,46 | 0,57 |
| 35 | (170) | Valor a ser estimado | | | | | |
| 36 | (171) | 1,23 | 0,92 | 1,00 | 0,97 | 0,79 | 0,96 |
| 37 | (172) | 0,31 | 0,27 | 0,41 | 0,46 | 0,38 | 0,47 |
| 38 | (173) | 0,13 | 0,14 | 0,09 | 0,14 | 0,08 | 0,10 |
| 39 | (174) | 0,46 | 0,60 | 0,68 | 0,59 | 0,57 | 0,28 |
| 40 | (175) | 0,41 | 0,44 | 0,49 | 0,59 | 0,64 | 0,54 |
| 41 | (176) | 0,82 | 1,03 | 0,72 | 0,94 | 0,80 | 0,90 |
| 42 | (177) | 0,63 | 0,74 | 0,59 | 0,70 | 0,59 | 0,61 |
| 43 | (178) | 0,51 | 0,63 | 0,64 | 0,72 | 0,69 | 0,73 |
| 44 | (179) | 0,78 | 0,68 | 0,68 | 0,71 | 0,77 | 0,50 |
| 45 | (180) | 0,58 | 0,71 | 0,78 | 0,68 | 0,66 | 0,50 |

8.3 – Anexo III - Altura da rebarba medida nos seis pontos da borda, para cada ensaio e réplica da do processo de otimização.

| 1 ^{os} Ensaio | | | | | | |
|------------------------|---------|------|------|------|------|------|
| Ensaio | Medidas | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 0,05 | 0,08 | 0,09 | 0,08 | 0,10 | 0,06 |
| 2 | 0,05 | 0,08 | 0,06 | 0,06 | 0,07 | 0,05 |
| 3 | 0,06 | 0,07 | 0,03 | 0,07 | 0,04 | 0,08 |
| 4 | 0,09 | 0,08 | 0,06 | 0,04 | 0,09 | 0,02 |
| 5 | 0,07 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,06 | 0,06 |
| 6 | 0,08 | 0,06 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,07 |
| 7 | 0,05 | 0,08 | 0,04 | 0,10 | 0,06 | 0,05 |
| 8 | 0,06 | 0,10 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,11 |
| 9 | 0,13 | 0,13 | 0,06 | 0,06 | 0,11 | 0,14 |
| 10 | 0,07 | 0,05 | 0,14 | 0,12 | 0,13 | 0,13 |
| D1 | 0,08 | 0,10 | 0,03 | 0,06 | 0,08 | 0,08 |
| D2 | 0,08 | 0,09 | 0,05 | 0,10 | 0,05 | 0,10 |

| Réplica 1 | | | | | | | |
|-----------|------|------|---------|------|------|------|------|
| Ensaio | Nº | NR | Medidas | | | | |
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | (13) | 0,05 | 0,03 | 0,07 | 0,05 | 0,06 | 0,06 |
| 2 | (14) | 0,05 | 0,04 | 0,08 | 0,05 | 0,08 | 0,08 |
| 3 | (15) | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,06 | 0,06 | 0,06 |
| 4 | (16) | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,06 | 0,06 | 0,04 |
| 5 | (17) | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,08 | 0,07 | 0,1 |
| 6 | (18) | 0,08 | 0,09 | 0,05 | 0,07 | 0,07 | 0,08 |
| 7 | (19) | 0,07 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,05 | 0,05 |
| 8 | (20) | 0,03 | 0,03 | 0,10 | 0,07 | 0,05 | 0,08 |
| 9 | (21) | 0,08 | 0,12 | 0,1 | 0,08 | 0,09 | 0,08 |
| 10 | (22) | 0,12 | 0,08 | 0,10 | 0,09 | 0,07 | 0,09 |
| D1 | (23) | 0,06 | 0,05 | 0,09 | 0,04 | 0,1 | 0,06 |
| D2 | (24) | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,10 | 0,06 | 0,11 |

| Replica 2 | | | | | | | |
|-----------|------|---------|------|------|------|------|------|
| Ensaio | | Medidas | | | | | |
| Nº | NR | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | (25) | 0,09 | 0,11 | 0,09 | 0,07 | 0,07 | 0,09 |
| 2 | (26) | 0,06 | 0,11 | 0,07 | 0,07 | 0,06 | 0,08 |
| 3 | (27) | 0,04 | 0,08 | 0,04 | 0,06 | 0,07 | 0,03 |
| 4 | (28) | 0,09 | 0,03 | 0,03 | 0,09 | 0,03 | 0,06 |
| 5 | (29) | 0,05 | 0,06 | 0,11 | 0,05 | 0,04 | 0,10 |
| 6 | (30) | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,09 | 0,07 |
| 7 | (31) | 0,10 | 0,07 | 0,05 | 0,08 | 0,07 | 0,02 |
| 8 | (32) | 0,09 | 0,06 | 0,07 | 0,05 | 0,05 | 0,04 |
| 9 | (33) | 0,06 | 0,11 | 0,15 | 0,09 | 0,12 | 0,11 |
| 10 | (34) | 0,09 | 0,13 | 0,11 | 0,17 | 0,20 | 0,17 |
| D1 | (35) | 0,06 | 0,07 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | 0,04 |
| D2 | (36) | 0,09 | 0,07 | 0,08 | 0,06 | 0,08 | 0,07 |

| Replica 3 | | | | | | | |
|-----------|------|---------|------|------|------|------|------|
| Ensaio | | Medidas | | | | | |
| Nº | NR | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | (37) | 0,08 | 0,07 | 0,07 | 0,05 | 0,02 | 0,02 |
| 2 | (38) | 0,04 | 0,07 | 0,07 | 0,06 | 0,05 | 0,05 |
| 3 | (39) | 0,05 | 0,06 | 0,04 | 0,06 | 0,05 | 0,06 |
| 4 | (40) | 0,05 | 0,08 | 0,07 | 0,05 | 0,02 | 0,07 |
| 5 | (41) | 0,1 | 0,02 | 0,09 | 0,06 | 0,08 | 0,07 |
| 6 | (42) | 0,1 | 0,07 | 0,07 | 0,08 | 0,09 | 0,06 |
| 7 | (43) | 0,12 | 0,06 | 0,08 | 0,03 | 0,10 | 0,11 |
| 8 | (44) | 0,03 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
| 9 | (45) | 0,15 | 0,08 | 0,08 | 0,09 | 0,09 | 0,05 |
| 10 | (46) | 0,03 | 0,05 | 0,08 | 0,12 | 0,10 | 0,08 |
| D1 | (47) | 0,05 | 0,08 | 0,03 | 0,05 | 0,09 | 0,07 |
| D2 | (48) | 0,07 | 0,09 | 0,10 | 0,10 | 0,08 | 0,1 |