

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DA FORMAÇÃO DE REBARBAS NO PROCESSO
DE FURAÇÃO**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA MECÂNICA

MARTILIANO SOARES FILHO

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 1995

ESTUDO DA FORMAÇÃO DE REBARBAS NO PROCESSO
DE FURAÇÃO

MARTILIANO SOARES FILHO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA
FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Dr.-Ing. WALTER L. WEINGAERTNER - ORIENTADOR

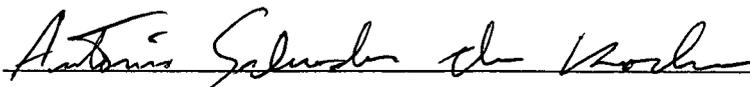


Prof. Dr. Eng. Mec. ANTÔNIO FÁBIO CARVALHO DA SILVA - COORDENADOR

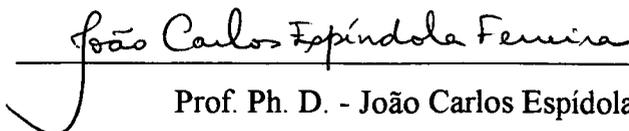
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Eng. Mec. - Lourival Boehs - Presidente



Prof. Dr. Eng. Mec. - Antônio Salvador da Rocha



Prof. Ph. D. - João Carlos Espíndola Ferreira

A meu pai Martin (in memoriam)
e a minha mãe Leticia

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e a meus irmãos que sempre me apoiaram e auxiliaram em todos os momentos da minha vida, em especial a Marcos Martins Soares pelo apoio e incentivo no início dos meus estudos.

Ao Prof. Dr. - Ing. Walter Lindolfo Weingaertner, pelo apoio, pela força e pela orientação deste trabalho.

Ao CNPq pela concessão das bolsas de estudo e recursos que viabilizaram este trabalho.

Aos amigos doutorandos Luciano Bet e Isnardo Gonzalez pela amizade, companheirismo, sugestões e auxílios durante desenvolvimento deste trabalho.

Ao graduando Evandro Minuce Mazo pela confecção dos desenhos.

A todos integrantes do Laboratório de Mecânica de Precisão pelo auxílio prestado.

A todos amigos da pós-graduação pela amizade durante o período do curso.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente me auxiliaram, possibilitando a execução deste trabalho.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
SUMÁRIO	v
LISTA DE FIGURAS	ix
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
ZUSAMMENFASSUNG	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTADO DA ARTE	4
2.1. Tendência Mundial do Estudo da Rebarba	4
2.2. Desenvolvimento e Progresso na Pesquisa da Tecnologia Rebarba	7
2.3. Definições Básicas	9
2.4. Grandezas Características de uma Rebarba	10
2.5. Classificação e Formação de Rebarba	11
2.5.1. Classificação Segundo o Processo de Fabricação	11
2.5.2. Classificação Segundo o Mecanismo de Formação das Rebarbas	12
2.5.3. Classificação Segundo o Modo e a Direção de Formação das Rebarbas	15
2.6. Análise do Mecanismo de Formação de Rebarba na Usinagem Ortogonal	16
2.7. Formação de Rebarba no Corte oblíquo	19
2.8. Grandezas Influentes na Formação de Rebarbas	21
2.8.1. Propriedades dos Materiais	22

2.8.2. Temperatura do Processo	23
2.8.3. Forças na Usinagem	24
2.8.4. Condições na Saída do Corte	24
2.9. Formação de Rebarba no Torneamento Longitudinal	25
2.10. Formação de Rebarba na Furação	26
2.10.1. Furação em Cheio	26
2.10.2. Furação com Pré-furo	28
2.10.3. Fatores que Contribuem para a Formação de Rebarbas na Furação	30
2.11. Formação de Rebarba da Retificação	34
2.11.1. Influência do Número de Passes	35
2.11.2. Efeito da Profundidade de Corte e da Velocidade da Peça	36
2.11.3. Efeito da Dureza do Material da Peça	36
2.11.4. Efeito do Ângulo de Canto da Peça	37
2.12. Estratégia e Métodos para Minimização e Prevenção de Rebarbas	37
2.13. Processos de Rebarbação e Automação	50
3. MATERIAIS E MÉTODOS PARA A COMPROVAÇÃO EXPERIMENTAL	58
3.1. Processo de Furação	58
3.1.1. Generalidades	58
3.1.2. Terminologia das Brocas Helicoidais	59
3.2. Ferramentas Utilizadas nos Experimentos	59
3.3. Material Ensaiado	60
3.3.1. Composição	61
3.3.2. Propriedades Mecânicas	61
3.3.3. Corpos de Prova	62
3.4. Dispositivo para Fixação dos Corpos de Prova.....	62
3.5. Máquina-ferramenta	63
3.6. Medição das Rebarbas	63

3.6.1. Microscópio Ótico de Medição	64
3.6.2. Relógio Comparador	64
3.6.3. Paquímetro	65
3.6.4. Balança de Precisão	65
3.6.5. Micrômetro Interno	65
3.7. Determinação das Variáveis do Processo	66
3.7.1. Velocidade de Corte	66
3.7.2. Avanços	67
3.7.3. Profundidade de Corte	67
3.7.4. Ângulo de Ponta	67
3.7.5. Ângulo de Hélice	68
3.8. Parâmetros Escolhidos para Análise dos Experimentos	69
3.8.1. Tamanho da Rebarba	69
3.8.2. Peso da Rebarba	69
3.8.3. Forma da Rebarba	69
4. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	71
4.1. Preparação dos Corpos de Prova	71
4.2. Preparação e Realização dos Ensaios	72
4.2.1. Determinação do Número de Repetições	73
4.2.2. Metodologia para a Determinação do Peso das Rebarbas	73
4.2.2.1. Pesagem dos cavacos	73
4.2.2.2. Determinação da Densidade do Material	74
4.2.2.3. Determinação do Diâmetro Médio do Furo	75
4.2.2.4. Cálculo do Peso das Rebarbas	75
4.2.3. Metodologia para a Determinação da Altura das Rebarbas.....	76
4.2.4. Metodologia para a Determinação da Espessura das Rebarbas	77

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	79
5.1. Avaliação Qualitativa das Rebarbas	79
5.2. Avaliação Quantitativa das Rebarbas	85
5.2.1. Modo de Avaliação da Dispersão dos Resultados	85
5.2.2. Avaliação pela Altura das Rebarbas	86
5.2.2.1. Influência do Avanço	86
5.2.2.2. Influência do Ângulo de Hélice	95
5.2.2.3. Influência do Ângulo de Ponta	97
5.2.3. Avaliação pela Espessura das Rebarbas	99
5.2.3.1. Influência do Avanço	99
5.2.3.2. Influência do Ângulo de Hélice	106
5.2.3.3. Influência do Ângulo de Ponta	108
5.2.4. Avaliação pelo Peso das Rebarbas	110
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	111
6.1. Conclusões	111
6.2. Sugestões para Novos Trabalhos	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
ANEXO A	118
ANEXO B	121
ANEXO C	122
ANEXO D	132
ANEXO E	139

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 1 - Estratégia para a solução do problema de rebarbas	8
Figura 2 - Definição dos cantos e rebarbas das peças	10
Figura 3 - Grandezas e denominações de uma rebarba	11
Figura 4 - Rebarba Poisson formada no torneamento	12
Figura 5 - Protuberância criada pelo raio de gume da ferramenta e pressão na superfície do flanco da ferramenta	13
Figura 6 - Rebarba enrolada produzida por uma fresa de topo	14
Figura 7 - Rebarba de corte formada na operação de sangramento	15
Figura 8 - Vários tipos de rebarba na usinagem	16
Figura 9 - Métodos de verificação dos fenômenos de deformação na usinagem	17
Figura 10 - Observação da formação de rebarba na usinagem de plasticina	19
Figura 11 - Mecanismo de formação de rebarba para o corte ortogonal e oblíquo	20
Figura 12 - Efeitos e interdependência das grandezas de influência na formação de rebarbas	21
Figura 13 - Diferença entre a formação de rebarba em um material dúctil e um material frágil	23
Figura 14 - Fases da formação da rebarba no torneamento	25
Figura 15 - Fases de formação de rebarba na furação em cheio	27
Figura 16 - Formação de rebarba na pré-furação e furação final	29
Figura 17 - Principais fatores que contribuem para a formação de rebarba na furação	30
Figura 18 - Formação e designação de rebarba na retificação	35
Figura 19 - Efeitos do ângulo de canto da peça sobre o tamanho da rebarba no final do corte	42

Figura 20 - Escareamento da saída do pré-furo para prevenir a formação de rebarba na furação	42
Figura 21 - Redução das rebarbas através da otimização dos cantos da peça bruta	43
Figura 22 - Eliminação ou redução de rebarbas no torneamento	46
Figura 23 - Estratégia para redução de rebarbas na furação	47
Figura 24 - Localização de rebarba em local de fácil acesso para facilitar a sua remoção	48
Figura 25 - Efeito do fluido de corte sobre a altura da rebarba e espessura da rebarba na furação	49
Figura 26 - Principais processos de rebarbação	51
Figura 27 - Processos de rebarbação abrasiva mais comuns	52

CAPÍTULO 3

Figura 28 - Dimensões dos corpos de prova	62
Figura 29 - Dispositivo para fixação dos corpos de prova	62
Figura 30 - Ângulos de ponta das brocas utilizadas nos experimentos	68
Figura 31 - Ângulos de hélice das brocas utilizadas nos experimentos	68
Figura 32 - Representação dos tipos de rebarbas observadas	70

CAPÍTULO 4

Figura 33 - Exemplo de identificação dos corpos de prova	71
--	----

CAPÍTULO 5

Figura 34 - Rebarba tipo I	81
Figura 35 - Rebarba tipo II	82
Figura 36 - Rebarba tipo III	83
Figura 37 - Rebarba Tipo IV	84
Figura 38 - Dispersões dos resultados da altura da rebarba para broca com $\delta = 25^\circ$	89
Figura 39 - Dispersões dos resultados da altura da rebarba para broca com $\delta = 35^\circ$	90
Figura 40 - Dispersões dos resultados da altura da rebarba para broca com $\delta = 45^\circ$	91
Figura 41 - Influência do avanço sobre a altura média da rebarba	94
Figura 42 - Influência do ângulo de hélice sobre a altura da rebarba	96
Figura 43 - Influência do ângulo de ponta sobre a altura da rebarba	98
Figura 44 - Dispersões dos resultados da espessura da rebarba para broca com $\delta = 25^\circ$	101
Figura 45 - Dispersões dos resultados da espessura da rebarba para broca com $\delta = 35^\circ$	102
Figura 46 - Dispersões dos resultados da espessura da rebarba para broca com $\delta = 45^\circ$	103
Figura 47 - Influência do avanço sobre a espessura média da rebarba	105
Figura 48 - Influência do ângulo de hélice sobre a espessura da rebarba	107
Figura 49 - Influência do ângulo de ponta sobre a espessura da rebarba	109

ANEXO A

Figura 50 - Nomenclatura de uma broca helicoidal	118
Figura 51 - Partes integrantes de uma broca helicoidal	119
Figura 52 - Ângulos na ponta da broca helicoidal	120

RESUMO

Este trabalho investiga a formação de rebarbas na usinagem, mais precisamente no processo de furação. São estudados os efeitos da velocidade de corte, do avanço e da geometria da broca sobre o tamanho e a forma das rebarbas produzidas.

Os experimentos são realizados em chapas de alumínio 6063-O com 3 mm de espessura e as rebarbas da saída do furo são analisadas, por serem maiores, de mais difícil acesso, e conseqüentemente mais problemáticas em termos de facilidade de remoção, quando comparadas com as rebarbas na entrada do furo.

As brocas utilizadas nos experimentos são de aço rápido, com ângulos de ponta de 100° , 118° e 135° , e ângulos de hélice de 25° , 35° e 45° , todas com 10 mm de diâmetro.

A avaliação das rebarbas é feita pela suas dimensões (altura e espessura), pelo peso e pela forma que esta apresenta.

Verifica-se a ocorrência de uma diminuição substancial no tamanho da rebarba quando são empregados avanços pequenos e quando se aumenta o ângulo de hélice.

O objetivo do trabalho é a adequação do processo, visando a minimização das rebarbas durante a usinagem.

ABSTRACT

This work studies the burr formation on machining, more specifically on twist drilling. The influence of parameters such as cutting speed, feed rate and drill geometry on the burr characteristics (burr height and burr form) is studied.

The research is done on 1/8" 6063-O aluminum sheet and the downburr is studied in more detail, because it is bigger and more difficult to remove as the upburr.

The HSS drills used have a point angle of 100°, 118°, and 135°, a helix angle of 25°, 35° and 45° and a diameter of 3/8".

The burrs are analysed due to the thickness, height, weight and form. It was verified that the burr size can be reduced drastically, by reducing the feed rate and increasing the helix angle of the drills.

The main objective of this work was to reduce the burr on drilling.

ZUSAMMENFASSUNG

Diese Arbeit befasst sich mit der Gratentstehung bei der Zerspanung, spezifisch beim Bohren mit Wendelbohrern. Es werden die Einflüsse der Eingangsparameter Schnittgeschwindigkeit, Vorschub und Bohrer-geometrie auf das Bearbeitungsergebnisse Gratgrösse und Gratform untersucht.

Die Untersuchungen werden an Aluminiumblechen 6063-O mit einer Dicke von 3 mm durchgeführt, und die Grate am Ausgang der Bohrungen untersucht, weil diese grösser, von schwierigerem Zugang und folglich, im Vergleich zu dem Grat am Bohrungseingang, die grössten Schwierigkeiten bei der Gratentfernung bieten.

Die in den Untersuchungen eingesetzten Bohrer aus Schnellarbeitsstahl, wiesen einen Spitzenwinkel von 100° , 118° , und 135° , einen Drallwinkel von 25° , 35° und 45° , und einen Durchmesser von 10 mm auf.

Die Gratbildung wurde anhand der Gratgrössen (Höhe und Dicke) -gewicht und -form beschrieben.

Es wurde festgestellt, dass die Gratgrösse eine massgebliche Reduzierung aufweist, wenn der Vorschub abnimmt und der Drallwinkel zunimmt.

Ziel dieser Arbeit war, das Verfahren in Bezug auf Gratgrösse beim Bohren zu optimieren.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O rápido desenvolvimento da computação e das informações tecnológicas nos últimos anos tem motivado o desenvolvimento de avançados sistemas de manufaturas automatizados como o FMS (Flexible Manufacturing System), CIMS (Computer Integrated Manufacturing System) e FA (Factory Automation). Robótica, sistemas de controle, simulação e tecnologia de fabricação avançada tem contribuído, atualmente, com excelentes resultados na área de fabricação. Até mesmo na usinagem dos metais, na qual muitos mecanismos envolvidos ainda não são perfeitamente explicados, um grande número de pesquisas aponta para o desenvolvimento de FMS e para a sua automação. A automação flexível do processo de usinagem dos metais oferece um meio bastante atrativo para o aumento da produtividade e redução dos custos uma vez que permite reconfigurar rapidamente a máquina para diferentes produtos e eliminar excessivos períodos de preparação [1].

Tudo isso pode, às vezes, esbarrar no insuficiente domínio de uma simples operação de fabricação. Uma destas operações é a rebarbação de peças. Frequentemente, ao final de uma linha totalmente automatizada, as peças precisam ser rebarbadas manualmente [2]. A operação de rebarbação pode ser o gargalo de um processo de fabricação, reduzindo a produtividade de avançados sistemas de manufatura[1].

Por ser um processo demorado e caro, na rebarbação de peças com pequeno volume de usinagem, mas com altas exigências quanto à ausência de rebarbas, os custos de rebarbação podem chegar a 20% dos custos finais de fabricação [2]. Além disso, é cada vez mais difícil encontrar pessoas para realizar os trabalhos de rebarbação em função das dificuldades do processo, falta de atrativos e ameaças à saúde que este processo oferece [3].

O manuseio de peças com rebarba freqüentemente leva a acidentes, cujas conseqüências são a diminuição da capacidade de trabalho. Por este motivo, e devido aos enormes custos envolvidos com a rebarbação, deve-se objetivar a diminuição da formação de rebarbas até um mínimo.

O objetivo final da rebarbação é permitir os passos seguintes de montagem e fabricação, assim como preencher as funções do produto no seu uso. Deste modo, as rebarbas não devem nem prejudicar o posicionamento da peça para o trabalho posterior nem devem atrapalhar os movimentos da peça montada. Partículas de rebarbas que se soltam podem prejudicar grandemente as funções e a vida do produto final. Como objetivos secundários deve-se verificar a influência das rebarbas sob o ponto de vista ergonômico e estético [2,3].

A rebarbação racional exige processos automatizados. Entretanto, deve-se pensar na redução das rebarbas já na usinagem. O ideal seria a inexistência de rebarbas para que se pudesse evitar a operação de rebarbação.

Atualmente, na indústria, cerca de 2/3 das operações de rebarbação são manuais e apenas 1/3 é feito através de máquinas. Os motivos disso são a complexidade geométrica das peças, a variação dimensional e a ocorrência irregular das rebarbas de peças para peça.

Como as rebarbas são formadas em todas as operações de usinagem e um sem número de produtos e peças dependem desta operação, uma grande soma em dinheiro é desperdiçada com operações de rebarbação. Gillespie apontou que a tecnologia da rebarba não é uma simples especialidade da engenharia, mas que esta necessita de mais atenção acadêmica e uma íntima cooperação entre indústria e universidades [1].

A área da tecnologia da rebarba está mais desenvolvida nos Estados Unidos, Japão e Alemanha. Apesar dos esforços, a tecnologia da rebarba é uma área relativamente desconhecida [1].

A solução dos problemas relativos à tecnologia da rebarba, ou seja, a redução dos enormes custos que ela causa, podem ocorrer da seguinte forma:

- Conhecimento do mecanismo de formação e prevenção das rebarbas já na usinagem da peça;
- Seleção dos processos de rebarbação mais adequados para cada caso;

- Automação da operação de rebarbação;
- Reprojetado do componente e/ou processo de usinagem.

O objetivo do estudo do mecanismo de formação de rebarba pode ser considerado sob dois aspectos. Um está relacionado com a redução dos custos de rebarbação pela prevenção ou minimização da formação de rebarbas durante a usinagem. O outro está em desenvolver um modelo para determinar o tipo de rebarba, tamanho e localização, para usar na automação, e determinar o método mais adequado de remoção. Este modelo simulará os efeitos da operação de usinagem em relação à formação de rebarba, e os efeitos da operação de rebarbação em relação à remoção de rebarbas[1].

A técnica de seleção do processo de rebarbação assistida por computador tem despertado muita atenção ultimamente.

A proposta desta dissertação está relacionado com a prevenção e/ou minimização das rebarbas durante a usinagem, mais precisamente no processo de furação de chapas. A furação de chapa, quando comparada com os métodos comuns de produção de furos, é considerada como um dos mais difíceis processos de fabricação. Neste processo as rebarbas de maiores dimensões são formadas na saída do furo. Por esta razão neste trabalho serão investigadas estas rebarbas.

Em relação à rebarbação, geralmente as rebarbas formadas na saída do furo são de mais difícil acesso e conseqüentemente mais difíceis de serem removidas, o que justifica ainda mais a preocupação com a minimização destas rebarbas.

Nos experimentos serão utilizadas brocas helicoidais de aço rápido. Todas as brocas são de 10 mm de diâmetro e apresentam diferentes ângulos de hélice e ponta.

O estudo analisa as rebarbas formadas na saída do furo, em função da geometria da broca e das condições de usinagem, e investiga as técnicas para a sua redução. As conclusões serão feitas em forma de recomendações de geometria de broca e condições de furação as quais venham reduzir as rebarbas neste processo.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

2.1. Tendência Mundial do Estudo da Rebarba

O estudo da formação de rebarbas, sob o ponto de vista prático, começou na metade do século XIX na indústria de construção naval [4]. No Japão os primeiros estudos neste campo datam de 1945. Também no resto do mundo a abordagem deste aspecto despertou bastante interesse e nos Estados Unidos as primeiras referências datam de 1975 [5].

O estudo da rebarba é uma especialidade da engenharia de sistemas de produção a qual favorece a racionalização da produção em todas as etapas, tal como, projeto, fabricação, montagem e inspeção, e melhora o desempenho e os resultados na vida dos produtos.

Um importante passo para o desenvolvimento da tecnologia da rebarba, é um trabalho conjunto entre a indústria e grupos acadêmicos, instituições de ensino e universidades, sustentada pela verdadeira necessidade da indústria.

Os problemas de rebarba na manufatura automatizada estavam negligenciados até que várias pessoas, entre elas LaRoux K. Gillespie, engenheiro da Bendix Co. nos Estados Unidos e líder nesta especialidade, despertou, em 1974, para os problemas econômicos que a remoção de rebarba apresenta, podendo chegar de 5~10 bilhões de dólares anuais. Gillespie, um pioneiro na tecnologia da rebarba, fundou a “Burr Technology Division” da Society of Manufacturing Engineers (SME) em 1974. Posteriormente ela foi renomeada de “the Burr, Edge and Surface Conditioning Technique (BEST) Committee”[1].

A divisão BEST da SME, a sociedade BEST-J japonesa e o instituto alemão für Produktionstchnik und Automatisierung têm coordenado pesquisas, disseminado informações e prestado notáveis contribuições no campo da tecnologia da rebarba [5].

Gillespie insiste que a tecnologia da rebarba não é uma simples especialidade da engenharia e que, ao contrário do que muitos acreditam, ela pode causar sérios impactos em sistemas de produção automatizados.

A tecnologia da rebarba requer tanto experiência industrial como excelência acadêmica.

No projeto de componentes mecânicos é muito importante considerar não somente o material, tratamento térmico, forma, precisão dimensional e rugosidade, mas também a integridade superficial e a qualidade das bordas (incluindo rebarbas). Até agora, estes dois últimos têm sido ignorados pelos projetistas, mas eles devem ser reconhecidos como fatores significantes que afetam o desempenho e a vida dos produtos.

O termo “Qualidade da borda” está relacionado à forma, dimensão, tolerância e rugosidade da borda da peça.

Entre vários outros problemas relacionados com a qualidade das bordas de peças, destacamos os seguintes:

1 - Quando duas peças se movimentam uma em relação a outra durante a operação, a lubrificação e o desgaste devido à adesão pode ser afetado pela qualidade das bordas;

2 - A qualidade das bordas afeta o limite de fadiga de molas e de componentes altamente tensionados. Sabe-se que o limite de fadiga de molas, havendo rebarbas, diminui para menos da metade comparado com o caso onde o acabamento das bordas é arredondado pelo escovamento ou tamboreamento.

3 - Durante o tratamento térmico, muitas vezes ocorrem trincas nas bordas devido a concentração de tensão nas rebarbas;

4 - A presença de rebarba ocasiona erros em planos padrões de usinagem e em medições;

5 - Bordas afiadas de carretéis e buchas de servo-mecanismos afetam a sua operação;

6 - A facilidade da montagem automática depende fortemente da qualidade das bordas.

Em adição a estes pontos, temos o fato de que bordas ruins causam danos humanos (ferimentos), curtos-circuitos elétricos, vazamento de ar e líquidos e reduzem o desempenho de corte e a vida da ferramenta. (A análise destes problemas não tem sido bem trabalhada até agora. Isto deve ser feito e publicado urgentemente) [5].

Os problemas referentes à tecnologia da rebarba podem ser solucionados resumidamente como proposto a seguir [1,5]:

A- Mecanismo de Formação e Minimização da Rebarba: Pelo conhecimento do mecanismo de formação da rebarba, esta pode ser prevenida ou minimizada. Para compreender a formação da rebarba é necessário o conhecimento da teoria da plasticidade, mecanismo de fratura, metalurgia e mecanismo de corte dos metais. No entanto, no campo da teoria do corte, os problemas de rebarba até agora foram ignorados. Os pesquisadores têm trabalhado somente com interesse acadêmico e não têm dado atenção para os problemas práticos da indústria.

Uma metodologia muito usada para verificar a teoria utiliza Métodos de Elementos Finitos (FEM-Finite Element Method) e Microscopia Eletrônica de Varredura MEV (SEM-Scanning Electron Microscope). Devido à não uniformidade da geometria, uma análise estatística da formação da rebarba dá um melhor modelo para ser usado em processos automatizados.

B- Processo de Rebarbação e Automação: Devido à existência de muitos processos de rebarbação e cada um com suas vantagens e particularidades, torna-se necessário desenvolver um método de seleção do processo de rebarbação, mais adequado, auxiliado por computador. Até agora isto tem sido feito baseado na experiência.

Recentemente a técnica de seleção do processo de rebarbação auxiliado por computador tem sido muito desenvolvida na Alemanha e no Japão. Para que esta abordagem tenha sucesso, é necessário a criação de um banco de dados com informações de todos os processos de rebarbação.

O uso combinado de dois ou mais métodos de rebarbação, pode ser muito efetivo no sentido de se obter consistência e confiança na qualidade desejada das bordas e nas condições superficiais das peças, assim como nos custos da rebarbação.

A automação do processo de rebarbação tem despertado muita atenção atualmente. Os seus principais méritos são:

- 1 - Obtenção de resultados consistentes e seguros na qualidade dos produtos e peças, execução da operação sem necessitar experiência, e redução de custos.
- 2 - Obtenção da mesma qualidade de bordas e superfícies em todas as peças.

3 - Redução da necessidade de inspeção.

4 - Facilidade no preparo para a montagem automática.

As seguintes recomendações ajudam a alcançar os quatro pontos listados acima [5].

1 - Instalação, na produção, de robô de rebarbação de alto desempenho e baixo custo.

2 - Utilização de ferramentas de rebarbação em centros de usinagem sempre que possível, no lugar de máquinas separadas para rebarbação.

3 - Desenvolvimento de máquinas especiais para rebarbação com flexibilidade para acomodar qualquer peça de uma família de tecnologia de grupo.

4 - Utilização de novas ferramentas de rebarbação na operação manual.

5 - Desenvolvimento de sistemas de rebarbação flexível (FDS) junto com o FMS.

Um resultado ótimo de trabalho só é obtido quando ambas as possibilidades citadas em A e B, são utilizadas e combinadas. Na prática, deve-se controlar quais as vantagens que a redução destas rebarbas podem trazer à operação de rebarbação, figura 1 [6].

2.2. Desenvolvimento e Progresso na Pesquisa da Tecnologia da Rebarba

Vários pesquisadores japoneses foram pioneiros no campo da tecnologia da rebarba. Em 1954 o professor M. Okoshi estudou o mecanismo de formação e prevenção de rebarbas na furação de chapas de duralumínio aeronáutico. A partir daí surgiram vários outros trabalhos em outros processos de fabricação como no torneamento e puncionamento e o desenvolvimento de máquinas para rebarbação. Estes trabalhos foram a alavanca para o desenvolvimento da tecnologia da rebarba no Japão e, nos últimos anos, esta área de estudo tem aumentado acentuadamente.

As recentes tendências da tecnologia da rebarba são as seguintes [5]:

1 - Abordagem básica sobre o estudo do mecanismo de formação e prevenção de rebarbas para várias operações de usinagem (puncionamento, furação, torneamento, fresamento, conformação (corte ortogonal) e retificação).

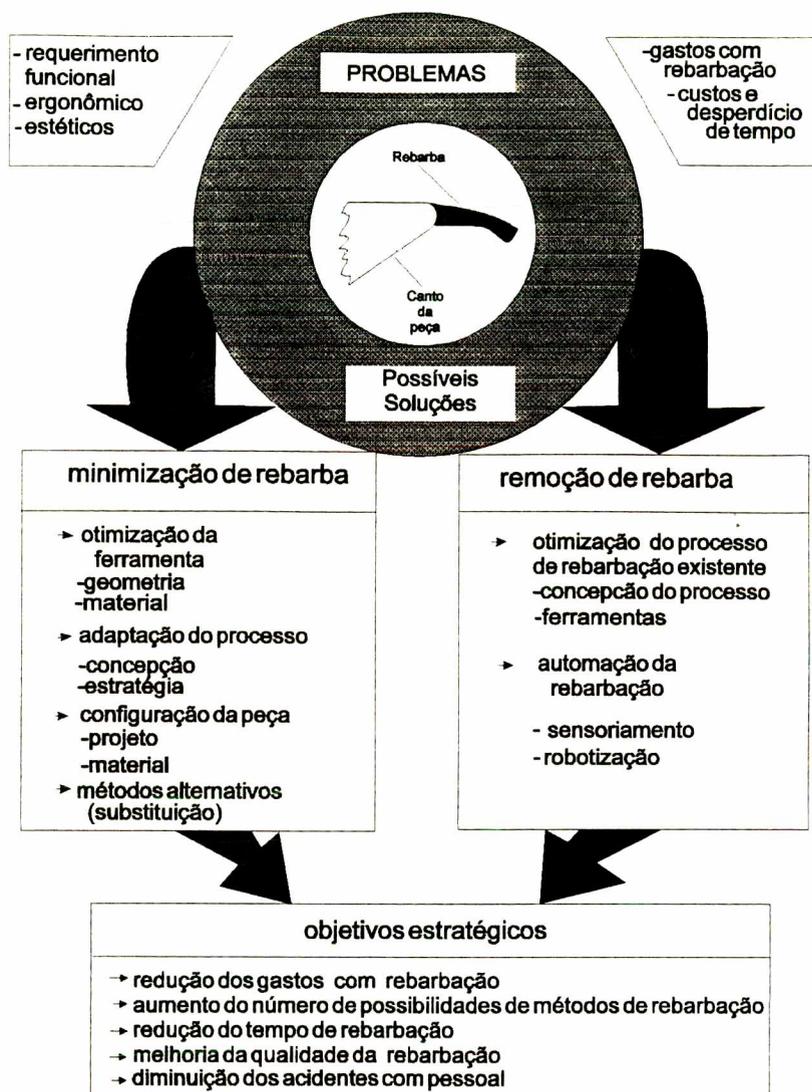


Figura 1 - Estratégia para a solução do problema de rebarbas [6].

2- Abordagem básica para vários processos de acabamento e mecanismo de remoção de rebarbas e otimização das condições de trabalho.

3 - Desenvolvimento do processo de rebarbação por extrusão forçada, rebarbação eletrolítica, rebarbação robotizada, acabamento com abrasivos magnéticos e máquinas desenvolvidas especialmente para rebarbação e acabamento.

O desenvolvimento nessa área está mais acelerado do que nos processos de usinagem usuais.

4 - Estudos da seleção do processo de rebarbação auxiliado por computador.

5 - Desenvolvimento de processos de rebarbação e acabamento automáticos e sua introdução no sistema de manufatura.

2.3. Definições Básicas

Na fabricação denomina-se de rebarbas as remanescências de material dos cantos usinados das peças. Existem diversas denominações para rebarba, que vão desde “formação indesejável de material” até “crescimentos metálicos em forma de crista”. A grande quantidade de definições pode ser explicada pelas diferentes formas e tipos de rebarbas formadas nos diversos processos de fabricação.

Sung-Lim [1] definiu uma rebarba como uma projeção indesejável de material formada do resultado do escoamento plástico numa operação de corte ou cisalhamento.

Num sentido mais amplo, a formação indesejável de um chanfro ocasionado pela fratura do material durante a deformação pode ser considerado como uma rebarba [1].

A norma DIN 6784 define as bordas e as rebarbas das peças conforme a figura 2.

Uma definição geral de rebarba foi formulada por F. Schäfer [7], e diz: “Uma rebarba é a formação de material indesejada, que ocorre nos cantos ou nas superfícies das peças após a fabricação e que se projeta além da superfície ideal da peça”.

Rebarbas não são consideradas desvios de forma, e na observação das rebarbas não são levados em conta desvios dimensionais e rugosidade”[2].

Na furação passante, inevitavelmente um excesso de material, de certa magnitude, fica acumulado ao redor da entrada e da saída do furo. Este excesso de material aderido na superfície da peça será definido como rebarba na furação[8].

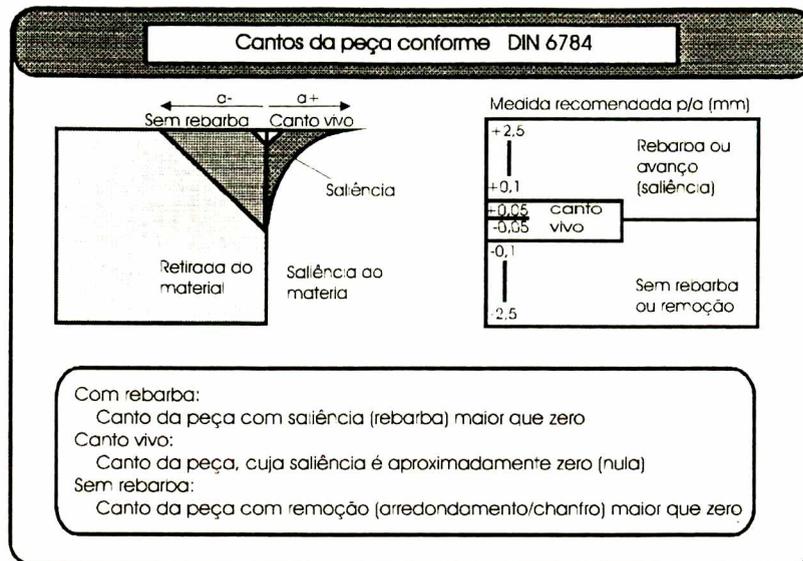


Figura 2 - Definição dos cantos e rebarbas das peças.

Ocorrem dificuldades quando é usado o termo “Rebarba Tolerável”, visto que ele restringe o tamanho e a forma da rebarba, fazendo com que seja necessário alguma forma de medida. O critério usado para medir rebarba depende do produto e de sua aplicação. A importância atribuída ao produto, como confiança, segurança, funcionalidade ou aparência terá influência sobre o tamanho tolerável da rebarba [8].

2.4. Grandezas Características de uma Rebarba

Cada rebarba pode ser descrita através do seu perfil longitudinal e seu perfil transversal. Normalmente o perfil transversal é suficiente para a descrição da geometria de uma rebarba, por ser a dimensão mais relevante. As principais grandezas dimensionais para a descrição geométrica de uma rebarba utilizadas, em muitos trabalhos científicos, para indicar o tamanho da rebarba são mostradas na figura 3. Nesta figura, a rebarba é caracterizada pela sua altura h , espessura da base t e raio da base r .

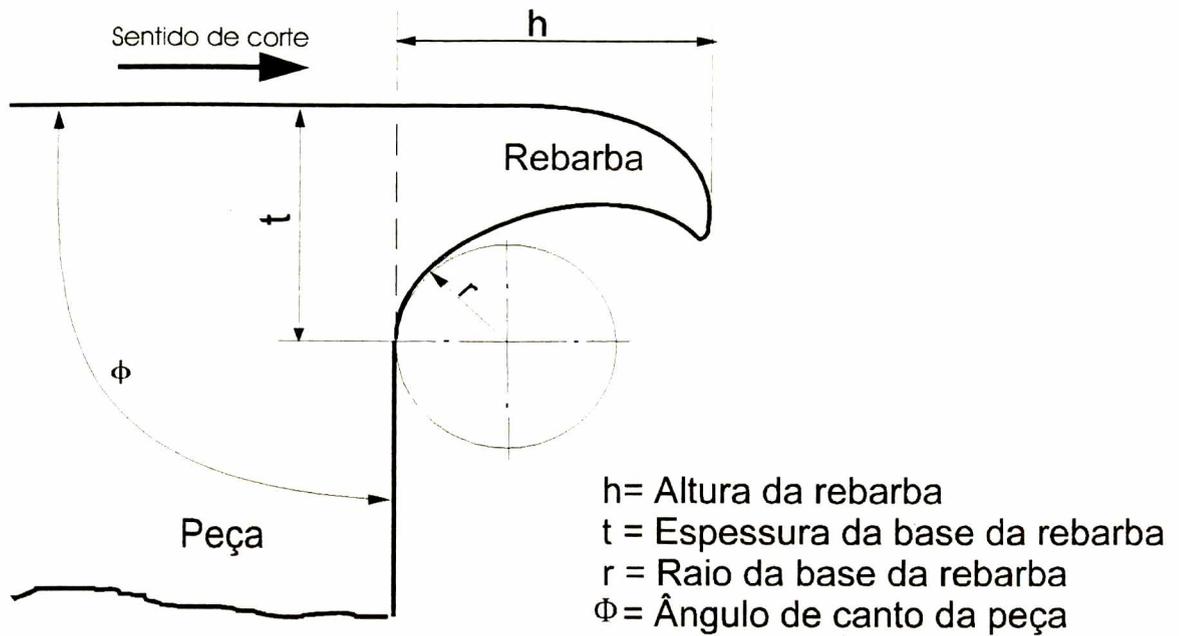


Figura 3 - Grandezas e denominações de uma rebarba.

2.5. Classificação e Formação de Rebarba

2.5.1. Classificação Segundo o Processo de Fabricação

O tipo e a formação de rebarba dependem basicamente do processo de fabricação. Processos diversos levam à formação de rebarbas diferentes, que podem ser divididas nos seguintes grupos [2]:

- Rebarbas de processo de conformação, definidas pela forma ou erros de forma da ferramenta;
- Rebarbas ocasionadas por processos de remoção, como as da eletroerosão por faíscas;
- Rebarbas de processo de soldagem, como soldagem por pressão e atrito;
- Rebarbas de processos de fundição e
- Rebarbas de processo de usinagem.

2.5.2. Classificação Segundo o Mecanismo de Formação das Rebarbas

Gillespie [9] classificou quatro tipos básicos de rebarbas, de processo de usinagem, de acordo com o mecanismo de formação: Rebarba Poisson, Rebarba Enrolada (rollover), Rebarba Repuxada (tear) e Rebarba de Corte (Cut-off).

a) Rebarba Poisson - resulta da tendência do material, que está sendo cortado, em criar saliências laterais quando é comprimido até ocorrer deformação plástica permanente, figura 4 [10]. O nome “Rebarba Poisson” deriva do coeficiente de Poisson (ν), que explica a deformação lateral do material.

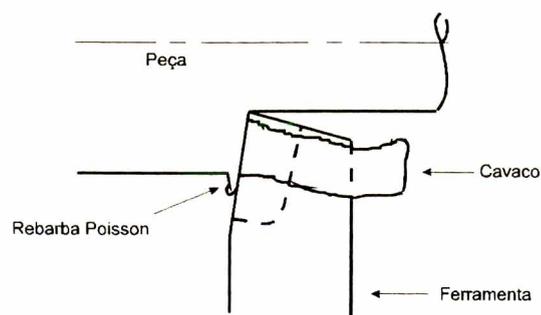


Figura 4 - Rebarba Poisson formada no torneamento.

Para entender o mecanismo de formação deste tipo de rebarba, dois fatores são importantes: O fato do gume possuir um pequeno raio funcionando como um cilindro comprido e fino, além da ocorrência frequente do gume postiço, que faz com que o gume efetivo seja muito maior que o gume original, figura 5a e b; outro fator é a alta pressão que existe na superfície do flanco da ferramenta que ocorre principalmente em materiais como o aço inoxidável que possui um baixo coeficiente de condutividade térmica, alto coeficiente de dilatação térmica e baixo módulo de elasticidade, figura 5c [9].

O encontro do flanco e da face da ferramenta real não é uma aresta e sim uma região curva, com um raio, e assim é mais conveniente tratar o gume como um longo e fino cilindro.

Quando este cilindro avança para dentro da peça (devido à força F), ocorre a formação de uma saliência nas bordas desta, figura 5b.

A magnitude desta saliência é função do raio efetivo de corte r_b , da pressão efetiva sobre o raio e das propriedades do material.

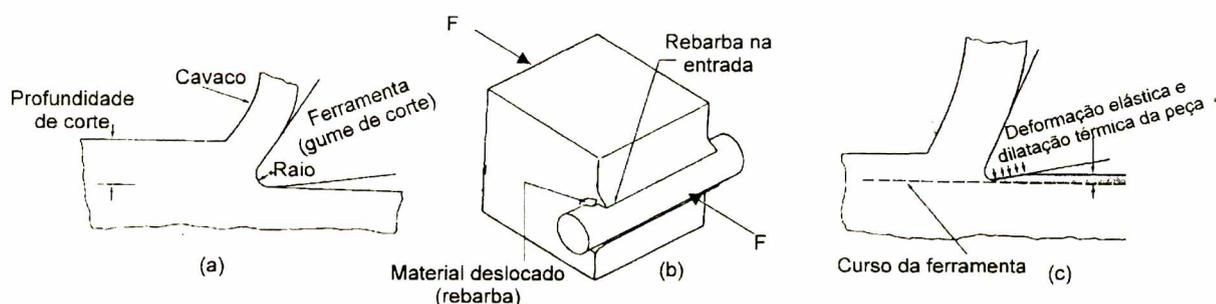


Figura 5 - Protuberância criada pelo raio de gume da ferramenta e pressão na superfície do flanco da ferramenta.

Quando o cilindro penetra na peça com uma espessura de usinagem $h=r$ (igual a seu raio) a rebarba atinge seu tamanho máximo. Como o cilindro continua a avançar através do material, a rebarba é produzida ao longo de toda superfície do cilindro que está em contato com a peça. Para a Rebarba Poisson se formar, o gume deve se estender além da borda da peça. Com exceção do sangramento, este critério é aplicado em muitas outras operações de usinagem.

b) Rebarba Enrolada (rollover) - é essencialmente um cavaco que é enrolado e empurrado, ao invés de ser cortado, para fora da peça no final da trajetória de corte da ferramenta. É uma das rebarbas mais visíveis. Em uma operação de fresamento de topo, ela é tão longa quanto a penetração de trabalho a_e , figura 6. Sua largura é igual a profundidade de corte. Ela se forma, quando a ferramenta sai da peça, em qualquer operação na qual a força principal de corte atua sobre a extremidade livre do cavaco/rebarba.

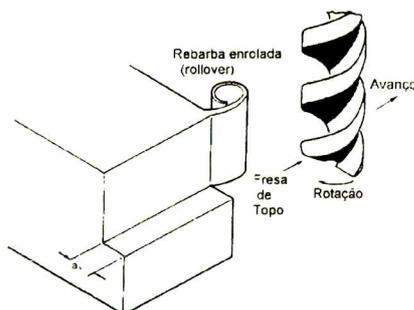


Figura 6 - Rebarba enrolada produzida por uma fresa de topo.

Se a deformação, no enrolamento do cavaco/rebarba, ultrapassar a deformação necessária para a fratura, então a maioria da rebarba se quebrará, ficando apenas um pedaço muito curto.

Sung-Lim [1] analisou a formação da rebarba enrolada baseado em observações da usinagem de Plasticina (ou plastilina - massa para modelar, que não endurece, feita de argila misturada com óleo ou cera). A formação da rebarba é composta de deformação por cisalhamento e curvamento plástico. A fratura ocorre de acordo com a intensidade da deformação equivalente durante a formação da rebarba.

c) Rebarba Repuxada (tear) - é resultado do rasgamento do material da peça ao invés do mesmo ser cortado. É similar à rebarba formada em operações de puncionamento. Frequentemente ocorre este tipo de rebarba no fresamento, quando uma fresa de disco é mais estreita que a peça. Neste caso, o cavaco vai sendo puxado, pelo dente da fresa, até ser arrancado da peça e a rebarba é a porção repuxada do material que não desprendeu.

d) Rebarba de Corte (Cut-off)- Resulta quando a peça, que acabou de ser usinada, é separada da barra (material) que lhe deu origem. Neste caso, a peça cai, por ação da gravidade, antes que o corte completo tenha sido efetuado pela ferramenta. Este tipo de rebarba é frequentemente encontrada em operações de serramento, embora seja mais comum encontrá-la no torneamento, figura 7 [10].

Além destes tipos de rebarbas, podem ainda surgir rebarbas que são uma combinação dos quatro, sendo que um sempre é predominante.

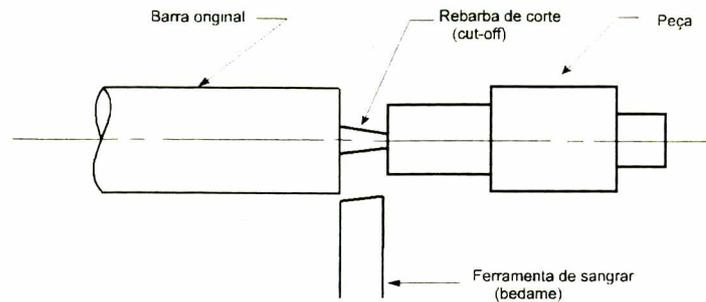


Figura 7 - Rebarba de corte formada na operação de sangramento.

2.5.3. Classificação Segundo o Modo e a Direção de Formação das Rebarbas

Além da classificação segundo o mecanismo de formação, as rebarbas podem também ser classificadas segundo a direção de formação, especialmente nas operações de usinagem. Aqui elas foram classificadas em rebarba escoada para trás, escoada para a lateral, escoada para frente e inclinada na direção do avanço [11].

Visto que a localização e a direção de formação das rebarbas são bem correspondentes, isto é, a rebarba escoada para trás ocorre na entrada e a escoada para frente ocorre no estágio de saída do corte, elas são também chamadas de rebarba na entrada e rebarba na saída, respectivamente. A rebarba na entrada é considerada como o estágio inicial da formação do cavaco [1].

Resultados de investigações experimentais e por métodos de elementos finitos, do mecanismo de formação de rebarba na entrada, mostraram que a altura destas rebarbas é muito pequena comparada com a profundidade de deformação plástica [1].

As rebarbas inclinadas são formadas pela flexão do material que está sendo cortado para fora da peça, na direção da força de avanço no passe seguinte. Uma vez que a rebarba inclinada é formada pelo curvamento devido à força de avanço, a sua espessura depende da rigidez do material da peça. A altura é da mesma ordem de grandeza da profundidade de corte [11].

O mecanismo de formação da rebarba na saída e lateral da peça pode ser considerado idêntico ao das rebarbas enroladas (rollover) e Poisson respectivamente. Todas as rebarbas

produzidas em qualquer operação de usinagem podem ser enquadradas dentro desta classificação. A figura 8 ilustra e classifica, de acordo com a direção e o mecanismo de formação, as rebarbas no fresamento frontal, brochamento, abertura de ranhuras, furação, torneamento e corte ortogonal.

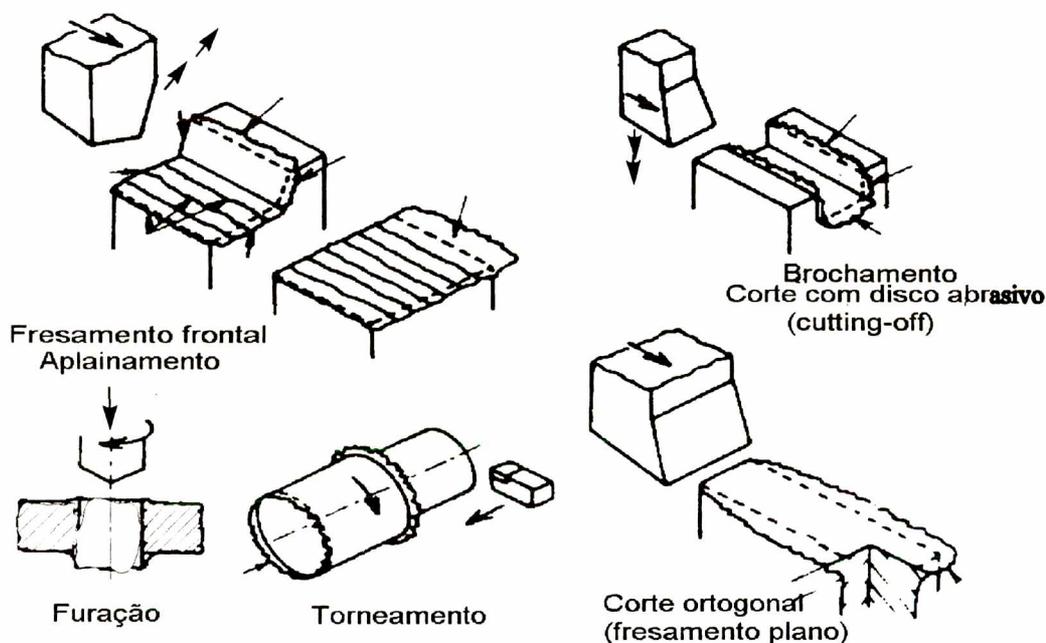


Figura 8 - Vários tipos de rebarba na usinagem.

2.6. Análise do Mecanismo de Formação de Rebarba na Usinagem Ortogonal

O processo de usinagem com ferramentas de geometria definida pode ser dividido, de maneira simplificada, em três partes. Primeiramente a cunha de corte penetra no material da peça e o deforma elástica e plasticamente. Após isto, forma-se um cavaco, que escoá sobre a face da ferramenta, e finalmente há a saída do corte. Tão logo não ocorra mais contato entre ferramenta e peça, está encerrado o processo de formação de rebarba. Desta forma, pode-se dividir este fenômeno em separação do material e deformação do material (figura 9) [2].

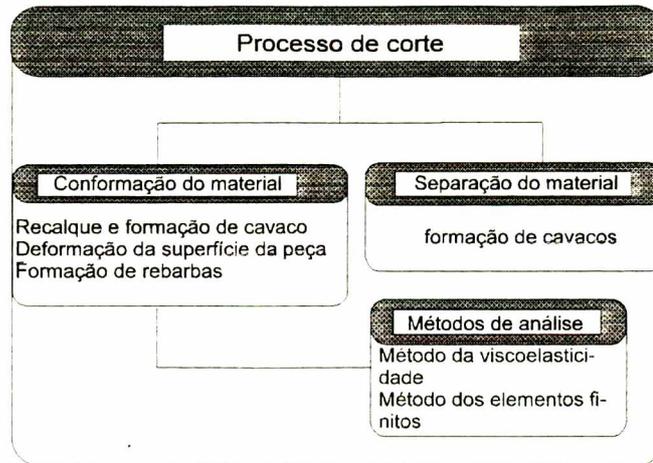


Figura 9 - Métodos de verificação dos fenômenos de deformação na usinagem.

Existem muitas técnicas, como já foi visto, para minimizar os custos de remoção de rebarba. Uma delas pode ser pela redução do tamanho da rebarba durante a usinagem por meio do entendimento do mecanismo de sua formação.

Pelo entendimento do mecanismo de formação é possível prever o resultado da operação e assim selecionar a condição de corte mais adequada.

Sung-Lim [1] investigou e propôs um modelo do mecanismo de formação de rebarba quando não ocorre a fratura durante a sua formação, assumindo que a deformação consiste de curvamento e cisalhamento plástico. Esta suposição é baseada na observação da formação de rebarba durante testes de usinagem com plasticina. Uma malha foi riscada na lateral da peça de plasticina para permitir a observação do comportamento da deformação do material durante a usinagem.

O processo de formação da rebarba é dividido em três partes: iniciação, desenvolvimento e formação da rebarba. A formação da rebarba começa quando a ferramenta aproxima-se do final da peça e encerra o estado uniforme de formação do cavaco.

- **Iniciação da Formação da Rebarba**

Quando a ferramenta aproxima-se do final da peça, há um ponto de transição no qual encerra-se a formação natural do cavaco e inicia-se a deformação plástica abaixo do plano da superfície usinada na direção do corte. Neste ponto de transição, assume-se que a energia para a formação do cavaco é convertida totalmente para a formação da rebarba.

O início da formação da rebarba é caracterizado pelo ângulo de cisalhamento negativo inicial $A'B$, figura 10, e pela posição inicial da ferramenta dada pela distância do ponto A ao final da peça. O ângulo de cisalhamento negativo inicial é definido pela direção do corte e pelo plano (plano de cisalhamento negativo) que passa pelo gume de corte da ferramenta, ponto A, e pela dobra no ponto B.

- **Desenvolvimento da Formação da Rebarba**

Quando a ferramenta avança, após o início da formação da rebarba, do ponto A para A' , o plano de cisalhamento negativo inicial muda de AB para $A'B$. Logo que o plano de cisalhamento negativo inicial é definido, o seu ponto final B, na superfície da peça, funcionará como uma dobradiça plástica, a qual não se move durante o desenvolvimento da formação da rebarba.

Ao observar-se o comportamento da malha $A'BCD$ do cavaco/rebarba, verifica-se que esta não sofre mais nenhuma distorção após determinado estágio do processo, no qual ocorre a transição da usinagem normal (com formação de cavaco) para a formação da rebarba. Na área ABA' a malha ao longo do plano $A'B$ é distorcida mais severamente do que ao longo do plano AB . Desta observação pode ser dito que a porção de material acima do plano de cisalhamento negativo ($A'B$) é girada rigidamente e a deformação ao longo deste plano é aumentada quando a ferramenta avança na direção do final da peça.

Como no plano de cisalhamento negativo, a malha nas proximidades do gume da ferramenta é muito mais deformada do que em volta da dobradiça plástica (ponto B), pode-se estimar que a máxima deformação ocorre próximo ao gume da ferramenta.

• Formação da Rebarba

Finalmente, a rebarba é formada, com ou sem fratura, devido ao aumento da deformação ao longo do plano de cisalhamento quando a ferramenta se aproxima do final da peça. Se ocorrer fratura durante a formação da rebarba ao longo da região do cavaco ou do limite cavaco/rebarba (A'D), a formação da rebarba é cessada, mas esta permanecerá aderida à peça. Entretanto, se ocorrer fratura ao longo do plano de cisalhamento negativo, a rebarba não se formará ou será bem reduzida.

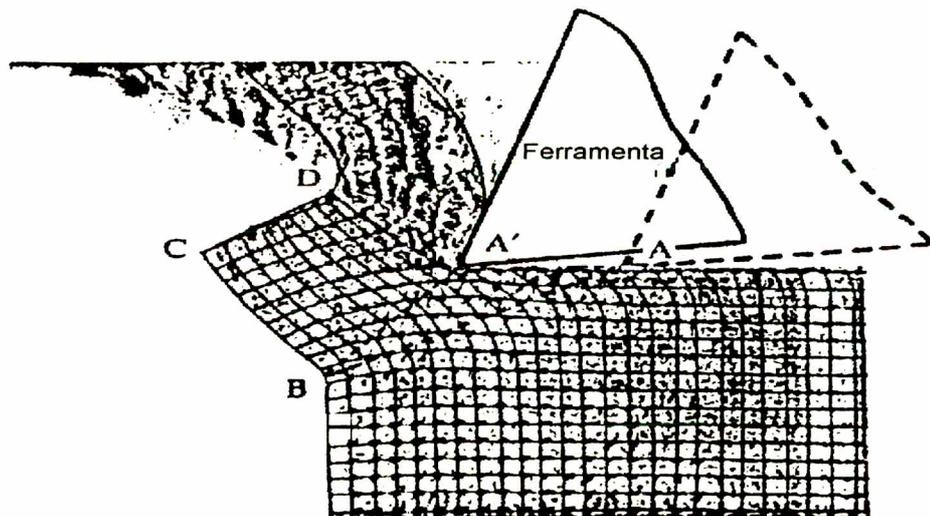


Figura 10 - Observação da formação de rebarba na usinagem de plasticina.

2.7. Formação de Rebarba no Corte Oblíquo

Hashimura [12] investigou o mecanismo de formação de rebarba no corte oblíquo da liga de alumínio 2024-O usando recursos de microscopia eletrônica e métodos de elementos finitos.

O mecanismo de formação de rebarba tanto para o corte oblíquo quanto para o corte ortogonal estão representados de forma simplificada na figura 11.

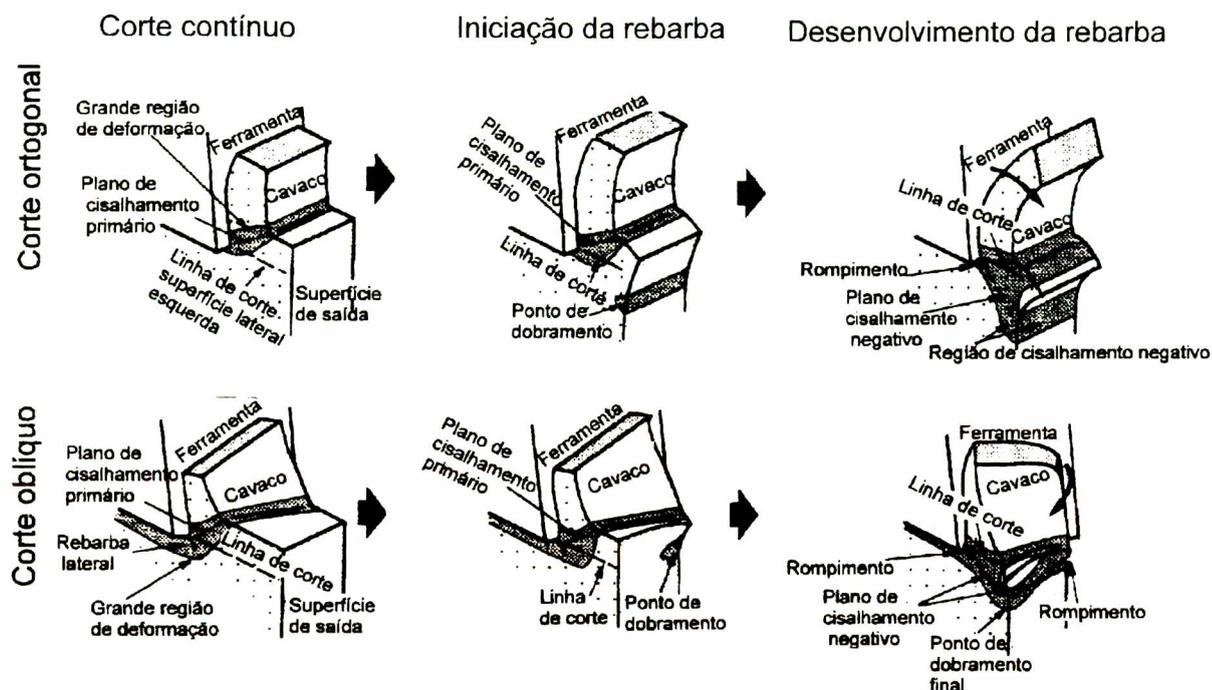


Figura 11 - Mecanismo de formação de rebarba para o corte ortogonal e oblíquo.

No corte ortogonal, durante a formação da rebarba, o ponto de dobramento ocorre sobre a superfície de saída da peça em toda sua extensão e uma grande região deformada estende-se em direção a este ponto. Uma zona de cisalhamento negativo é formada entre o gume da ferramenta e a linha de dobramento. A separação do cavaco ao longo da linha de corte “ideal” é cessada logo que o material começa a romper. Este rompimento (lascamento ou separação do material) aumenta ao longo da zona de cisalhamento negativa (desenvolvimento da rebarba). A propagação da deformação e do rompimento é homogênea em toda a largura da peça.

No corte oblíquo a distância da parte dianteira da ferramenta até o canto de saída da peça, para a iniciação da rebarba, é menor do que no corte ortogonal. Quando a ferramenta avança, o cavaco começa a torcer-se em direção ao lado esquerdo da peça. O ponto de dobramento começa no lado direito e move-se ao longo da superfície de saída em direção ao lado esquerdo na representação da figura 11. A separação do material (rompimento) inicial causado pelo gume da ferramenta vai aumentando em direção ao ponto de dobramento final. A zona de cisalhamento negativa está junto da linha ideal de corte e a espessura da rebarba formada na saída é menor do que no corte ortogonal.

2.8. Grandezas Influentes na Formação de Rebarbas

Devido às complexas interrelações entre as grandezas influentes na formação de rebarbas, não se pode fazer uma divisão entre parâmetros de influência diretos e indiretos, figura 12 [2].

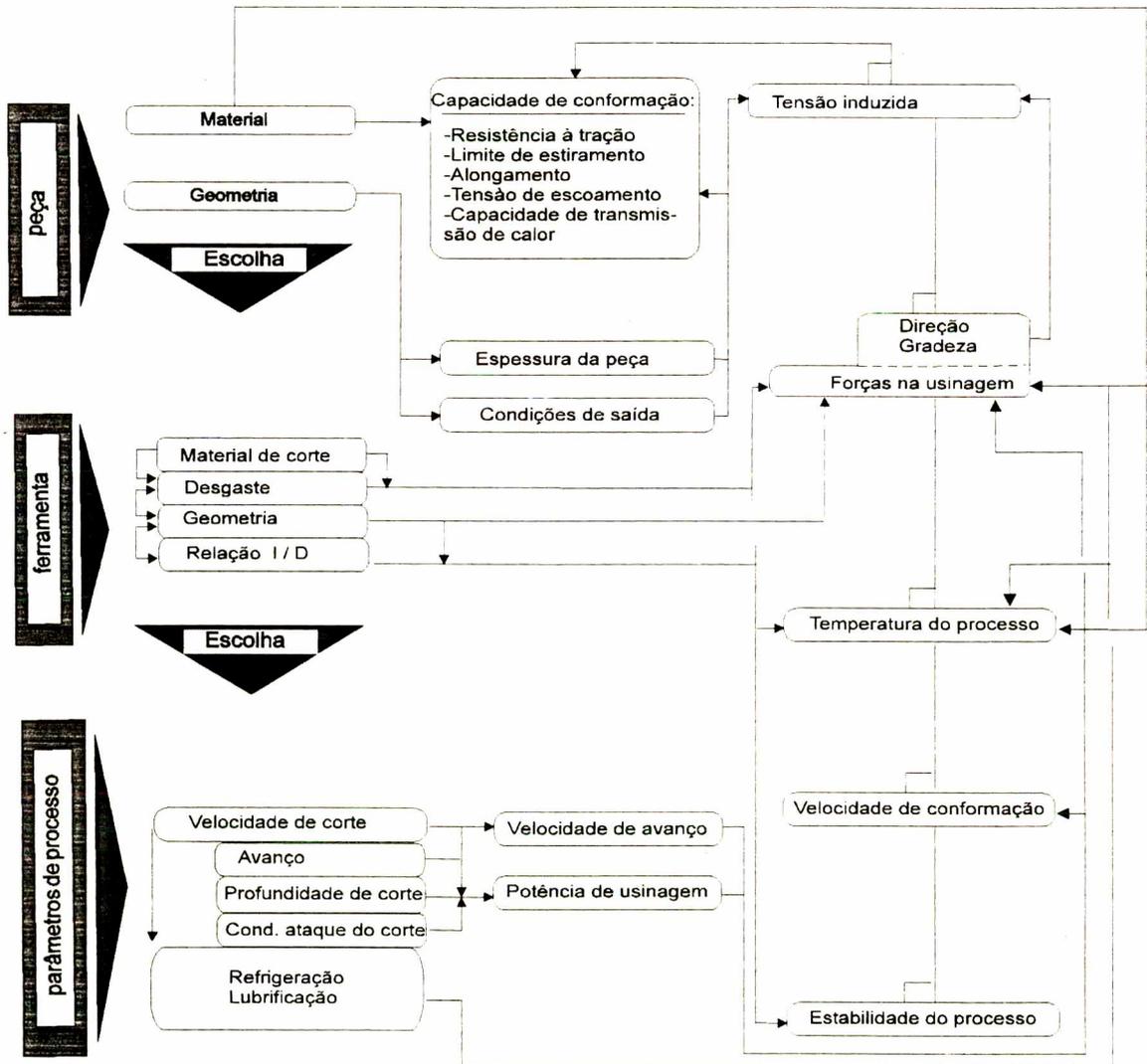


Figura 12 - Efeitos e interdependência das grandezas de influência na formação de rebarbas.

Existe consenso que em primeiro plano de influência na formação de rebarbas encontram-se a peça, a ferramenta e os parâmetros do processo. Não se deve, entretanto, esquecer a importância que tem a capacidade de deformação dos diversos materiais ensaiados. Devem ser citadas as características dos materiais que podem ser definidas através de outras grandezas características e que dependem da temperatura no local do processo. Nisto tem importância a capacidade de transmissão de calor, determinando em quanto o material é aquecido.

Também têm importância as forças na usinagem e as condições de saída do corte, que determinam a direção da formação de rebarbas [2].

2.8.1. Propriedades dos Materiais

Materiais metálicos podem ser descritos através de seus valores específicos e comparados entre si em função destes. Na formação de rebarbas, os valores característicos de maior interesse são a resistência à tração, limite de escoamento, resistência ao cisalhamento e o alongamento. Com ajuda dessas grandezas é possível fazer previsões quanto à usinabilidade e também formação de rebarbas desses materiais.

Dois fatores com relação ao material da peça influenciam diretamente o tamanho da rebarba [10]: Ductilidade e Coeficiente de encruamento do material.

Em relação ao primeiro fator podemos afirmar que, materiais frágeis, como o ferro fundido, quase não formam rebarbas. Isto porque estes materiais têm pouca capacidade de deformação plástica. Materiais dúcteis estão mais susceptíveis à formação de rebarbas por possuírem características contrárias aos anteriores [1,10,11,13]. A formação de rebarba em um material dúctil é diferente de um material frágil, conforme mostra a figura 13 [14].

O tamanho da rebarba também é função do coeficiente de endurecimento do material. Materiais não encruáveis formam menores rebarbas do que aqueles com grande tendência ao encruamento [10].



(a) Material dúctil (cobre)



(b) Material frágil (Al 2024-O)

Figura 13 - Diferença entre a formação de rebarba em um material dúctil e um material frágil [14].

2.8.2. Temperatura do Processo

Diversos trabalhos científicos têm se ocupado de pesquisas e técnicas de medição da temperatura em processos de fabricação. Esta ocorre devido principalmente aos mecanismos de separação dos materiais, deformação plástica e atrito. A temperatura é importante para análise do desgaste de ferramentas e materiais da peça, entre outras.

O aquecimento que ocorre em peças durante a usinagem é de grande interesse no estudo da formação de rebarbas, visto que a capacidade de deformação de um material é diretamente dependente da temperatura e velocidade de deformação [2].

2.8.3. Forças na Usinagem

As forças de usinagem dependem das propriedades dos materiais e da temperatura do processo, e ocorrem devido ao atrito, separação e deformação do material. Estas grandezas específicas do processo são utilizadas na determinação das características de usinabilidade dos materiais.

As componentes da força de usinagem variam em função dos parâmetros do processo e da geometria da ferramenta, e atuam na deformação dos materiais e no tipo de rebarba formada de maneira diferente para os diversos processos [2].

A formação de rebarba está, em geral, ligada diretamente à força de usinagem. Nestes casos, qualquer fator que reduza a força de corte, reduzirá também o tamanho da rebarba [1,13,15].

2.8.4. Condições na Saída do Corte

O último dos parâmetros primários de influência são as condições na saída da ferramenta nos cantos da peça. Deve-se observar que existem diversas variações nos tipos de canto de saída da peça. Na furação, estas são altamente limitadas, enquanto que no fresamento plano isto não ocorre [2].

2.9. Formação de Rebarba no Torneamento Longitudinal

Neste processo, como na maioria, as maiores rebarbas ocorrem na saída do corte, quando o material não é mais usinado, e sim deformado plasticamente, figura 14.

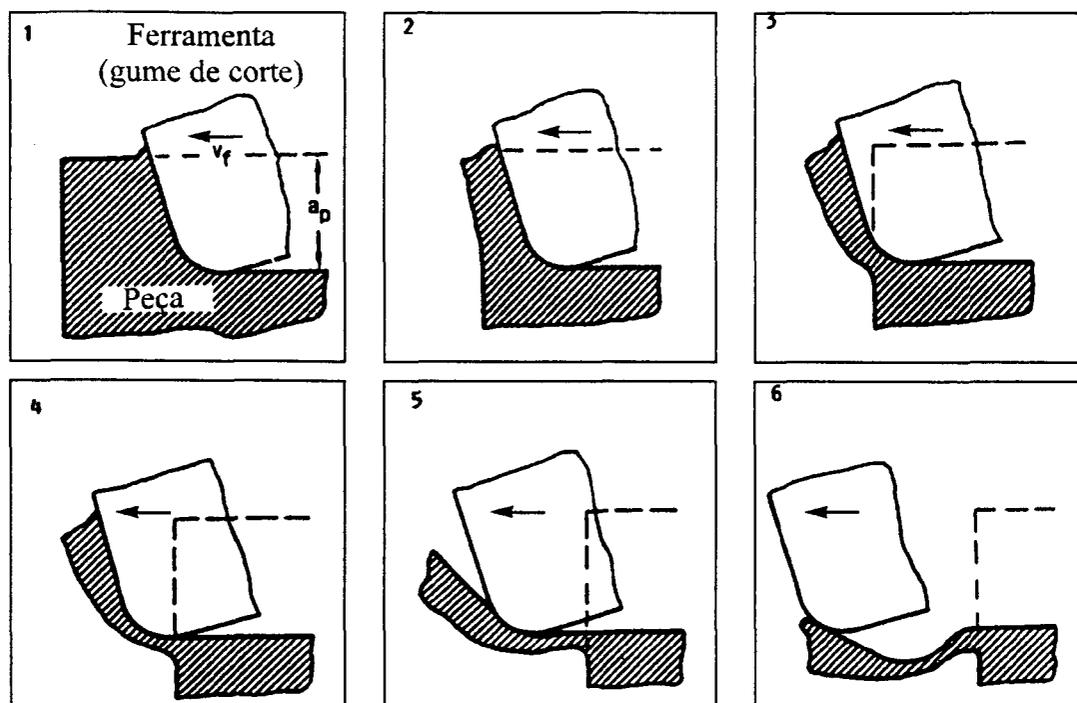


Figura 14 - Fases da formação da rebarba no torneamento [2].

Durante o processo de usinagem, o material é separado no plano de corte devido à força de corte. Uma condição para a remoção de uma rebarba é que as forças de avanço e passiva não consigam empurrar ou fletir o material. Observando-se as componentes da força de usinagem, verifica-se facilmente que as forças passivas e de avanço são as responsáveis pela formação de rebarbas, enquanto que a força de corte é responsável pela formação do cavaco. Através da penetração da cunha de corte, o material é deformado plasticamente na região de corte. Esta região de deformação depende primordialmente das características mecânicas do material da peça.

É possível formular as relações que ocorrem na formação das rebarbas. Com isso, e através de observações, verificou-se que a formação de rebarba no torneamento é favorecida por [2]:

- Uma boa capacidade de deformação da peça;
- Altas temperaturas na zona de cisalhamento, que melhoram a capacidade do material se deformar;
- Forças de usinagem grandes;
- Pequenas seções de corte nos cantos da peça.

2.10. Formação de Rebarba na Furação

2.10.1. Furação em Cheio

A furação e principalmente o mandrilamento tem uma formação de cavaco e rebarbas similar ao do torneamento. Na furação em cheio com brocas helicoidais deve-se diferenciar a formação de rebarbas para furos cegos e furos passantes.

Na furação em cheio o contato da ferramenta com a peça inicia pelo gume transversal. Em decorrência do ângulo de saída ser extremamente negativo na região do gume transversal, o material diante desta região da ferramenta é extrudado lateralmente, formando uma rebarba ascendente que é removida pelas partes cortantes do gume principal da broca. À medida que a ponta da broca penetra no material, uma pequena rebarba é empurrada lateralmente, até que a ferramenta atue com o diâmetro inteiro. Desta forma, verificamos uma rebarba na entrada da ferramenta, já que as quinas da broca não removem a mesma.

Ao contrário das rebarbas que ocorrem na entrada do furo, relativamente pequenas e fáceis de retirar, as rebarbas que ocorrem na saída do furo são bem mais desiguais, maiores e problemáticas [2,8,10]. A figura 15 mostra as principais fases de formação de rebarba na saída de um furo.

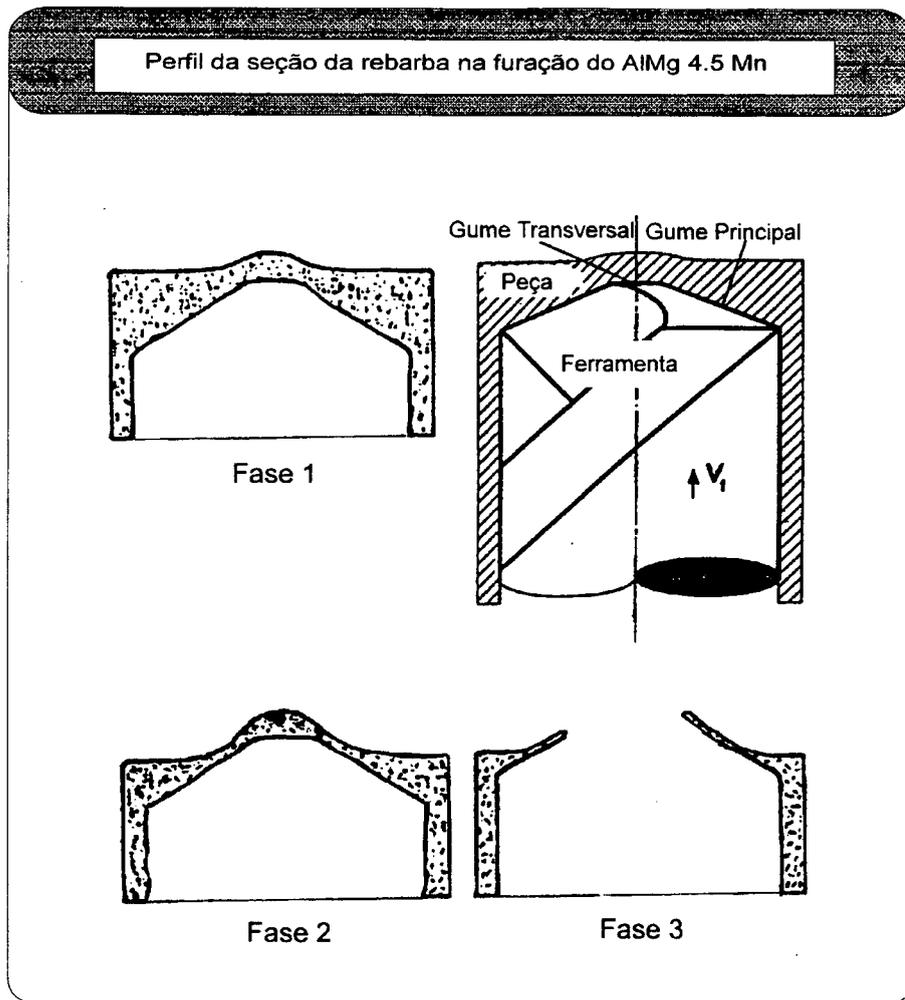


Figura 15 - Fases de formação de rebarba na furação em cheio na saída do furo [2].

Num furo passante, quando a broca se aproxima da saída, primeiramente ocorre uma deformação plástica na região dianteira da broca. Os cantos dos gumes da ferramenta ainda estão distantes da superfície inferior da peça, de forma que não ocorre deformação e o processo de usinagem transcorre normalmente.

Na saída da ferramenta, tão logo a capacidade de deformação do material da peça no centro do furo não seja mais suficiente, verificam-se trincas e a ponta da ferramenta sai. Logo após, o gume principal da ferramenta continua sua função e é destacada uma pequena tampa no centro do furo. Ao mesmo tempo, o material da peça restante nas laterais é deformado, formando

uma rebarba com tamanho e forma dependente das propriedades do material da peça e da geometria da ferramenta.

Na furação, o gume transversal tem apenas uma influência indireta sobre a formação de rebarbas. Predominantemente é a ação das quinas da ferramenta, cuja geometria e estado de desgaste devem ser cuidadosamente observados. Além disso, podem ocorrer forças de processo tão grandes devido aos parâmetros de usinagem, que a altura das rebarbas pode ser inclusive maior do que o raio do furo [2].

Existem algumas influências indiretas, como a energia térmica no processo de furação, que não podem ser desprezadas. O desgaste de quina tem também uma influência marcante, no sentido de favorecer o surgimento de rebarbas maiores e mais cedo.

Em função da cinemática do processo, a formação de rebarbas na furação ocorre na direção do avanço da ferramenta, ao contrário dos processos de fresamento, serramento e plainamento, nos quais as rebarbas ocorrem devido ao movimento de corte [2].

2.10.2. Furação com Pré-furo

Uma possibilidade muito usada para obtenção de furos mais precisos e com melhor acabamento é a furação em duas fases: pré furação e furação final. Como vantagens temos, forças de avanço menores e um processo de usinagem mais estável.

Observando sob o ponto de vista da redução de rebarba, a furação com pré-furo pode apresentar três possibilidades [2]:

1. A rebarba obtida na pré-furação é eliminada na furação final. Devido à menor área de corte (redução da profundidade de corte), surgirão menores forças de corte e conseqüentemente menores temperaturas: A rebarba que fica é menor.
2. A rebarba obtida na pré-furação é eliminada na furação final. Porém a menor área de corte na região das quinas da ferramenta não influencia em nada: A rebarba que fica corresponde à da furação em cheio.

3. A rebarba obtida na pré-furação não é eliminada na furação final. Esta rebarba, na saída da broca, será dobrada e permanecerá aderida à rebarba da furação final: A rebarba que fica é maior do que aquela obtida na furação em cheio. Este caso está esquematizado na figura 16.

Os resultados de experimentos práticos para muitos parâmetros de corte e relação de diâmetro tem confirmado o caso 3.

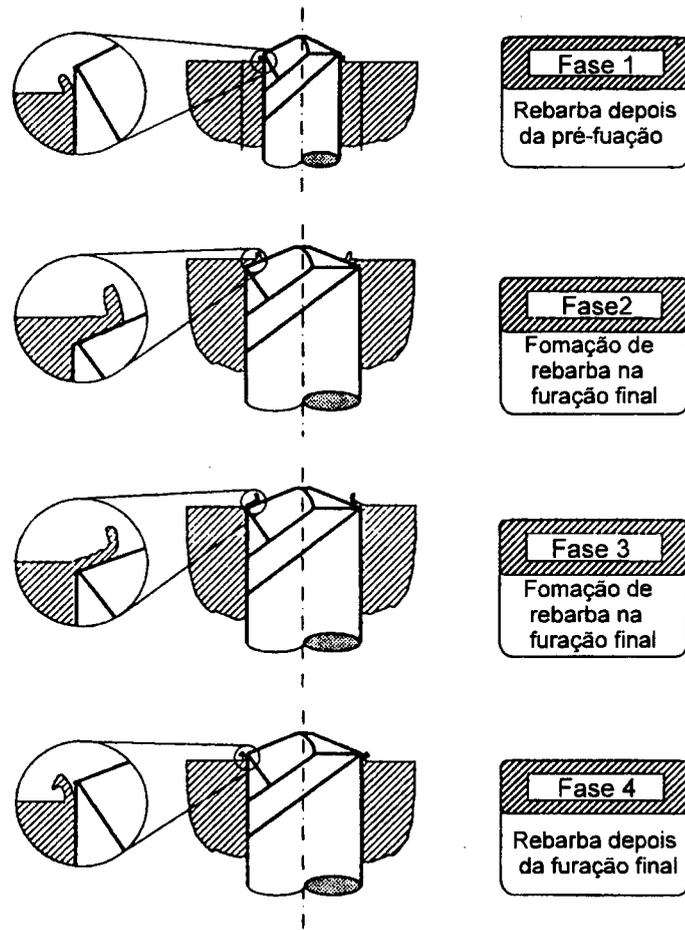


Figura 16 - Formação de rebarba na pré-furação e furação final.

2.10.3. Fatores que Contribuem para a Formação de Rebarbas na Furação

Antes que o processo de furação seja modificado com o intuito de reduzir ou eliminar a formação de rebarbas, devem ser determinados os fatores que mais contribuem para atingir este objetivo. Depois que as maiores contribuições são conhecidas, aí sim, elas podem ser examinadas mais profundamente, usando abordagens teóricas ou experimentais.

A figura 17 apresenta um resumo dos principais fatores que mais contribuem para a formação de rebarba na furação [8].

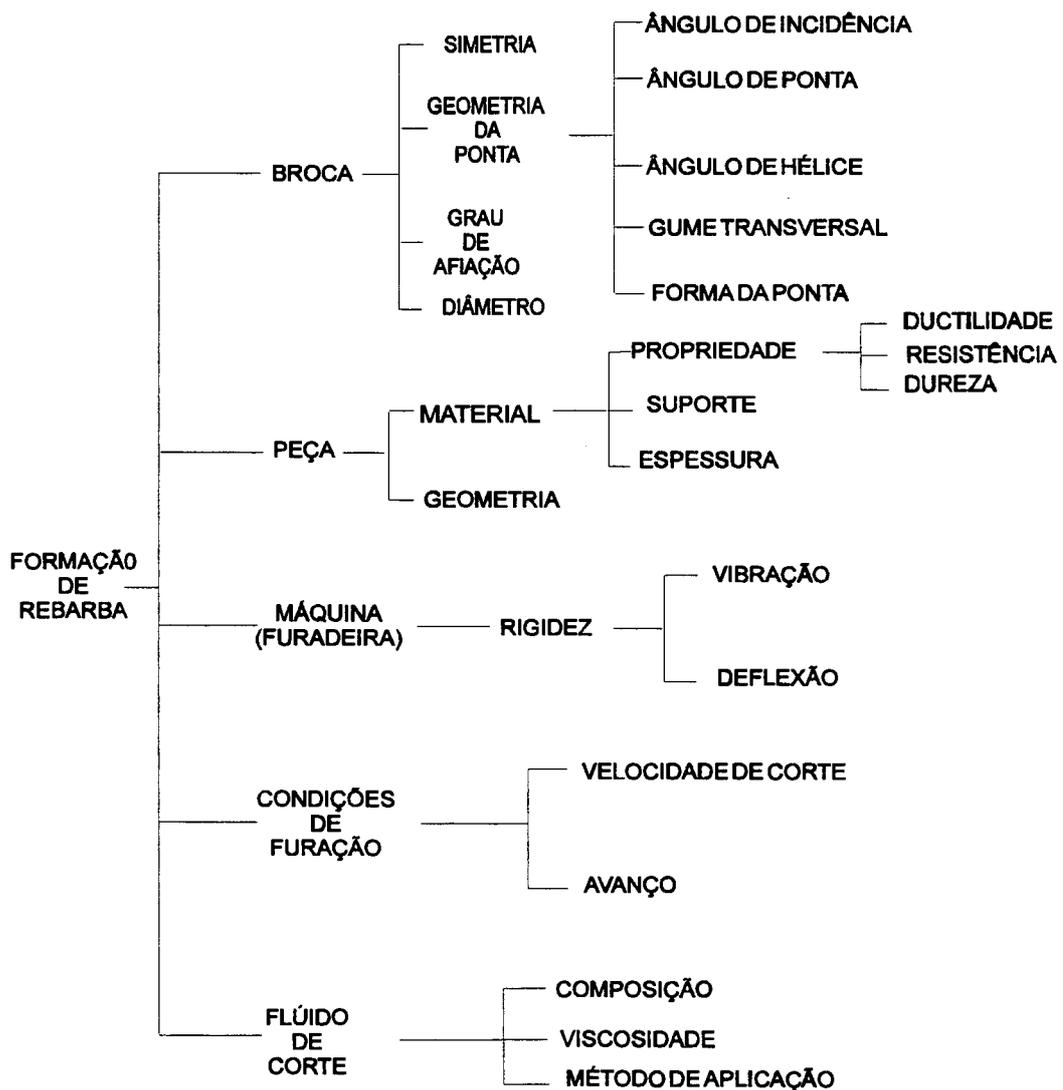


Figura 17 - Principais fatores que contribuem para a formação de rebarba na furação [8].

A forma da ponta da broca é um fator muito importante na formação de rebarba. Brocas com quinas arredondadas (radial-lip drill) produzem menos rebarba devido à existência de uma maior quantidade de material deixado como suporte da broca antes desta romper a peça na saída [8]. Assim, em vez do material ser empurrado para fora da peça formando a rebarba, como no caso da broca convencional, ele é cortado antes que isto aconteça.

A broca com ponta espiral (broca com ângulo de ponta maior do que 180° com uma pequena ponta no centro, usada para furação de chapa fina), também é muito eficaz na eliminação de rebarbas. Neste caso, a broca abrirá o furo da periferia para o centro. A parte periférica do gume, corta uma tampa do material em vez de deformá-lo e produzir a rebarba.

Investigações mostraram que o ângulo de incidência, sob condições de avanço constante, tem um efeito significativo sobre a espessura da rebarba. Devido a impossibilidade de se tirar conclusões sobre a altura da rebarba a partir da espessura, não é conhecido o efeito do ângulo de incidência sobre essa variável [8].

Existem numerosas combinações de ângulo de hélice, ângulo de ponta e avanços que produzem a mesma espessura de rebarba. É possível obter significantes reduções na espessura das rebarbas pela seleção correta destes parâmetros [10,15,16,17].

A espessura da rebarba na saída do furo, para o caso do aço AISI 1018, pode ser expressa pela seguinte equação, experimental [10]:

$$t = 6,797\delta^{-1,72}\sigma^{0,84}\alpha^{-0,36}f^{0,86} \quad (1)$$

Onde:

t = espessura da rebarba [mm]

δ = ângulo de hélice da broca

σ = ângulo de ponta da broca

α = ângulo de incidência da broca

f = avanço [mm/rot.].

Esta equação mostra que aumentando o ângulo de hélice e o ângulo de incidência a espessura da rebarba diminui. Diminuindo o ângulo de ponta e o avanço, também diminui a espessura da rebarba.

A espessura da rebarba também pode ser expressa em termos da rotação da broca, dureza do material da peça e da rigidez do sistema de furação pela seguinte equação, experimental [10]:

$$t = 7128N^{-0,783}B^{-0,998}K^{-0,007} \quad (2)$$

Onde:

t = espessura da rebarba [mm]

N = rotação da broca [rpm]

B = dureza do material da peça [Bhn]

K = rigidez do sistema de furação [N/m]

Esta equação mostra que aumentando a rotação da broca ou a dureza do material, a espessura da rebarba diminuirá. O sistema de rigidez, para este caso, teve um efeito insignificante.

Brocas com quinas chanfradas ou com dois ângulos de ponta, como as usadas para a furação de ferro fundido, podem ser usadas com o mesmo objetivo do caso das brocas com quinas arredondadas [10].

As propriedades do material da peça são mencionadas como sendo importantes fatores na formação de rebarbas. Materiais de alta ductilidade e baixo limite de escoamento tendem a ser mais susceptíveis à formação de rebarba [8,10,11,13]. Alguns pesquisadores concluíram que quando o conteúdo de silício no alumínio é aumentado, as rebarbas na saída do furo ficam mais frágeis e são, portanto, mais facilmente removidas [10].

Estudos sobre furação de chapas de alumínio mostraram que o aumento do diâmetro da broca acima de 6 mm tende a aumentar a altura da rebarba. Não foi comentado o efeito do diâmetro da broca sobre a espessura da rebarba [8].

O grau de afiação da broca é outra variável que tem bastante influência sobre o tamanho da rebarba na saída do furo. Brocas afiadas produzem relativamente pequenas rebarbas, enquanto que brocas cegas produzem grandes rebarbas. Uma explicação para isso é que brocas desgastadas aumentam a força de corte [8].

A composição, viscosidade e método de aplicação do fluido de corte afeta a fricção entre a ferramenta e a peça e a temperatura de trabalho na região do gume de corte [18,19]. Fluidos de corte com aditivos EP (Extrema Pressão) foram mencionados como redutores da espessura da rebarba acima de 55% comparado com a furação a seco do alumínio [8].

Adições de 20% de banha (gordura animal) ao fluido de corte produziram rebarbas mais curtas do que quantidades menores deste aditivo [10]. O uso de óleos solúveis (emulsões) comparado com nitrogênio líquido ou usinagem a seco reduziu o tamanho da rebarba [6]. Aplicações de fluido de corte sob pressão proporcionaram menores rebarbas [10].

A rigidez de uma furadeira é importante não somente para considerações de alinhamento e resistência, mas também porque a resposta dinâmica da estrutura pode contribuir para a formação de rebarba [8].

Quando a operação de furação transcorre normalmente, a força axial que atua sobre a broca produz uma deflexão na estrutura da máquina. Esta deflexão é tanto maior quanto menor for a rigidez. No momento em que a broca rompe a superfície de saída da peça, o material de suporte, ainda não cortado, existente na ponta da broca não tem resistência suficiente para manter a estrutura da máquina deformada, e a energia elástica absorvida por esta estrutura é devolvida a ferramenta (broca), ocasionando um aumento instantâneo do avanço. Este aumento no avanço pode acentuar o processo de formação de rebarba.

Também a flexão do suporte e da peça, deflexão da extremidade da árvore da furadeira, engrenagens folgadas ou vazamentos hidráulicos contribuem para o aumento das rebarbas [10].

Grande diferença no tamanho da rebarba pode ocorrer quando o avanço empregado é controlado manualmente. Neste caso o operador não pode controlar a intensidade da força aplicada no momento em que a broca rompe a peça na saída do furo.

O avanço é documentado como sendo um importante fator na formação de rebarba [2,8,10,13]. Pelo exame da equação de força [20] abaixo, podemos observar que esta aumenta com o aumento do avanço, e como a formação de rebarba está ligada a força de avanço [16,17], podemos concluir que grandes avanços produzem grandes rebarbas.

$$F_f = 1/2K_a.f.D \text{ Sen}(\sigma/2) \quad (3)$$

F_f representa a força de avanço (axial) em N, K_a , a pressão específica de corte em N/mm^2 , f , o avanço em $\text{mm}/\text{rot.}$, D , o diâmetro da broca em mm, e σ , o ângulo de ponta da broca.

A velocidade de corte não afeta apreciavelmente a altura ou espessura da rebarba para condições de avanço constante [8].

Brocas de aço rápido produzem menores rebarbas do que brocas de metal duro [6].

2.11. Formação de Rebarba na Retificação

Kawamura e Yamakawa [21] investigaram a formação de rebarba no processo de retificação dos aços de construção mecânica S45C (Ck 45), S55C (Ck 53), o aço ferramenta SK2 (C125W) bem como o aço inoxidável SUS304 (X5CrNi18 9). Neste estudo eles analisaram a influência da profundidade de corte, velocidade da peça, número de passes, direção de retificação, dureza do material da peça, e ângulo de canto da peça sobre o tamanho da rebarba. Todos estes testes foram efetuados sem o uso de fluido de corte. Nos itens seguintes (2.11.1, 2.11.2, 2.11.3 e 2.11.4) serão mostrados alguns resultados desta pesquisa.

Na retificação, quando o rebolo atinge o canto da peça deforma plasticamente o material aí localizado, formando a rebarba. Esta rebarba traz uma série de problemas para peça retificadas em virtude da alta precisão requerida nas bordas e quinas dessas peças.

As rebarbas na retificação foram classificadas, segundo a direção do corte, como rebarba na entrada (figura 18-a), rebarba lateral (figura 18-b) e rebarba na saída (figura 18-c). A rebarba na entrada é relativamente pequena comparada com a rebarba na saída e lateral. A rebarba na saída é caracterizada por possuir uma grande espessura da base, o que torna a sua remoção completa mais difícil, e a rebarba lateral possui um tamanho intermediário.

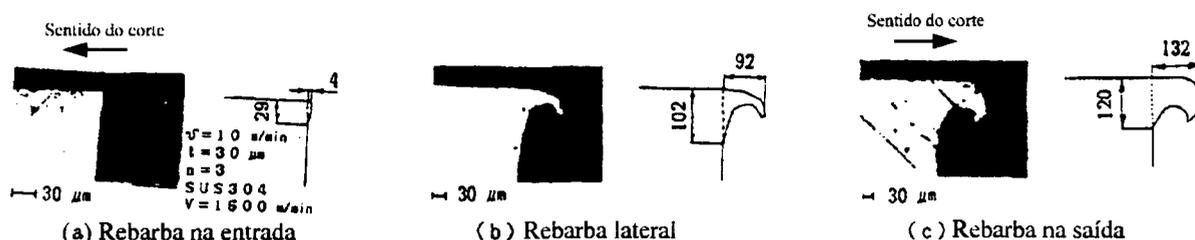


Figura 18 - Formação e designação de rebarba na retificação [21].

2.11.1. Influência do Número de Passes

A variação da espessura da rebarba para um material temperado, em função do número de passes, foi quase nula. No caso de material não temperado a tendência da espessura foi aumentar e aproximar-se de um valor constante.

A altura da rebarba aumenta proporcionalmente com o número de passes tanto para materiais temperados quanto para os não temperados. Portanto, o efeito da dureza do material tem maior importância para a espessura da rebarba, enquanto o número de passes tem mais influência sobre a altura da rebarba.

2.11.2. Efeito da Profundidade de Corte e da Velocidade da Peça

A forma e o tamanho da rebarba são afetados consideravelmente pelo valor e direção da força de retificação.

O efeito da profundidade de corte sobre a espessura da rebarba foi analisado para o aço SK2. Neste caso, a espessura apresenta uma tendência para um crescimento linear em função da profundidade de corte, quer para um material temperado ou não.

A espessura da rebarba para materiais temperados não é grandemente afetada pela profundidade de corte e pelo número de passes.

O efeito da velocidade da peça foi investigado para o aço S55C. Aqui, para uma baixa dureza do material, a espessura assume grandes valores e existe uma considerável tendência para esta aumentar com a velocidade. No entanto, a altura da rebarba, aparentemente, diminui quando a velocidade aumenta. Isto se deve ao curvamento do topo da rebarba e não significa uma verdadeira redução de sua altura.

2.11.3. Efeito da Dureza do Material da Peça

Aqui a variação de dureza foi conseguida por tratamento térmico do aço S55C.

O aumento do grau de endurecimento do material diminui consideravelmente a espessura da rebarba. No entanto, a altura é menos afetada pela dureza.

A profundidade da camada afetada na retificação de um aço temperado é menor do que para um aço de baixo teor de carbono, e não há dúvida que existe uma estreita relação entre a espessura da rebarba e a profundidade da camada afetada.

2.11.4. Efeito do Ângulo de Canto da Peça (ϕ)

Para investigar o efeito do ângulo de canto da peça (ϕ) foi usado o aço inoxidável SUS 304 com 6 ângulos de bordas variando de 30 a 165°.

A espessura da rebarba atinge valores superiores a 200 μm quando o ângulo de canto da peça é 30°, mas diminui rapidamente com o aumento deste ângulo. Quando $\phi = 165^\circ$, a espessura da rebarba varia de 0 a 3 μm .

A altura da rebarba é muito grande quando ϕ varia de 30 a 90°, enquanto que para $\phi > 90^\circ$ existe uma forte tendência para a altura diminuir rapidamente.

2.12. Estratégias e Métodos para Minimização e Prevenção de Rebarbas

Tanto a análise do mecanismo de formação de rebarbas quanto a verificação sistemática das grandezas de influência mostram que a formação de rebarbas não pode ser completamente evitada. Por outro lado, verifica-se que existem diversas possibilidades de reduzir as dimensões das rebarbas durante o processo de usinagem.

Esta redução é importante uma vez que os custos de remoção de rebarba são proporcionais ao seu tamanho. A prevenção, minimização e redução dos custos de remoção de rebarbas pode ocorrer, em resumo, da seguinte maneira [1,2,10,13]:

- Alterando as condições de corte (velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, etc.);
- Escolhendo uma geometria e material de ferramenta adequados;
- Projetando a peça de forma otimizada (geometria e material);

- Empregando processos de usinagem não convencionais;
- Usando material de apoio da saída do corte (Back-up materials);
- Alterando a rigidez da máquina;
- Minimizando as forças de corte;
- Alterando o tipo e/ou sequência de produção. A rebarbação pode, algumas vezes, ser feita em máquinas CNC, junto com outras operações;
- Planejando uma sequência de corte otimizada;
- Localizando as rebarbas em posições que facilitem a sua remoção;
- Utilizando condições de processo favoráveis (por exemplo emprego de fluido de corte).

Vale salientar que em algumas aplicações não é necessário a remoção da rebarba, desde que esta não atrapalhe a montagem e o posterior uso da peça.

Geralmente a escolha de condições de corte tem uma forte influência na formação de rebarbas em todos os processos de usinagem. Em função da combinação de material da peça e material de ferramenta, definem-se as condições de trabalho ótimas.

As condições de corte podem ser controladas de modo a minimizar o tamanho da rebarba. A relação da velocidade de corte com a formação da rebarba está ligada com a força de corte. Qualquer fator que reduza a força de corte, reduzirá também o tamanho da rebarba [1,13,15]. Considerando que a força de corte decresce quando a velocidade de corte aumenta, o aumento da velocidade diminuirá o tamanho da rebarba. Em alguns metais, quando se empregam velocidades de corte acima de 3000 m/min não se formam mais rebarbas [10].

No torneamento, verifica-se que a profundidade de corte (a_p) tem grande importância nas rebarbas formadas. Quanto maior a_p , maiores serão os valores esperados nas dimensões das rebarbas. Também o avanço influi de maneira semelhante, ou seja, incrementos do avanço levam a rebarbas maiores.

Com relação a velocidade de corte verifica-se um comportamento nem sempre análogo para os diversos materiais usinados. No entanto, existe uma tendência de ocorrer uma redução do tamanho das rebarbas para um aumento inicial da velocidade de corte, em função da diminuição das componentes da força de usinagem. Todavia, quando a velocidade de corte ultrapassa um

determinado valor, ocorre um aumento na capacidade de deformação do material da peça, o que contribui para aumentar o tamanho da rebarba. Este aumento no tamanho da rebarba, devido a maior deformação da peça, praticamente anula o efeito de redução da mesma ocasionado pelo decréscimo da força de corte verificado inicialmente [2].

Ao contrário do torneamento e fresamento, na furação com brocas helicoidais, a formação de rebarbas é fortemente influenciada pela geometria da ferramenta e pelos parâmetros de corte. Existe uma tendência muito forte para a redução das rebarbas com a diminuição do avanço e/ou aumento do ângulo de hélice.

No fresamento de topo, a grande variedade de forma das rebarbas produzidas nas diversas bordas da peça dificultam um pouco o entendimento dos efeitos da usinagem sobre o tamanho dessas rebarbas. Mesmo assim pode ser observado que avanços grandes reduzem a altura da rebarba em mais de 50%. Para uma fresa de disco convencional, a espessura da rebarba pode ser minimizada pela redução do avanço e usando um ângulo de hélice de 0° . Com fresa frontal, um avanço pequeno reduz a altura da rebarba no lado da peça aonde a ferramenta sai [1,10].

Diversos pesquisadores analisaram a influência da geometria de corte sobre o processo de usinagem. O objetivo destas pesquisas era a otimização da potência de corte, redução de forças na usinagem, melhoria da formação de cavaco e da qualidade superficial da peça.. Também se verifica a possibilidade de minimização da formação de rebarbas através de geometrias adequadas de ferramentas.

O ângulo de posição do gume (κ) atua no torneamento não apenas sobre o tempo de saída de corte, mas também sobre a relação entre a força de avanço e força passiva (F_f/F_p) e, com isto, sobre a direção de deformação do material da peça. Para alguns materiais, como certas ligas de alumínio, o aumento do ângulo de posição aumenta todas as dimensões das rebarbas. Já para outras ligas, como ferros fundidos, verifica-se uma mínima formação de rebarbas para um valor ótimo de κ (que deve ser determinado para cada caso). Em princípio, pode-se dizer que os ângulos de posição κ de valor baixo atuam positivamente sobre a redução na formação de rebarbas.

A influência do ângulo de saída γ , no torneamento e furação, se dá através de sua relação com a força de corte. Para ângulos de saída positivos existe a tendência de rebarbas menores em virtude das menores forças de corte e menores deformações na zona de formação de cavacos.

De uma maneira geral, uma diminuição do ângulo de saída e um aumento no raio de quina, aumenta a força de corte e conseqüentemente o tamanho da rebarba [1].

As recomendações a seguir ajudam a minimizar ou eliminar a formação de rebarbas no torneamento[10].

- Quando possível, usar ferramentas de forma para torneiar diâmetros. Não podem ocorrer rebarbas quando a ferramenta usinar diâmetros e superfícies adjacentes ao mesmo tempo;
- Quebrar todos os cantos com ferramenta de chanfrar;
- Gerar cantos arredondados em vez de retos ou agudos;
- Reduzir as forças de corte e o peso das peças para diminuir o diâmetro das rebarbas de corte (ver figura 7, item 2.5.2). O uso de ferramentas (bedames) afiadas e estreitas ajudam nisto;
- Evitar gumes postiços, aumentar o ângulo de saída da ferramenta, usar gumes afiados, minimizar o desgaste de flanco e trabalhar com pequena profundidade de corte, minimiza as rebarbas, uma vez que estes fatores reduzem a força de corte na usinagem de todos os materiais.

Na furação, a forma e a inclinação dos canais da broca determinam o tamanho do ângulo de saída γ . Este não é constante ao longo dos gumes, mas sim tem um valor grande na quina da ferramenta (encontro das parcelas cortantes dos gumes principais e dos gumes secundários) e vai diminuindo de valor em direção ao centro da broca, onde atinge valores negativos [2].

Como referência, é utilizado o valor do ângulo de saída lateral γ_f , que tem um valor idêntico ou próximo ao ângulo de inclinação de hélice δ . De maneira similar ao torneamento, a formação de rebarbas diminui com aumentos no ângulo de hélice δ .

Uma broca helicoidal também é identificada através do seu ângulo de ponta σ , que corresponde ao dobro do ângulo de posição κ . O ângulo de ponta σ de uma broca também influi na formação de rebarbas. Normalmente com ângulo de ponta σ pequenos resultam rebarbas

menores do que para ângulos de ponta grandes, principalmente em função da influência que este parâmetro geométrico tem sobre as componentes de força na usinagem [2,8].

Uma alternativa investigada para a redução das rebarbas na furação é a aplicação de vibração no sentido de avanço da broca.

Adachi [22] investigou este método usando vibração de baixa frequência. Aqui a broca vibra, na direção axial, na razão de 1 a 7 vezes em cada rotação da árvore com amplitude de vibração de 0.05 mm e avanço de 0,05 mm/rot.

Esta investigação mostrou que o tamanho da rebarba obtido pela furação vibratória de baixa frequência é geralmente muito menor do que o obtido pela furação convencional do alumínio e do aço, e que este método é mais eficiente quando a frequência de vibração por rotação da broca for igual a 1.

Uma outra pesquisa [23] desenvolvida neste campo, emprega vibração ultra-sônica na direção do avanço da broca. Os resultados desta investigação mostraram que a aplicação de vibração ultra-sônica é extremamente eficiente na prevenção de rebarbas, na saída do furo, no alumínio e no plástico reforçado com fibra de vidro.

A força de corte pode ser grandemente reduzida através deste método e quanto maior a amplitude de vibração ultra-sônica, mais enfatizada é a redução desta força e conseqüentemente o tamanho da rebarba. Os efeitos da vibração ultra-sônica, na furação, também são mais significantes quando são usadas brocas com quinas arredondadas (radial peripheral lip drill).

O tamanho da rebarba é influenciado pelo ângulo de canto da peça no lado aonde a ferramenta sai. Quando uma ferramenta usina uma peça cujo ângulo de canto é maior que 90°, pouca ou nenhuma rebarba se forma. Reciprocamente, quando o ângulo de canto da peça é pequeno, uma grande rebarba se forma porque não existe material de suporte para impedir a deformação plástica do material da peça. A figura 19 ilustra a influência do ângulo de canto da peça sobre o tamanho da rebarba para o caso do fresamento. Neste caso, não há presença de rebarba quando este ângulo é maior que 150° [10].

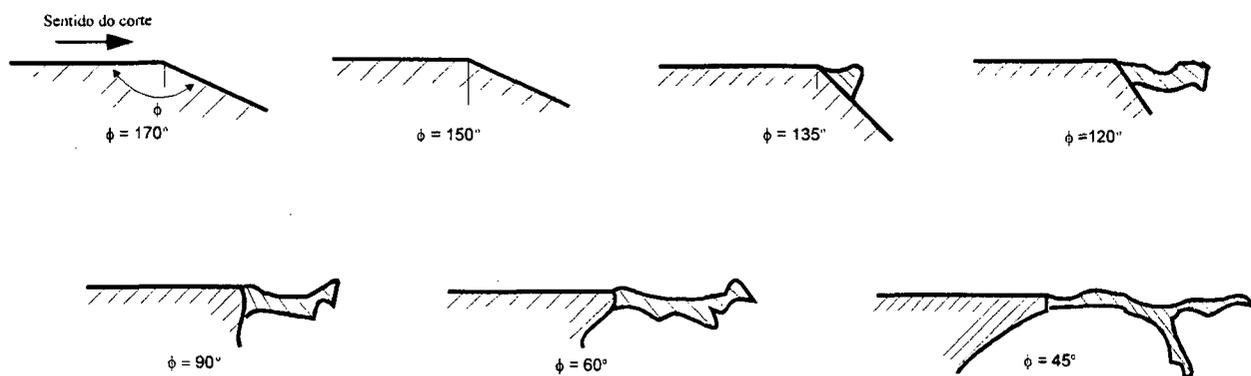


Figura 19 - Efeito do ângulo de canto da peça sobre o tamanho da rebarba no final do corte [10].

É possível controlar o tamanho da rebarba na furação, torneamento, retificação e outros processos, bem como no fresamento, pela especificação de um ângulo de canto da peça adequado. No caso da furação, isto pode ser feito escareando a saída do pré-furo antes da usinagem final, conforme ilustra a figura 20 [10].

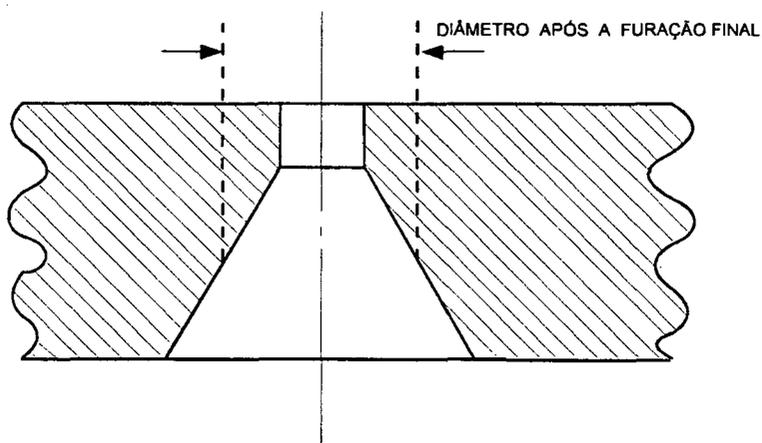


Figura 20 - Escareamento da saída do pré-furo para prevenir a formação de rebarba na furação.

Um princípio fundamental de todas as medidas para redução da formação de rebarbas durante o processo de usinagem é a diminuição da deformabilidade da peça, assim como a minimização do volume de material que, deformado, virá a ser uma rebarba.

Em estreita relação com as condições da saída de corte estão a forma e os detalhes de projeto dos cantos da peça. A especificação “Cantos Vivos e Livres de Rebarbas”, presente em muitos desenhos técnicos, mostra não apenas um paradoxo tecnológico, mas também leva a um processo produtivo caro devido a operações de fabricação e rebarbação dispendiosas.

As exigências feitas na fabricação de cantos de peças devem ser bem analisadas, não devem trazer operações adicionais apenas para redução de rebarbas ou prejudicar a função da peça.

No fresamento e na furação, as rebarbas nos cantos das peças podem ser reduzidas através da redução do material a ser usinado nestas regiões. Tais reduções podem ser atingidas pelos hoje existentes processos de conformação ou fundição de precisão, esquematizado na figura 21 [2].

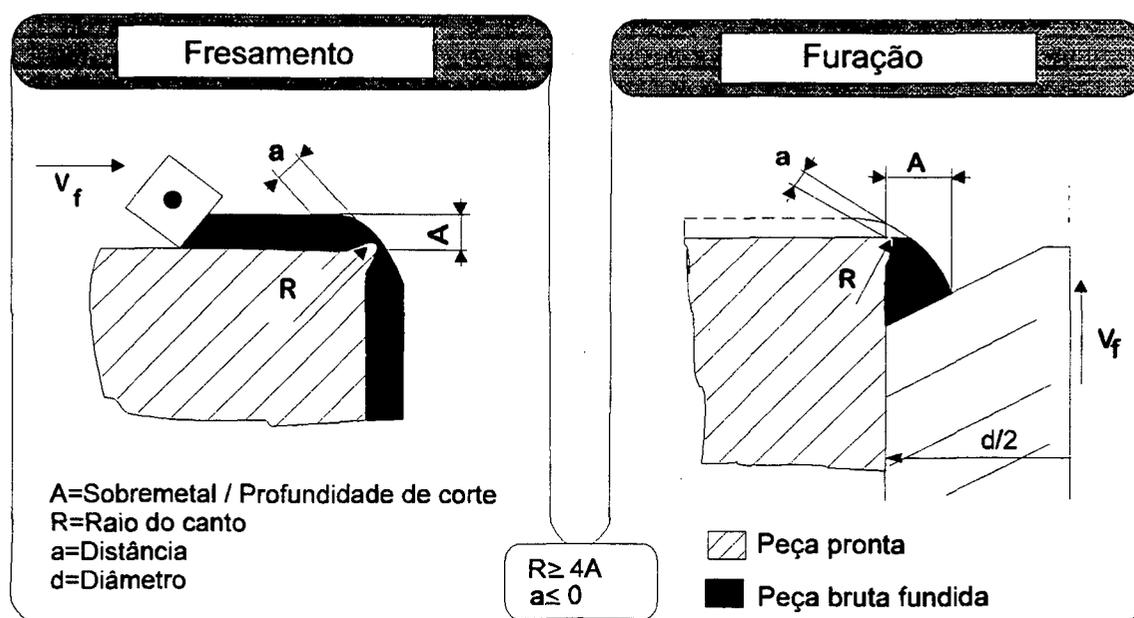


Figura 21 - Redução das rebarbas através da otimização dos cantos da peça bruta.

O material da peça, como comentado em outras partes desta trabalho, é um fator muito influente na formação de rebarba. Geralmente a rebarba em materiais frágeis ou são muito pequenas ou não se formam, porque estes materiais têm muito pouca capacidade de deformação plástica. Esta propriedade pode ser usada para minimizar ou eliminar rebarbas. Através de um tratamento de endurecimento localizado, pode-se fragilizar o material da peça apenas no local aonde a rebarba se formará. Um exemplo de um tratamento muito conhecido e que pode ser aplicada com esta finalidade é a têmpera por indução.

Sung-Lim [1] comenta sobre o uso de um revestimento a base de mercúrio para endurecer superficialmente o material da peça, melhorando a usinabilidade e reduzindo o tamanho das rebarbas. Segundo ele, isso pode ser feito pelo uso do mercúrio como fluido de corte (Cabe salientar que o mercúrio é extremamente prejudicial a saúde e que ele foi citado aqui apenas a título de informação e o seu uso não é recomendado sob hipótese alguma).

Uma outra maneira de aproveitar a propriedade de fragilidade de um material no que se refere ao combate à rebarba é pelo uso de um processo de banho de sal nitroso empregado para endurecer a superfície da peça juntamente com a rebarba, depois que esta é formada. Assim a rebarba mais frágil pode ser removida mais facilmente por uma variedade de processos [1].

O emprego de processos não convencionais de usinagem é uma alternativa que pode ser usada para prevenir a formação de rebarbas. Muitos desses processos não produzem rebarbas. A usinagem por descarga elétrica (Electrical Discharge Machining - EDM), usinagem por feixe de elétrons (Electron Beam Machining - EBM), e usinagem por feixe laser (Laser Beam Machining - LBM) são processos que produzem rebarbas parecidas com materiais refundidos [10].

Processos como usinagem química (Chemical Machining - CHM) retificação eletroquímica (Electrochemical Grinding - ECG), usinagem eletroquímica (Electrochemical Machining - ECM), brunimento eletroquímico (Electrochemical Honing - ECH), eletropolimento (Electropolishing - ELP), e usinagem por fluxo elétrico (Electrostream Machining - ESM) não só eliminam os custos com rebarbação, mas também produzem um excelente acabamento superficial e minimizam os problemas de caldeamento e brazagem.

A desvantagem do uso dos processos não convencionais de usinagem geralmente são o alto custo dos equipamentos, limitações para certas geometrias e materiais de peça, processamento lento, problemas de tolerância e integridade superficial da peça, bem como de despejo dos produtos de remoção (hidróxidos metálicos).

A rebarba enrolada (rollover), que é uma porção de material a qual é empurrada para fora da peça no final do corte, pode ser reduzida ou evitada, a partir da formação, pelo uso de um apoio em contato com a peça no final do corte, restringindo a deformação no plano de saída da peça. Ao invés da ferramenta, no final do corte, simplesmente sair da peça, deslocando o material da borda e formando a rebarba, ela continua a usinar o material que está em firme contato com esta. Neste caso o material que iria se transformar em rebarba é impedido de se deslocar e é cortado pela ferramenta.

Na furação isto é feito apoiando firmemente a peça sobre um bloco de metal no lado da saída da broca. A dureza deste material de apoio deve ser maior do que a dureza da peça [8].

Do ponto de vista prático, no entanto, esse material de apoio (back-up materials) somente ajuda a minimizar a rebarba e geralmente só é econômico quando os custos de rebarbação são muito altos [1,10].

A rebarbação pode, muitas vezes, ser feita na própria máquina ferramenta que usinou a peça. Por exemplo, numa máquina CNC pode-se ter uma ou mais ferramentas de rebarbação (escovas, rebolos, etc.) incorporada no magazine para fazer a remoção das rebarbas quando a usinagem for concluída.

Uma outra medida para a redução de rebarbas é a otimização da sequência de corte.

O objetivo da otimização de um processo de fabricação é, principalmente, o aumento da produtividade e da qualidade. Frequentemente isto diz respeito não apenas a uma etapa da fabricação, mas a toda a sequência de fabricação de uma peça. A figura 22 mostra um exemplo, para o torneamento, de algumas possibilidades de redução ou até eliminação de rebarbas com uma sequência adequada de corte.

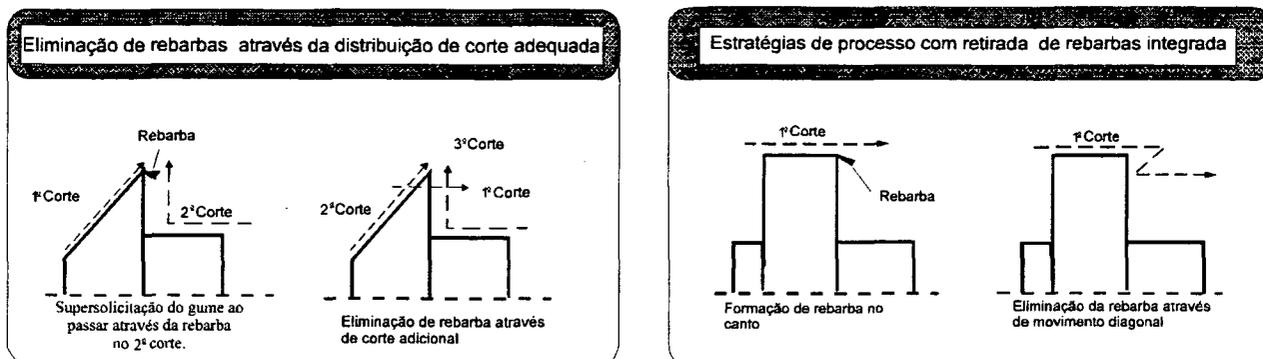


Figura 22 - Eliminação ou redução de rebarbas no torneamento.

A otimização da diminuição ou remoção de rebarbas na furação é um problema complexo que deve ser analisado com relação a diversos fatores e observando-se todas as possibilidades. Na figura 23 é mostrada uma sequência de análise para redução de rebarbas na furação [2].

A localização estratégica da rebarba na peça, após sua fabricação, é outro fator importante a ser considerado quando do planejamento da sequência de usinagem, visando a utilização futura de um método de rebarbação simplificado e barato. A localização de uma rebarba sobre uma borda acessível pode algumas vezes reduzir o custo de rebarbação em mais de 50%. A correta localização da rebarba pode permitir, por exemplo, a troca de uma rebarbação manual para outra mais econômica como a rebarbação vibratória [10].

Em algumas operações, a localização da rebarba pode ser controlada por uma simples alteração no programa CNC da máquina.

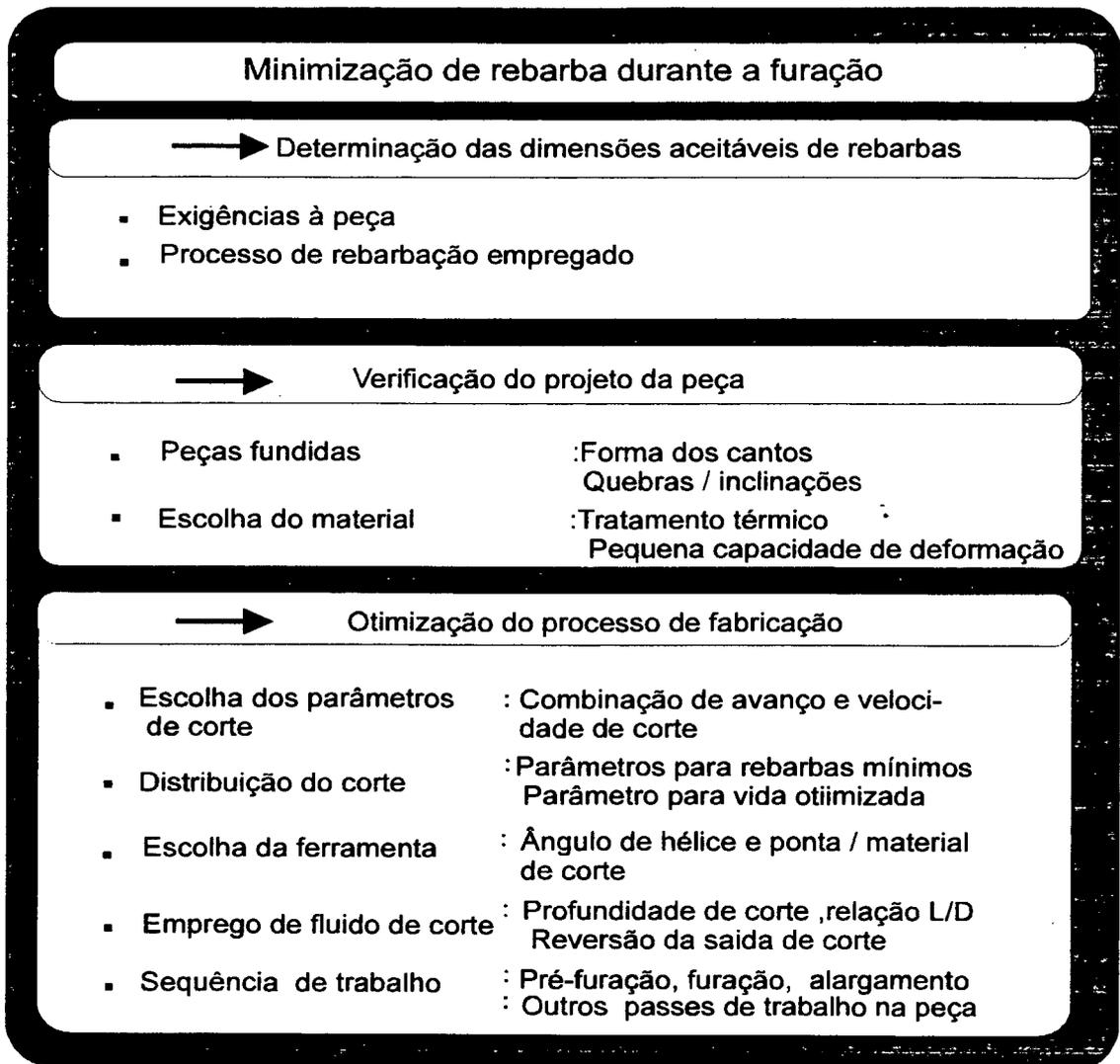


Figura 23 - Estratégia para redução de rebarbas na furação.

A figura 24 ilustra dois casos onde a rebarba pode ser localizada em um ponto mais acessível da peça pela escolha adequada da sequência de usinagem. No caso da engrenagem, a localização da rebarba sobre a face plana permite que a mesma seja facilmente removida por uma rápida operação abrasiva-manual ou automática. Algumas pequenas rebarbas remanescentes podem ser removidas, e as bordas arredondadas, por escovamento [10]. No exemplo da direita temos outro caso semelhante. Como as rebarbas maiores são, geralmente, formadas nos cantos da peça onde a ferramenta sai, a escolha adequada do sentido da trajetória de deslocamento da

ferramenta durante a usinagem pode deixar estas rebarbas localizadas em lugares estratégicos onde o acesso é mais fácil (por exemplo em superfícies planas ou menos complexas).

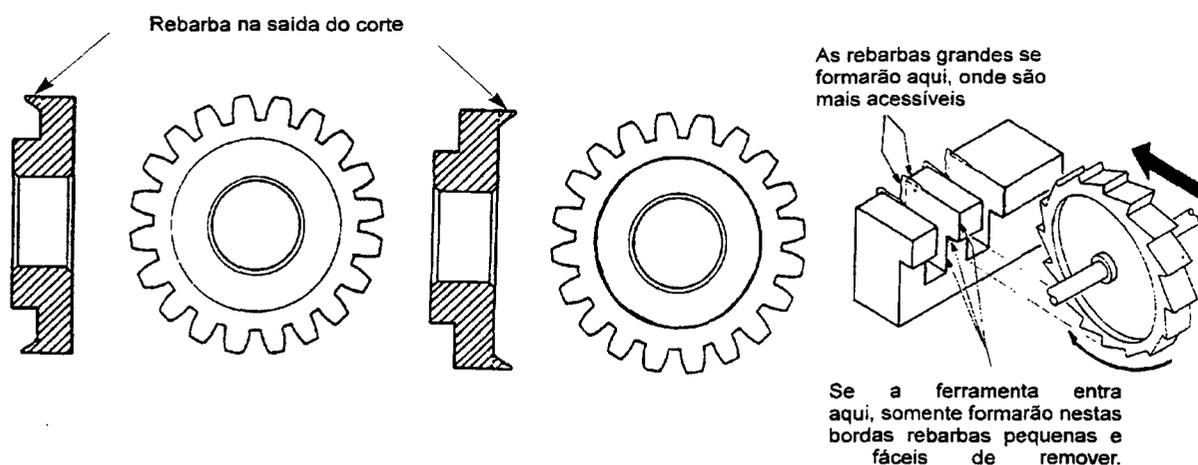


Figura 24 - Localização da rebarba em local de fácil acesso para facilitar a sua remoção.

O calor gerado na usinagem ocorre devido ao trabalho de deformação nas regiões de cisalhamento (80%), ao trabalho de separação na zona de separação (10%) e pelo trabalho de atrito nas zonas de contato da face e do flanco da ferramenta (10%).

Através do emprego de fluido de corte pode-se reduzir o desgaste da broca (guias), melhorar a qualidade superficial do furo, melhorar a saída de cavaco e garantir a refrigeração do sistema e da peça. Um pequeno aquecimento da peça pode trazer problemas de forma e dimensionais em peças complexas e com muitos furos.

A redução do desgaste com a utilização de fluido de corte nem sempre ocorre. A diminuição da temperatura do material da peça aumenta a sua resistência à deformação, aumentando também a força de corte e, conseqüentemente, a temperatura de contato. Isto leva a um aumento do desgaste da ferramenta. Como no contato a temperatura média da ferramenta

diminui, o colapso da ferramenta se dá para uma marca de desgaste maior, representando assim uma vida mais longa de ferramenta.

Os fluidos de corte são especialmente importantes no processo de furação, visto que o calor não é gerado apenas na região de corte, mas também através do atrito das guias no furo [2].

Em função das relações existentes entre o fluido de corte e as características do material usinado (temperatura, deformabilidade, etc.), pode-se esperar uma redução na formação de rebarbas através da refrigeração e redução do atrito na furação. Esta expectativa é realmente confirmada através de ensaios experimentais [8,2]. No entanto deve-se garantir que o fluido lubri-refrigerante atinja o fundo do furo.

Sofronas [8] investigou, na furação do aço AISI 1018, os efeitos do fluido de corte sobre o tamanho da rebarba e comparou com a usinagem a seco. Os resultados dos testes estão mostrados na figura 25. O óleo mineral sulfoclorado reduziu significativamente a média da altura e espessura da rebarba quando comparado com a furação a seco e outros fluidos de corte.

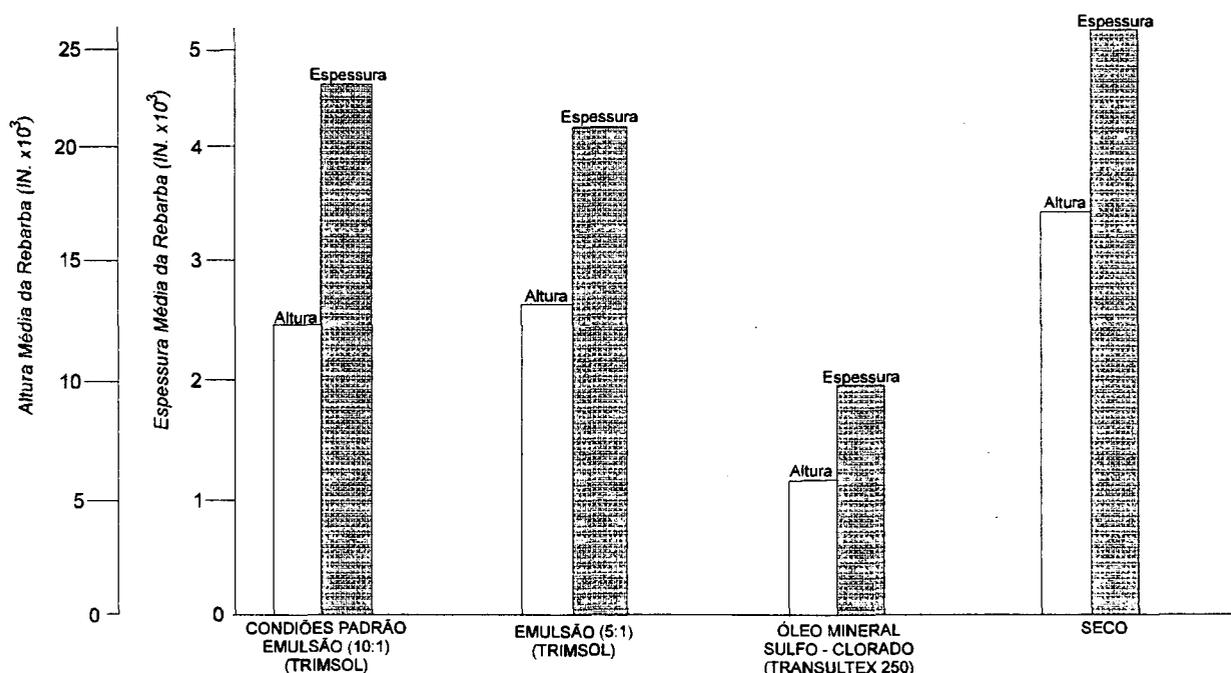


Figura 25 - Efeito do fluido de corte sobre a altura e espessura da rebarba na furação.

A redução do tamanho da rebarba pelo uso deste fluido de corte é explicado pela diminuição em 19% no torque e na força de furação ocasionada pela redução da força de fricção entre a ferramenta, cavaco e parede do furo.

Estes resultados mostram que a seleção de fluido de corte que reduza a força de corte, também reduzirá o tamanho da rebarba.

Informações adicionais sobre o efeito do fluido de corte na formação de rebarba na furação foram mencionadas no item 2.10.3 deste trabalho.

2.13. Processos de Rebarbação e Automação

O conceito de rebarbação é usado para todos os trabalhos e métodos utilizados para a remoção de rebarbas. Estes processos são normalizados pela norma DIN 8580. Pode-se separar estes processos em procedimentos através dos quais se objetiva a remoção de rebarba e outros onde a rebarbação ocorre como consequência [2].

Como as rebarbas são formadas em todas as operações de usinagem, é desejável que a sua remoção seja fácil e econômica. Para que o processo de rebarbação seja simples, como já mencionado, as rebarbas devem ser minimizadas de alguma maneira ou localizadas em algum ponto de fácil acesso pelo controle da sequência ou direção da operação.

Rebarbas curtas e finas podem ser removidas mais facilmente do que rebarbas longas e com espessura de base grande. A escolha adequada do método de rebarbação mais apropriado depende da característica física da rebarba e do requerimento de qualidade exigido da peça [24].

Gillespie fez um apanhado de um grande número de processos de rebarbação em mais de 2000 fontes de referência [25]. Os principais processos e mecanismos de rebarbação estão apresentados esquematicamente na figura 26. De acordo com o mecanismo de remoção, os processos são agrupados da seguinte forma:

- Processo de rebarbação abrasivo
- Processo de rebarbação mecânico
- Processo de rebarbação térmico
- Processo de rebarbação elétrico
- Processo de rebarbação químico



Figura 26 - Principais processos de rebarbação.

A rebarbação abrasiva pode ser vibratória, centrífuga ou por tamboreamento e é usada para a remoção de rebarbas de cantos externos de peças pela vibração ou rotação de um recipiente com um composto abrasivo, água e um meio auxiliar. As superfícies das peças resultam muito limpas, com cantos arredondados, entretanto só é empregada, eficientemente, para rebarbas e peças pequenas [2]. A figura 27 ilustra de forma simplificada os três processos de rebarbação abrasiva mais aplicados na indústria.

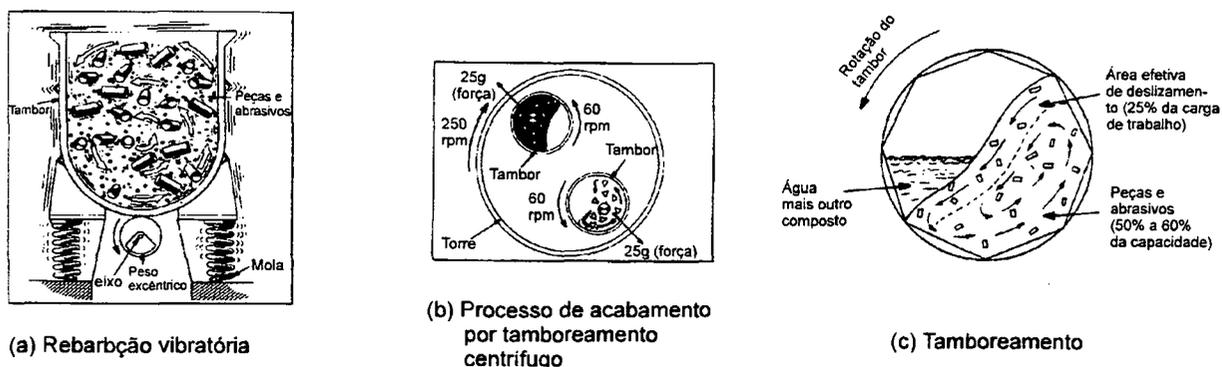


Figura 27 - Processos de rebarbação abrasiva mais comuns.

Um outro tipo de rebarbação abrasiva é a que usa um eixo rotativo onde a peça é fixada na extremidade do eixo e inserida em recipiente abrasivo contendo um composto abrasivo e água. O recipiente gira num sentido e o eixo com a(s) peça(s) em outro. Este processo é empregado para rebarbar peças rotativas como engrenagens, virabrequins, rotores de compressores, e componentes usinados cilíndricos. Uma variante deste processo usa um movimento alternativo do eixo (ou suporte da peça) em vez de rotação.

No processo de acabamento por fluxo, as peças são inseridas dentro de um tanque móvel com composto abrasivo. Este recipiente, juntamente com o composto abrasivo, movimentam-se num sentido e as peças no sentido oposto.

Um outro processo de rebarbação abrasiva, a lapidação por extrusão ou extrusão forçada, emprega uma pasta abrasiva, que pode ser de diamante, CBN, ou outro abrasivo qualquer, que é forçada a passar nos orifícios de difícil acesso e em contornos complexos. O movimento relativo entre os grãos e a peça permitem a retirada de rebarbas de pequenas dimensões [2,26,27,28,29,30].

Na rebarbação orbital ressonante (orboresonant), as peças são fixadas na extremidade de uma longa barra que oscila na sua frequência de ressonância, 75 a 100 Hz, em um tanque contendo um meio abrasivo solto.

Na rebarbação com jato abrasivo, um fluxo de partículas abrasivas de alta velocidade é dirigida sobre a rebarba até que ela seja desgastada ou removida [1,2]. Efeito semelhante é produzido por um jato de água de alta pressão [31].

Nos processos de rebarbação mecânicos, como o com escova de aço, rebarbação manual e mecanizado, a ferramenta retira a rebarba por ação do corte. Neste processo a rebarbação é feita somente ao longo da borda da peça na qual a rebarba está presente, ao passo que nos processos de rebarbação abrasiva, toda superfície externa da peça fica exposta a ação do abrasivo. Um rastro ao longo da borda da peça é a principal característica da rebarbação usando processos mecânicos automatizados. Uma desvantagem deste processo é o surgimento de pequenas rebarbas secundárias após a rebarbação.

Como rebarbação manual são classificados todos os processos nos quais a ferramenta, que também pode ser acionada eletricamente ou pneumáticamente, é operada manualmente para a retirada de rebarbas. Praticamente todos os problemas de rebarbação podem ser solucionados através de trabalho manual. A retirada das rebarbas ocorre principalmente com o auxílio de fresas, lixas, rebolos, escovas, rasquetes e limas.

A rebarbação manual é usada extensamente para peças complexas e pequeno volume de produção. Embora altamente versátil, a rebarbação manual é mais custosa e menos consistente [32].

Na rebarbação com escova, estas podem ser feitas de arame de aço ou fibra plástica recobertas com grãos abrasivos [33]. Devido à pouca rigidez das escovas, o escovamento é limitado somente para materiais moles ou para pequenas rebarbas. A rebarbação de pequenos furos (0,030", 0,040", ou 0,060") pode ser feita com microescovas de nylon empregada com um fino abrasivo de silicato de alumínio [34].

Pequenos rebolos abrasivos ou ferramentas de corte especiais são usadas para remover rebarbas em produção de grandes lotes.

A escolha da ferramenta adequada deve ser feita em função da geometria das peças, das propriedades dos materiais e dimensões das rebarbas [2].

Máquinas para rebarbação mecânica são projetadas para um produto específico, e máquinas CNC e robôs industriais são usados para rebarbação automática, possibilitando seguir a borda onde se encontra a rebarba, de qualquer tipo de peça.

As rebarbas podem ser fundidas por uma chama, plasma, ou cortadas, no caso de materiais plásticos, por um arame aquecido (hot wire heating). No processo de rebarbação elétrica, as rebarbas são fundidas por uma resistência elétrica ou por uma faísca entre um eletrodo e a rebarba.

Na rebarbação química, as peças são colocadas dentro de um tanque contendo um ácido com formação especial que ataca a rebarba e um pouco do metal da peça. Devido a essa perda de material onde não há rebarba este processo é geralmente usado somente para peças onde as rebarbas são finas.

A rebarbação eletroquímica usa água salgada e baixa voltagem para dissolver anodicamente rebarbas de peças metálicas. Em geral são necessário de 20 a 30 segundos para dissolver completamente todas as rebarbas de cantos internos e externos [35]. Uma variante deste processo usa esferas de grafite soltas como eletrodo [36].

Nos processos de rebarbação químico e eletroquímicos há a desvantagem da formação de elementos poluentes, e também a exigência de escolha confiável de diversos parâmetros de trabalho. Como vantagem temos o fato de poderem ser rebarbados todos os materiais metálicos condutores, independente de suas características mecânicas [2].

O mais conhecido processo térmico de rebarbação é o “Método de Rebarbação Térmica” (TEM). Esse processo de rebarbação universal é utilizado onde se espera grande flexibilidade. A principal vantagem do método é a possibilidade de rebarbação em partes internas de peças. O processo ocorre pela ignição de uma mistura de gases carburante e oxidante em uma câmara onde

estão as peças, sendo que as rebarbas são aquecidas a temperaturas muito altas (3000 °C), em um período de tempo muito pequeno (10 a 20 ms). A peça, em função de sua grande massa, não atinge temperaturas superiores a 160 °C.

Como efeito negativo dos processos de rebarbação, temos que quando estes são por abrasivos soltos, induzem tensões compressivas na peça. Estas tensões residuais podem acelerar a corrosão em certos ambientes.

A remoção de rebarbas resulta num chanfro ou raio mensurável no canto da peça. Devido muitos produtos terem um limite máximo ou mínimo para a quebra das bordas, o tamanho deste chanfro deve ser qualificado. Na maioria dos casos esse chanfro é tipicamente de 0,2 a 2 mm. Em muitas operações especifica-se um raio [37].

Partículas impregnadas na superfície da peça, na rebarbação com abrasivo solto, pode causar, entre outros, os seguintes problemas: reduzir a vida da ferramenta na usinagem, deficiência na aderência de revestimentos, soldas de má qualidade e redução da resistência à corrosão.

Considerando a natureza de cada processo de rebarbação e seus efeitos colaterais, a seleção de um processo adequado para uma dada condição tem dependido muito da experiência (Know-how), isto é, do conhecimento de uma variedade de pessoas com muita prática industrial [24]. Para fábricas integradas por computador um sistema hábil (expert) para a seleção do processo de acabamento mais apropriado deve ser desenvolvido e um banco de dados para vários processos de rebarbação deve ser estabelecido. Enquanto o objetivo de um sistema de manufatura é a construção do FMS (Flexible Manufacturing System) e FA (Factory Automation), os processos de acabamento e rebarbação não são, geralmente, automatizados e dependem muito de operações manuais. Portanto eles são, muitas vezes, o gargalo em sistemas de manufatura avançados [1].

O resultado de uma observação conduzida no Japão, revelou que a rebarbação foi a operação mais reprovada pelos operários.

Robôs industriais são componentes altamente importantes em sistemas de manufatura automatizados devido à boa repetibilidade e o grande grau de liberdade de movimento. Mas eles são menos precisos, comparados com máquinas CNC as quais são mais rígidas e precisas mas têm um menor número de eixo.

A rebarbação de peças fabricadas por processos de usinagem é, como a experiência mostra, um campo no qual podem ser empregados com sucesso robôs industriais [38].

Na aplicação de robôs industriais para rebarbação, existem vários problemas devido à natureza das rebarbas, irregularidade de formação e variação de dureza conforme o tipo de material. Portanto, as rebarbas devem ser classificadas. Rebarbas com espessura de raiz menor que 0.25 mm podem, por exemplo, serem removidas facilmente por escovamento, enquanto que rebarbas maiores requerem ferramentas rotativas, correias abrasivas ou rebolos. Todas essas ferramentas são adaptadas para robôs [39].

Embora vários esquemas de calibração possam ser usados para aumentar a precisão de robôs, esta fica limitada pela repetibilidade.

O problema da falta de precisão pode ser reduzida pela calibração ou pelo controle com retroalimentação (feedback) de força, mas nenhum dos dois fornece a performance requerida em muitas aplicações de rebarbação. Por esta razão, é necessário uma acomodação para os erros na ferramenta ou suporte da ferramenta. Isto pode ser implementado com uma compensação, ativa ou passiva, no suporte da ferramenta ou uma compensação natural da própria ferramenta.

Ferramentas flexíveis, como escovas de aço, têm uma compensação natural e podem acomodar o erro. Devido ou fato de não removerem rebarbas com a rapidez necessária, as ferramentas flexíveis ficam limitadas para rebarbas pequenas em materiais moles.

Ferramentas rígidas como limas rotativas e rebolos não tem esta compensação natural do erro e requerem um amortecimento na sua fixação para compensar as inexatidões.

Um suporte de ferramenta passivo pode ser conseguido geralmente com um sistema amortecedor-mola simples e barato.

Suporte de ferramenta ativos têm uma vantagem sobre um suporte passivo porque sua compensação pode ser alterada para diferentes materiais ou condições em que se apresenta a rebarba.

Um sistema ativo para ferramentas de rebarbação inclui controle de posição/força híbrido, impedância, visão e emissão acústica.

Atualmente está em grande desenvolvimento o processo de usinagem com Laser de alta potência. As vantagens da tecnologia do Laser na fabricação tem levado à sua aplicação também na rebarbação. Na maioria dos métodos de rebarbação descritos existe contato entre a ferramenta e a peça. Isto pode provocar perturbações como, danos materiais, desgaste da ferramenta e vibrações. Na usinagem a Laser não existe esse contato, a operação pode ser bastante flexível e peças complexas podem ser rebarbadas. Como desvantagem deste processo temos a formação de uma zona termicamente afetada, pela alta temperatura, de tamanho considerável [40,41].

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS PARA A COMPROVAÇÃO EXPERIMENTAL

3.1. Processo de Furação

3.1.1. Generalidades

Segundo a norma NBR - 6175 da ABNT, furação é o processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de um furo geralmente cilíndrico em uma peça, com o auxílio de uma ferramenta geralmente multicortante. Para tanto, a ferramenta ou a peça gira, e simultaneamente a ferramenta ou a peça se desloca segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo principal da máquina.

O processo de furação está incluído no grupo de processos de fabricação por remoção com gumes de geometria definida. Dentro dos processos produtivos, as ferramentas de furação ocupam um lugar de considerável importância, sendo sua parcela estimada em 20~25% [42].

A escolha deste processo de usinagem para este trabalho se deu em função da sua grande aplicação industrial, como citado anteriormente, e por ser uma operação onde a formação de rebarbas é muito crítica em termos de tamanho e localização.

Os furos realizados foram passantes e sem pré-furação (furação em cheio) e as rebarbas analisadas na saída do furo.

3.1.2. Terminologia das Brocas Helicoidais

As brocas helicoidais são as ferramentas que possuem maior significado na furação, sendo elas as principais ferramentas utilizadas para a fabricação de furos cilíndricos, pré-furados ou maciços [42].

De modo simplificado uma broca helicoidal compreende uma haste e uma parte cortante. Elas são classificadas de acordo com o tipo de material do qual são feitas, forma da haste, número de canais, sentido de corte, comprimento, diâmetro e geometria da ponta.

Os conceitos básicos e a nomenclatura das diversas partes das brocas helicoidais são definidas pela norma ABNT - NBR 6176 (DIN 1412): As principais características dessas ferramentas, segundo esta norma, estão apresentadas no anexo A.

3.2. Ferramentas Utilizadas nos Experimentos

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi escolhido a broca helicoidal de aço rápido com haste cilíndrica, diâmetro de 10 mm, hélice à direita e ângulo de ponta e hélice variáveis, conforme tabela 1.

Estas ferramentas foram fabricadas pela Indústria e Comércio Twill S.A, sob encomenda, uma vez que não existem disponíveis no comércio brocas com ângulos de hélices e ponta com os valores escolhidos para este experimento.

Os ângulos de ponta (σ) foram escolhidos a partir do valor 118° , que é o ângulo usado na maioria das brocas comerciais, tomando um valor abaixo, 100° , e outro acima, 135° .

Broca	Âng. de Hélice (δ)	Âng. de Ponta (σ)
A	25°	100°
B	25°	118°
C	25°	135°
D	35°	100°
E	35°	118°
F	35°	135°
G	45°	100°
H	45°	118°
I	45°	135°

Tabela 1 - Características das brocas helicoidais utilizadas nos experimentos.

Os ângulos de hélice (δ) foram escolhidos de forma que pudessem abranger uma larga faixa de utilização. Sendo assim foram selecionados inicialmente os ângulos 15, 25, 35 e 45°, mas por razões de ordem técnica (não disponibilidade pelo fabricante de máquina adequada) não foi possível fabricar as brocas com ângulos de hélice de 15°.

As características geométricas mencionadas foram checadas. Para isso foi empregado um microscópio medidor de brocas da GUEHRING modelo PG-100, 10x. Os resultados encontram-se no anexo B.

3.3. - Material Ensaiado

A escolha do material para ensaio foi feita a partir do conhecimento de que materiais dúcteis são extremamente favoráveis à formação de rebarba. Sendo assim, foi adotada a liga de alumínio 6063-O, recozida, na forma de chapa.

3.3.1. Composição [43]

O material submetido às operações de furação é a liga de alumínio 6063-O que apresenta a seguinte composição:

0,10% max. Cu
0,30% max. Fe
0,45 a 0,85% Mg
0,10% max. Mn
0,35 a 0,60% Si
0,10% max. Ti
0,03% max. Zn
0,10% max. Cr
0,05% max. outros (cada)
0,15% max. outros (total)
Restante de alumínio

3.3.2. Propriedades Mecânicas [43]

Resistência à tração - 90 MPa

Limite de escoamento - 50 MPa

Dureza Brinell - 25 HB

Resistência ao cisalhamento - 70 MPa

3.3.3. Corpos de Prova

Os corpos de prova utilizados nos ensaios tem dimensões conforme a figura 28, de maneira a permitir sua fixação em dispositivo adaptado para os ensaios.

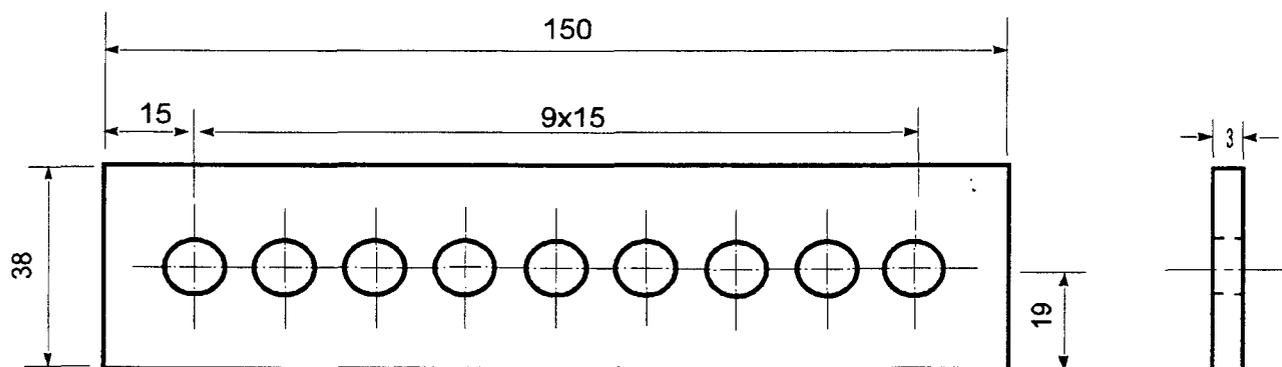


Figura 28 - Dimensões dos corpos de Prova.

3.4 Dispositivo para Fixação dos Corpos de Prova

Para a fixação dos corpos de prova na mesa da furadeira foi usado o dispositivo mostrado na figura 29.

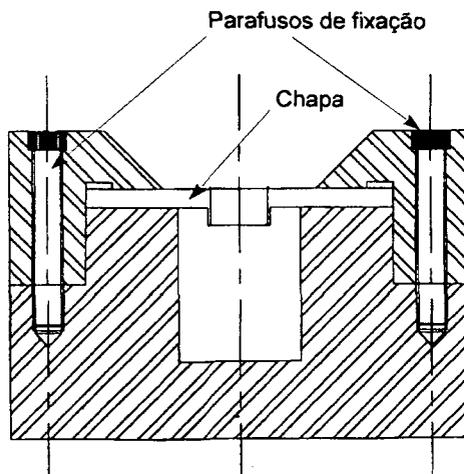


Figura 29 - Dispositivo para fixação dos corpos de prova.

3.5. Máquina-ferramenta

A máquina ferramenta utilizada nos ensaios é uma furadeira radial Csepel Rfh 75/1500, disponível no Laboratório de Usinagem e Comando Numérico da UFSC (USICON). Esta furadeira permite uma rotação máxima da árvore de 1900 rpm, sendo as rotações escalonadas segundo a série R 10, nas seguintes vinte e uma rotações:

19 - 23,6 - 30 - 37,5 - 47,5 - 60 - 75 - 95 - 118 - 150 - 190
236 - 300 - 375 - 475 - 600 - 750 - 950 - 1180 - 1500 - 1900.

As velocidades de avanço da árvore não obedecem com rigor a uma série geométrica e podem ser reguladas escalonadamente, segundo os seguintes valores (em mm/rot):

0,047 - 0,063 - 0,094 - 0,125 - 0,187 - 0,25 - 0,375 - 0,5 - 0,75 - 1 - 1,5 - 2.

Como característica da máquina-ferramenta empregada pode-se citar a sua flexibilidade, rigidez e facilidade de operação.

3.6. Medição das Rebarbas

De acordo com a literatura, as grandezas mais usadas para representar o tamanho de uma rebarba são sua altura e espessura.

Desenvolveu-se uma metodologia para fazer a medição das rebarbas com os recursos instrumentais disponíveis: neste trabalho o microscópio óptico.

Devido à variação de forma e tamanho das rebarbas produzidas nos ensaios, do formato dos corpos de prova, e por questão de praticidade, foi necessário usar também outros instrumentos para a medição das rebarbas como: relógio comparador e paquímetro.

Outro método utilizado para quantificar as rebarbas produzidas nos ensaios foi a avaliação através de seu peso. Para isso foi usada uma balança de precisão para a medição do peso dos cavacos coletados. A partir do peso do cavaco e da densidade do material chega-se ao peso da rebarba.

Para a medição das dimensões e peso das rebarbas e do diâmetro dos furos foram utilizados os instrumentos com as características a seguir.

3.6.1. Microscópio Ótico de Medição

O microscópio ótico foi empregado para a medição da espessura das rebarbas. O aparelho usado possui as seguintes características:

Fabricante: Nikon

Aumento: 30 X

Resolução do deslocamento da mesa: X: 0,001 mm ; Y: 0,001 mm.

3.6.2. Relógio Comparador

O relógio comparador foi usado para a medição da altura das rebarbas. As características do relógio comparador utilizado são:

Fabricante: Mitutoyo

Resolução: 0,01 mm

Faixa de medição: 0 - 10 mm

3.6.3. Paquímetro

O paquímetro foi usado, em alguns casos, para medir a espessura das rebarbas. O instrumento utilizado possui as seguintes características:

Fabricante: Mitutoyo

Resolução: 0,02 mm

Faixa de medição: 0 - 150 mm

3.6.4. Balança de Precisão

A balança utilizada para a medição do peso dos cavacos apresenta as características a seguir.

Fabricante: Sartorius

Modelo: 2842

Resolução: 0,1 mg

Carga máxima: 160 g

3.6.5. Micrômetro Interno

O micrômetro interno de duas pontas foi usado para medir o diâmetro dos furos. O instrumento empregado apresenta as seguintes características:

Fabricante: Mitutoyo

Resolução: 0,01 mm

Faixa de medição: 5 - 30 mm

3.7. Determinação das Variáveis do Processo

São denominados de variáveis do processo a velocidade de corte (V_c), o avanço (f), a profundidade de corte (a_p) (para a furação a profundidade de corte é igual à metade do diâmetro da broca), o ângulo de ponta (σ) e o ângulo de hélice (δ). Todos os experimentos foram realizados sem o uso de fluido de corte, isto é, furação a seco.

A escolha destes parâmetros de corte e geometria foi feita a partir da revisão bibliográfica observando-se quais as grandezas que mais tinham influência sobre a formação de rebarba e que ao mesmo tempo estivessem ao alcance, para uma investigação experimental, em termos de recursos materiais, ferramenta, equipamentos, etc. Baseado nestes requisitos, as variáveis acima foram selecionadas.

3.7.1. Velocidade de Corte

A velocidade de corte não apresenta uma influência marcante sobre a formação de rebarbas na faixa de velocidades estudada, comparada com as demais variáveis. Portanto, resolveu-se adotar um valor constante de velocidade de corte para todos os experimentos.

Esta velocidade foi escolhida em função da operação de usinagem (furação), do material da peça, das características da ferramenta, e da disponibilidade na máquina.

Partindo da rotação 750 rpm obteve-se a velocidade de corte de **23,56 m/min.**

3.7.2. Avanços

O avanço é o percurso deslocado pela broca em cada rotação. O avanço é a variável com a maior influência sobre a formação de rebarbas.

A seleção dos avanços foram feitas baseado em livros [43] e catálogos [44] onde, segundo estes, é recomendado valores em torno de 0,25 mm/rot. para a furação do alumínio com brocas de aço rápido de 10 mm de diâmetro. A partir deste valor de referência, estabeleceu-se uma série de avanços, menores e maiores, de modo que possa ser analisado a influência desta variável sobre o resultado de trabalho.

De acordo com a máquina e as recomendações empregou-se os seguintes avanços:

0,047 - 0,125 - 0,25 - 0,5 mm/rot.

3.7.3. Profundidade de Corte

A profundidade de corte na furação em cheio é dada pelo raio da broca. Nos experimentos foram utilizadas brocas com 10 mm de diâmetro, e portanto uma profundidade de corte constante de 5,0 mm.

3.7.4. Ângulo de Ponta (σ)

O ângulo de ponta tem uma influência sobre a direção da força de usinagem, e assim é uma variável bastante influente na formação de rebarba. A sua seleção foi feita, como comentado no item 3.2, a partir do valor padrão para brocas helicoidais que é 118°. Baseado neste ângulo, foram selecionados um valor abaixo, 100°, e outro acima 135° (figura 30). Este último foi escolhido pelo fato de também serem utilizados em algumas tipos de brocas helicoidais (Brocas helicoidais tipo W).

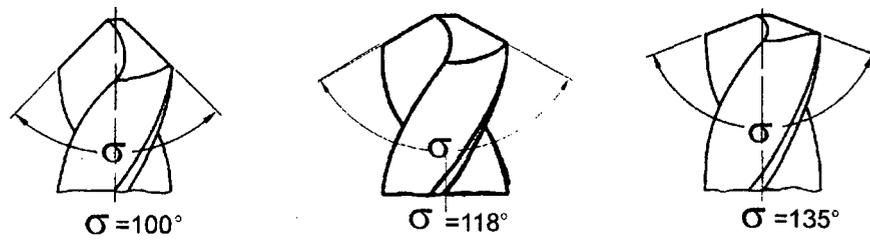


Figura 30 - Ângulos de ponta das brocas utilizadas nos experimentos.

3.7.5. Ângulo de Hélice (δ)

Depois do avanço, a variável que mais é citada como influente na formação de rebarba é o ângulo de hélice da broca. Dois dos valores selecionados foram escolhidos próximos do extremo inferior e superior possível de ser usinados (fabricados) pelas máquinas do fabricante das brocas. O terceiro foi adotado um valor intermediário.

Os valores selecionados para os ângulos de hélice foram: 25°, 35° e 45° (figura 31).

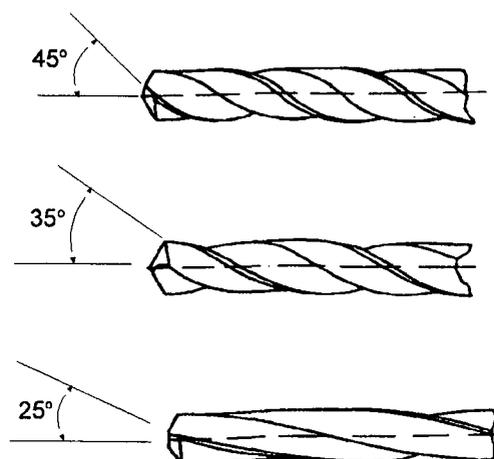


Figura 31 - Ângulos de hélice das brocas utilizadas nos experimentos.

3.8. Parâmetros Escolhidos para Análise dos Experimentos

3.8.1. Tamanho da Rebarba

O tamanho da rebarba é entendido aqui como a medida de sua altura e espessura. A especificação destas dimensões estão representadas na figura 3, item 2.4.

3.8.2. Peso da Rebarba

A avaliação da rebarba pelo peso foi usado como método alternativo. O peso da rebarba foi encontrado a partir do peso do cavaco, da densidade do material e das dimensões do furo.

3.8.3. Forma da Rebarba

Além das dimensões, uma característica muito importante para representar uma rebarba é a forma ou maneira de como ela se apresenta.

Shikata [45] classificou quatro tipos de rebarba na furação de chapa na saída do furo. Devido à grande semelhança dos tipos de rebarbas classificadas por Shikata com as encontradas neste trabalho, a mesma será adotada aqui para informar o tipo de rebarba detectada para cada condição de corte e geometria de broca utilizada.

A classificação das rebarbas segundo a sua forma está representado na figura 32.

A rebarba tipo I possui tanto altura como espessura grandes. Esta grande espessura faz com que este tipo de rebarba seja muito resistente e conseqüentemente difícil de remover. Sua altura é bastante uniforme comparada com os outros tipos de rebarbas. O seu topo apresenta um aspecto semelhante a um dentilhado de serra com picos e vales.

A rebarba tipo II apresenta duas partes: uma parte fixa aderida firmemente à peça, com altura e espessura mais ou menos uniforme, e uma parte secundária (uma tampa em forma de um chapéu cônico). Esta tampa pode ficar ou não aderida na parte primária da rebarba que está presa à peça, ou seja, é um cavaco/rebarba.

A rebarba tipo III é uma rebarba muito irregular, com altura muito variável. Possui uma espessura muito fina, o que a torna facilmente removível.

A rebarba tipo IV, é uma rebarba onde o seu volume de material é muito pequeno. Apresenta em alguma parte da borda do furo uma ou mais projeções que com um simples toque pode se soltar. Nas demais regiões da borda do furo ela se apresenta com uma altura regular e muito pequena.

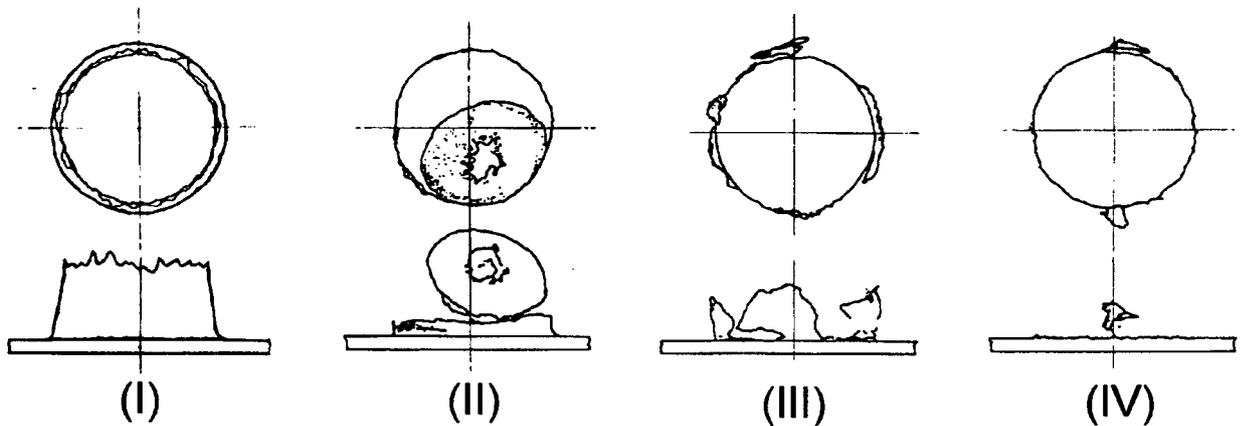


Figura 32 - Representação dos tipos de rebarbas observadas.

CAPÍTULO 4

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova para os ensaios foram confeccionados a partir de uma chapa de alumínio 6063 com espessura de 3 mm.

Os corpos de prova foram cortados conforme mostrado na figura 28, item 3.3.3, e lixados num dos lados com lixa d'água. O lixamento visa melhorar o acabamento superficial para que nenhuma marca ou risco mais profundo interfira na forma final da rebarba produzida ou dificulte a análise posterior da mesma.

Após lixados, os corpos de prova foram marcados no lado de entrada da broca (lado oposto a superfície lixada).

Cada corpo de prova foi identificado com um número antecedido da palavra CHAPA, com o tipo (geometria) de broca empregada, e o local de cada furo também recebeu uma numeração de 1 a 9, como mostra a figura 33.

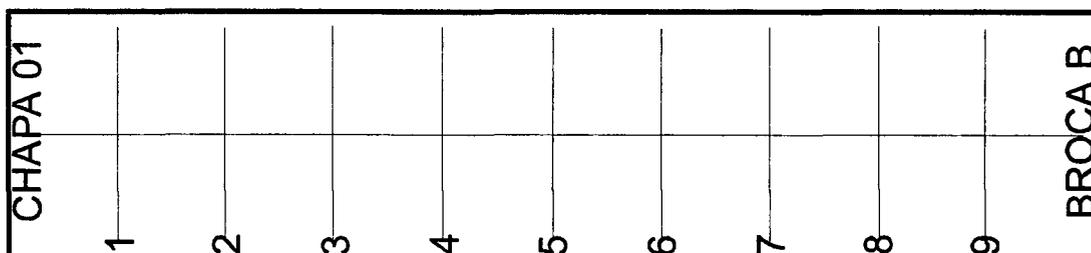


Figura 33 - Exemplo de identificação dos corpos de prova.

4.2. Preparação e Realização dos Ensaios

Os ensaios foram realizados em uma furadeira radial cujas características encontram-se no item 3.5. Aferições feitas nesta máquina mostraram que os avanços não apresentaram qualquer divergência com relação aos valores nominais [46].

Antes de iniciar os ensaios, foi feita uma averiguação da máquina visando a detecção de algum defeito que por ventura existisse.

Para fixar os corpos de prova na máquina ferramenta foi montada uma morsa na mesa da furadeira provida de um dispositivo utilizado para prender os corpos de prova.

Durante os ensaios foram coletados todos os cavacos para sua posterior pesagem. Para que esta coleta fosse feita sem perda nenhuma ou mínima, o corpo de prova juntamente com o seu dispositivo de fixação foram colocados dentro de um saco plástico, com dimensões adequadas, e em seguida preso na morsa.

Após o ajuste da velocidade do ensaio e da seleção do avanço, a ponta da broca era aproximada manualmente do corpo de prova e a boca do saco plástico fechada em contato com o mangote da máquina, acima do mandril de fixação da broca; de forma que toda a operação de furação se realizava dentro do saco plástico, isto é, ferramenta e peça trabalhavam confinados dentro do saco plástico.

Terminada a operação de furação a broca era recuada manualmente, a boca do saco desamarrada e algum cavaco que ficava aderido na broca era removido com um pincel para dentro do saco plástico. Com o mesmo pincel era feita a coleta de todos os cavacos aderidos no corpo de prova e no seu dispositivo de fixação de modo que todas as partículas de material (cavacos) ficassem dentro do saco plástico. Este mesmo pincel era passado sobre a rebarba. O que soltava-se era considerado cavaco e o que ficava aderido no corpo de prova era considerado rebarba.

Ao final destes procedimentos, todos os dados do ensaio (avanço, broca usada, identificação do corpo de prova e do furo) eram anotados e colocados dentro do saco juntamente com os cavacos.

Este procedimento para coleta de cavaco foi feito individualmente para cada furo executado.

4.2.1. Determinação do Número de Repetições

É sabido que quanto maior o número de repetições executadas por determinado experimento (igualdade de condições), maior a confiabilidade nos resultados obtidos. Por outro lado, um número muito grande de repetições exige muito mais tempo e maiores gastos.

A determinação do número de repetições adotada para cada experimento, de modo a produzir um resultado com boa confiabilidade, foi feita a partir de ensaios preliminares onde se pôde constatar uma boa repetibilidade na forma e nas dimensões das rebarbas produzidas para as mesmas condições de geometria de ferramenta e avanço.

Baseado nestes fatos foi adotado o número de 3 (três) repetições para cada situação de ensaio, o que satisfaz as necessidades deste estudo.

Os resultados finais serão os valores médios obtidos destas repetições.

4.2.2. Metodologia para a Determinação do Peso das Rebarbas

4.2.2.1 Pesagem dos Cavacos

Teoricamente na execução de um furo em uma chapa, o peso dos cavacos equivale ao peso do material do furo. Como parte do material do furo se apresenta como uma rebarba, tanto na parte

inferior como também na superior da chapa, o peso dos cavacos teórico menos o real equivale ao peso da rebarba.

A pesagem dos cavacos coletados de cada furo separado foi feita numa balança de alta precisão cuja características se encontram no item 3.6.4 deste trabalho.

Os cavacos eram transferidos diretamente do saco plástico, onde foram coletados, para o prato da balança; feita a leitura do peso através de um visor e anotado valor do peso na ficha que acompanhava cada coleta de cavaco. Em seguida os cavacos eram colocados de volta no seu saco plástico e o prato da balança limpo com um pincel para que não ficasse nenhum resíduo que pudesse influenciar na pesagem seguinte.

Este procedimento foi repetido para todos os cavacos coletados e a cada três medições era checado a tara da balança.

4.2.2.2. Determinação da Densidade do Material

A densidade do alumínio utilizado dos experimentos foi determinada a partir do volume e do peso de pequenas amostras deste material. Estas amostras foram cortadas na forma retangular e suas dimensões e peso medidos, conforme a tabela 2. Para a medição das dimensões e do peso foram utilizado o paquímetro e a balança, respectivamente, cuja características estão no capítulo 3 deste trabalho. O volume de cada amostra pôde ser determinado pelo produto de suas três dimensões e a densidade calculada dividindo-se o peso (massa) por este volume.

Foi encontrado o valor $2,640 \text{ g/cm}^3$ para a densidade do material determinada pela média da densidade de seis amostras.

Amostra	Peso [g]	Dimensões [mm]	Volume [mm ³]	Densidade [Kg/m ³]
1	2,5194	3,02 x 15,95 x 19,95	960,972	$2,622 \times 10^{-3}$
2	3,4796	3,02 x 18,80 x 23,25	1320,042	$2,636 \times 10^{-3}$
3	5,4998	3,02 x 19,00 x 36,35	2085,763	$2,637 \times 10^{-3}$
4	5,4771	3,02 x 18,90 x 36,35	2074,785	$2,640 \times 10^{-3}$
5	43,8395	3,02 x 37,35 x 146,20	16490,921	$2,658 \times 10^{-3}$
6	43,7500	3,02 x 37,35 x 146,40	16513,481	$2,649 \times 10^{-3}$
Densidade média:				$2,640 \times 10^{-3}$

Tabela 2 - Determinação da densidade do alumínio 6063-O.

4.2.2.3. Determinação do Diâmetro Médio do Furo

Para a medição dos diâmetros dos furos executados nos corpos de prova foi usado o micrômetro interno cuja características foram apresentadas no item 3.6.5. Foram feitas duas medições do diâmetro de cada furo em posições defasadas de 90°. O diâmetro do furo foi determinado pela média dos dois valores de diâmetros medidos.

4.2.2.4. Cálculo do Peso das Rebarbas

O peso da rebarba formada no lado da saída de cada furo foi determinado, como já mencionado, a partir do peso do cavaco coletado separadamente para cada furo. Para o cálculo deste peso foram seguidos os seguintes passos:

1. Determinação da área do furo (A_F): Utilizando o diâmetro médio do furo foi determinada a área do furo.
2. Determinação do volume do furo (V_F): O volume de material contido no cilindro limitado pela periferia do furo e pelas duas superfícies da chapa. Foi calculado pelo produto da área do furo pela

espessura da chapa, isto é, $V_F = A_F \times \text{Espessura da chapa (t)}$. A espessura da chapa era de 3,02 mm.

3. Cálculo do peso do material contido no volume do furo (P_F): Foi determinado pelo produto da densidade ($2,640 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3$) pelo volume do furo descrito no passo anterior. $P_F = \text{Densidade} \times V_F$.
4. Cálculo do peso da rebarba (P_R): Finalmente o peso da rebarba foi determinado pela diferença entre o peso do material contido no furo (P_F), calculado no passo anterior, e o peso do cavaco que foi medido na balança. $P_R = P_F - \text{Peso do cavaco}$.

Como os ensaios foram feitos com três repetições, o valor considerado para o peso da rebarba foi determinado pela média aritmética dos três valores encontrados.

Todos os resultados das medições, pesagens e cálculos estão apresentados em forma de tabela no anexo C.

4.2.3. Metodologia para a Determinação da Altura das Rebarbas

A altura de todas as rebarbas foi medida com o relógio comparador cuja especificação encontra-se no item 3.6.2. Para isso foi usado um apalpador com face plana para que este pudesse abranger uma área maior do topo da rebarba evitando a sua deformação e pegando o valor máximo para a altura uma vez que, em alguns casos, esta grandeza era muito irregular.

Para a execução destas medidas foi adotado o seguinte procedimento:

Os corpos de prova foram fixados numa pequena mesa que possui movimento na vertical comandado por um parafuso e o relógio comparador foi fixado numa haste com base magnética. O suporte do relógio era ajustado de modo que o apalpador deste ficasse em contato com a superfície plana do corpo de prova (base da rebarba). O relógio, nesta posição, era zerado através do ajuste do

parafuso da mesa. Em seguida, com a mesa parada, o apalpador do relógio era levado para o topo da rebarba e era feita a leitura da altura da mesma.

Nas rebarbas mais finas e delicadas (rebarbas tipo III e IV, figura 32 item 3.8.3) a força aplicada pela mola do relógio poderia vir deformá-las. Para que isto fosse evitado, foi usada uma pequena alavanca para controlar o movimento do apalpador do relógio. Assim quando o apalpador vinha descendo lentamente, controlado pela alavanca, no instante em que tocava no topo da rebarba o seu movimento era interrompido e a leitura era feita.

A medição da altura da rebarba foi feita em quatro pontos da periferia do furo defasados de 90° e o valor adotado para esta grandeza para cada furo calculada pela média das quatro medidas.

Como os ensaios foram feitos com três repetições, o valor final para a altura da rebarba para cada condição de corte e geometria de ferramenta foi tomado como a média das médias dos três furos.

No anexo D encontram-se todos os valores medidos das alturas de rebarbas produzidas neste experimento.

4.2.4. Metodologia para a Determinação da Espessura das Rebarbas

Como no caso da altura, a medição da espessura também foi feita em quatro pontos defasados de 90° . Destes valores foi tomada a média e considerada como a espessura da rebarba do furo. O valor final para cada condição de ensaio foi calculado pela média das médias das espessuras.

Para a medição da espessura foram empregados dois instrumentos: O microscópio ótico (ver item 3.6.1) e o paquímetro (ver item 3.6.3).

O microscópio ótico foi empregado para a medição da espessura das rebarbas mais resistentes. Para isso, após a medição da altura, as rebarbas foram rebaixadas com uma ferramenta apropriada de modo a permitir a focalização da sua base. Do contrário, com a rebarba alta, o foco do

microscópio na base da mesma ficava embaçado dificultando a visualização das marcas de início e fim de sua espessura.

Para esta medição, o corpo de prova era apoiado na mesa do microscópio com o lado da rebarba (lado da saída do furo) voltado para cima. Após a focalização da base, fazia-se coincidir o traço da ocular com o início da espessura da rebarba (borda do furo) e zerava-se o colar do microscópio. Em seguida deslocava-se este traço até a marca do final da espessura e fazia-se a leitura através do colar da mesa do microscópio.

Um problema encontrado na medição das rebarbas muito finas (tipo III e IV) foi o fato de que estas não se conservavam completamente na vertical e sim um pouco inclinadas ou enroladas. Isto tornou impraticável a medição da sua espessura usando o microscópio, devido à impossibilidade de focalização da base da rebarba onde deveria ser feita a medição. O rebaixamento da altura dessas rebarbas, como aconteceu com as mais espessas, foi descartado uma vez que por possuir pouca resistência, isto poderia vir destruir estas rebarbas.

A solução encontrada para a medição da espessura deste tipo de rebarba foi o uso do paquímetro. Neste caso, quando o paquímetro ia sendo fechado, as rebarbas, que eram muito finas e portanto de fácil flexão, se acomodavam entre as faces do instrumento.

No anexo E encontram-se todos os valores medidos das espessuras de rebarbas produzidas.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. Avaliação Qualitativa das Rebarbas

A figura 32 no item 3.8.3 mostrou quatro tipos de rebarbas classificadas por Shikata e que serão utilizadas aqui para mostrar a forma que as rebarbas apresentaram para cada condição de ensaio. As figuras 34a, 35a, 36a e 37a mostram, através de fotografias, a sequência de formação, e as figuras 34b, 35b, 36b e 37b mostram em detalhe, a forma das rebarbas tipo I, II, III, e IV respectivamente, tornando mais compreensível a ilustração da figura 32.

As tabelas 3, 4, 5 e 6 apresentam os resultados da classificação dos tipos de rebarbas detectadas para todas as combinações de ângulo de hélice e ângulo de ponta, quando foi usado os avanços 0,047, 0,125, 0,25 e 0,5 mm/rot. respectivamente.

Avanço 0,047 mm/rot.			
	Âng. de Ponta 100°	Âng. de Ponta 118°	Âng. de Ponta 135°
Âng. de Hélice 25°	I	I	II
Âng. de Hélice 35°	III	III	IV
Âng. de Hélice 45°	IV	III	IV

Tabela 3 Tipos de rebarbas detectadas para o avanço de 0,047 mm/rot.

Avanço 0,125 mm/rot.			
	Âng. de Ponta 100°	Âng. de Ponta 118°	Âng. de Ponta 135°
Âng. de Hélice 25°	I	I	II
Âng. de Hélice 35°	III	I	II
Âng. de Hélice 45°	IV	III	IV

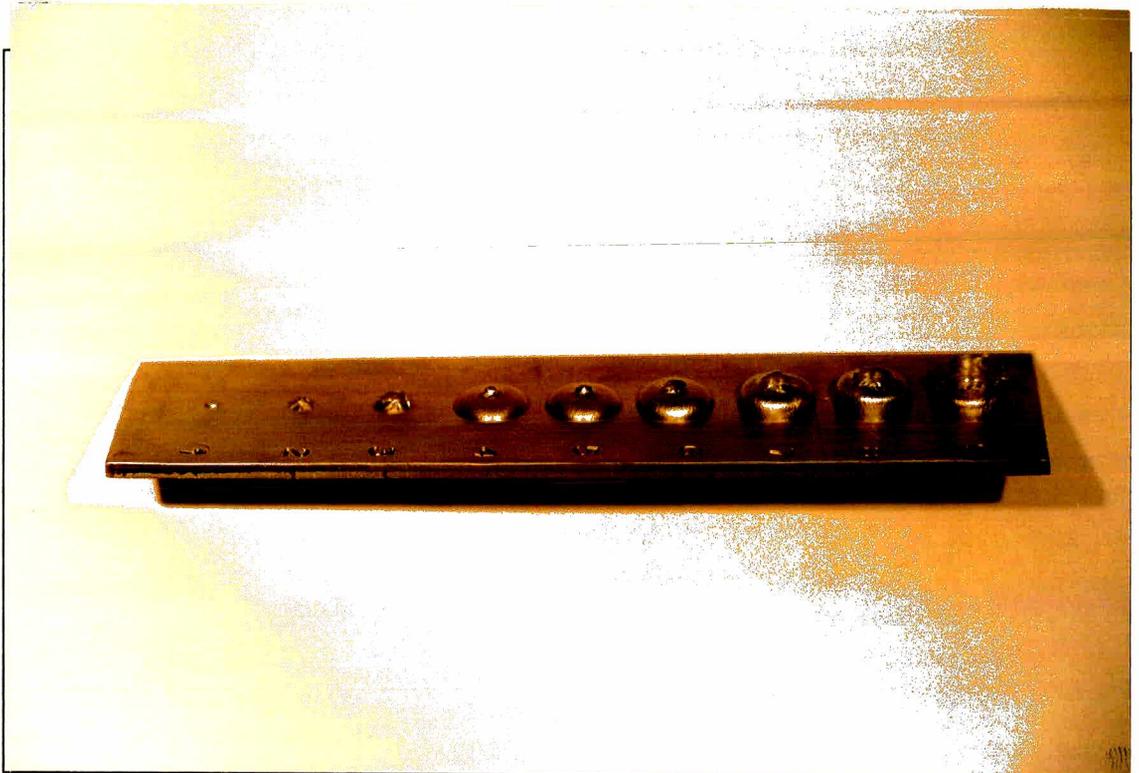
Tabela 4 Tipos de rebarbas detectadas para o avanço de 0,125 mm/rot.

Avanço 0,25 mm/rot.			
	Âng. de Ponta 100°	Âng. de Ponta 118°	Âng. de Ponta 135°
Âng. de Hélice 25°	I	I	I
Âng. de Hélice 35°	I	I	I
Âng. de Hélice 45°	I	III	III

Tabela 5 Tipos de rebarbas detectadas para o avanço de 0,25 mm/rot.

Avanço 0,5 mm/rot.			
	Âng. de Ponta 100°	Âng. de Ponta 118°	Âng. de Ponta 135°
Âng. de Hélice 25°	I	I	I
Âng. de Hélice 35°	I	I	I
Âng. de Hélice 45°	I	I	I

Tabela 6 Tipos de rebarbas detectadas para o avanço de 0,5 mm/rot.



(a) - Sequência de formação da rebarba tipo I.

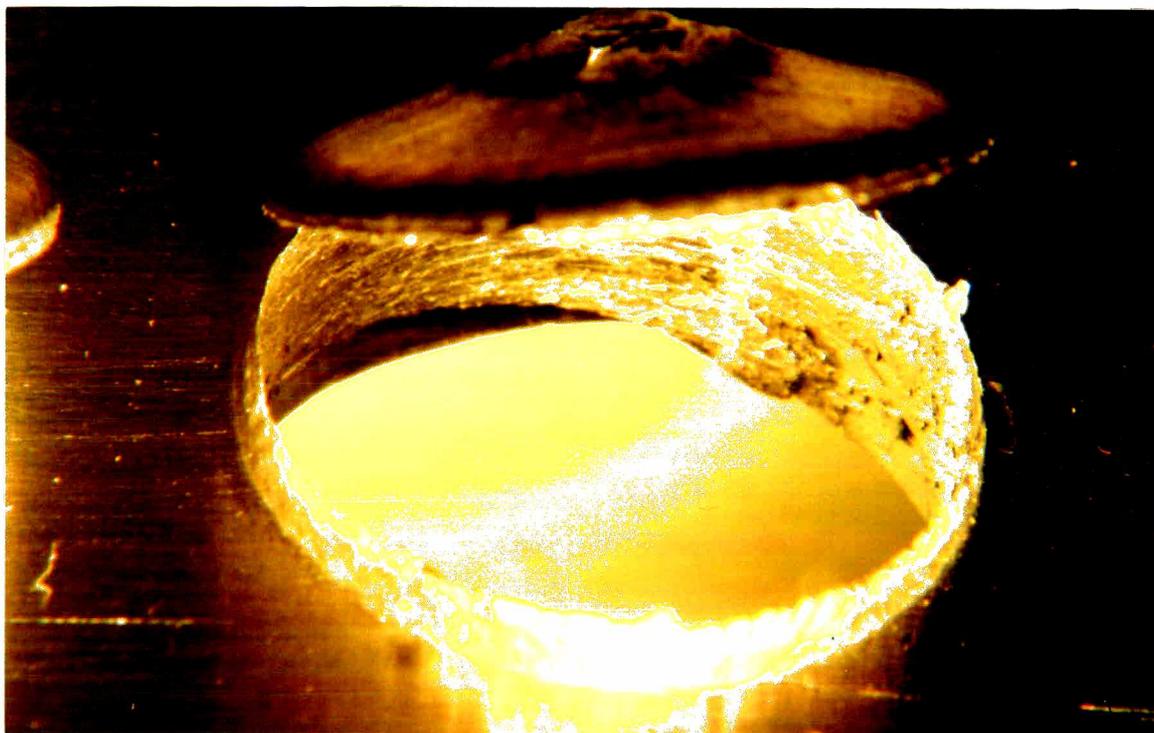


(b) - Detalhe da forma da rebarba tipo I.

Figura 34 - Rebarba tipo I.



(a) - Sequência de formação da rebarba tipo II.

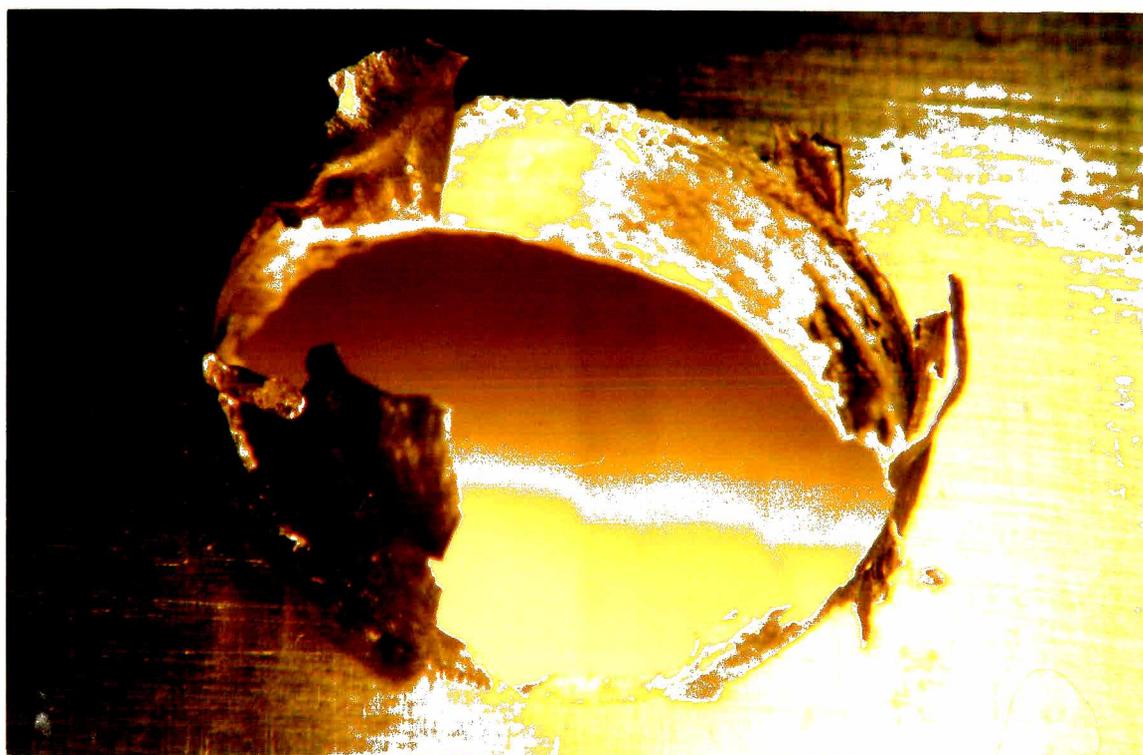


(b) - Detalhe da forma da rebarba tipo II.

Figura 35 - Rebarba tipo II.

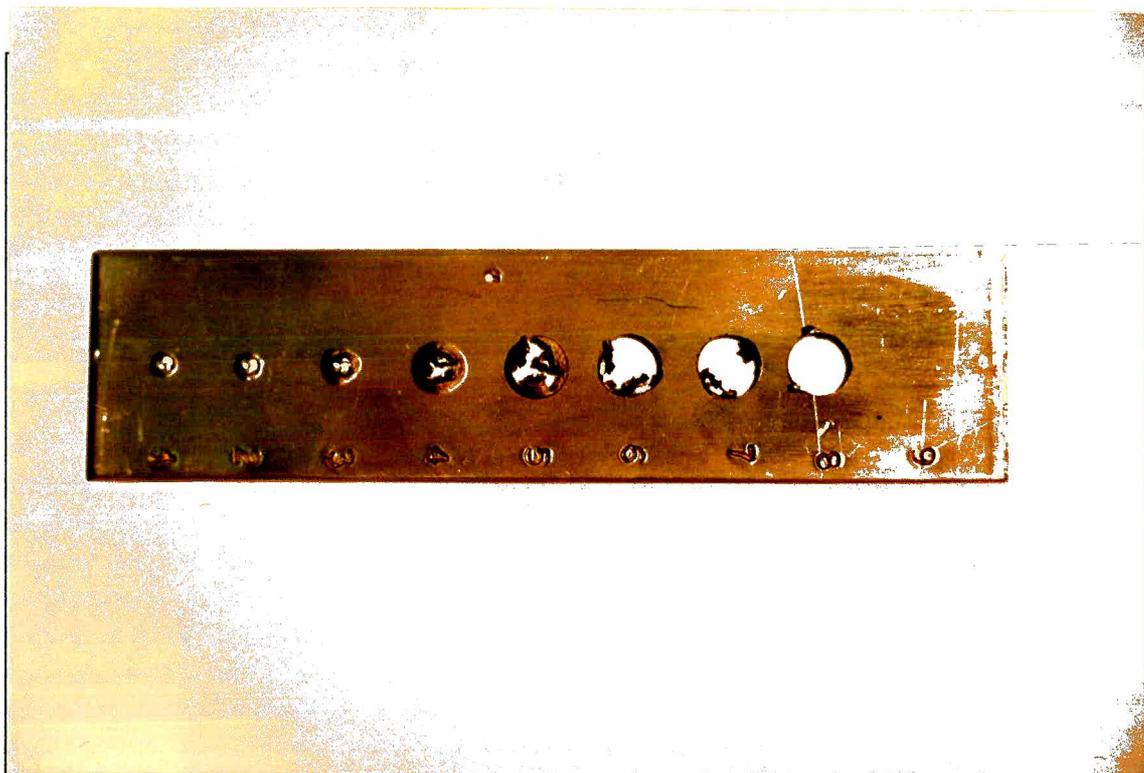


(a) - Sequência de formação da rebarba tipo III.



(b) - Detalhe da forma da rebarba tipo III.

Figura 36 - Rebarba tipo III.



(a) - Sequência de formação da rebarba tipo IV.



(b) - Detalhe da forma da rebarba tipo IV.

Figura 37 - Rebarba tipo IV.

5.2. Avaliação Quantitativa das Rebarbas

5.2.1. Modo de Avaliação da Dispersão dos Resultados

Como as grandezas medidas neste experimento (altura, espessura e peso das rebarbas) são grandezas variáveis, ou seja, apresentam variações em função do ponto onde a medição é tomada e/ou do instante quando a medição é realizada, o resultado da medição deve exprimir a faixa de valores que engloba todos os valores possíveis de serem assumidos por estas grandezas considerando as incertezas introduzidas pelo Sistema de Medição (SM) [47].

Aqui, define-se a quantidade ΔM_{\max} como a variação máxima das medidas obtidas em relação ao valor médio. ΔM_{\max} é usado como estimativa para avaliar a faixa de variação desta grandeza, e é calculada a partir do valor absoluto da maior diferença entre cada medida obtida e a média, ou seja:

$$\Delta M_{\max} = |M_i - MM|_{\max}$$

onde:

M_i é a i -ésima medida efetuada

MM é a média das medidas

Como no caso deste experimento é impossível distinguir claramente o quanto da variação das medidas obtidas é devido às imperfeições do Sistema de Medição (sistemáticas ou aleatórias) e quanto ocorre devido às variações da grandeza a medir, a metodologia adotada leva em conta a combinação destes dois efeitos e assim o Resultado da Medição (RM) pode ser calculado por:

$$RM = MM \pm (ISM + \Delta M_{\max})$$

onde:

MM é a média das medidas

ISM é a incerteza do sistema de medição

Os resultados de todas as medições do peso, altura e espessura das rebarbas estão nos anexos C, D e E respectivamente. Estes resultados serão apresentados, a seguir, em forma de gráficos.

5.2.2. Avaliação pela Altura das Rebarbas

5.2.2.1. Influência do Avanço

Inicialmente será mostrado o comportamento da altura da rebarba na saída do furo, que foi uma das grandezas escolhidas para ser analisada, em função do avanço para cada geometria de broca individualmente, ou seja, uma curva para cada broca com suas respectivas dispersões. Isto porque as dispersões dos resultados foram muito grandes, fazendo-se necessário a adoção de uma curva para os valores mínimos, médios e máximos destes resultados.

A sobreposição de mais de uma curva no mesmo gráfico com suas respectivas dispersões geraria uma confusão muito grande de curvas e a interpretação dos resultados ficaria comprometida.

A combinação dos diversos efeitos num mesmo gráfico será apresentado mais adiante onde serão utilizadas as curvas dos resultados com os valores médios uma vez que as dispersões já serão apresentadas aqui.

O objetivo agora é mostrar a faixa de valores que podem ser assumidos pela grandeza analisada (altura da rebarba) para cada combinação de avanço, ângulo de hélice e ângulo de ponta.

Resultados da Dispersão para Brocas com Ângulo de Hélice (δ) igual a 25°.

A figura 38 apresenta os resultados da dispersão da altura da rebarba em função do avanço para a broca com ângulo de hélice (δ) igual a 25°.

A figura 38a apresenta os valores mínimos máximos que podem ser assumidos para a Altura da Rebarba quando foi utilizada uma broca com ângulo de ponta (σ) igual a 100° . Por este gráfico pode-se observar que a dispersão é muito grande para os valores iniciais do avanço e tende a diminuir com o aumento deste.

A figura 38b apresenta a dispersão para a broca com ângulo de ponta igual a 118° . Aqui também a dispersão é inicialmente grande (um pouco maior que 3 mm) e tende a diminuir (para 1 mm) com o aumento do avanço.

A figura 38c mostra o resultado da dispersão para a broca com ângulo de ponta igual a 135° . Neste caso a dispersão tende a permanecer mais ou menos constante após um pequeno aumento quando o avanço muda de 0,047 para 0,125 mm/rot.

Resultados da Dispersão para Brocas com Ângulo de Hélice (δ) igual a 35° .

A figura 39 apresenta os resultados da dispersão da altura da rebarba em função do avanço para a broca com ângulo de hélice (δ) igual a 35° .

A figura 39a apresenta a dispersão para a broca com ângulo de ponta igual a 100° . Aqui a dispersão para avanços baixos é pequena e aumentou consideravelmente a partir do avanço 0,25 mm/rot.

A figura 39b mostra a dispersão para a broca com ângulo de ponta igual a 118° . Neste caso a dispersão inicialmente é pequena, aumenta consideravelmente quando o avanço chega a 0,25 mm/rot., e cai novamente quando o avanço atinge 0,5 mm/rot.

A figura 39c mostra a dispersão para a broca com ângulo de ponta igual a 135° . Aqui a dispersão se mantém aproximadamente constante para todos os valores de avanço, com uma leve tendência a aumentar para o valor máximo do avanço.

Resultados da Dispersão para Brocas com Ângulo de Hélice (δ) igual a 45° .

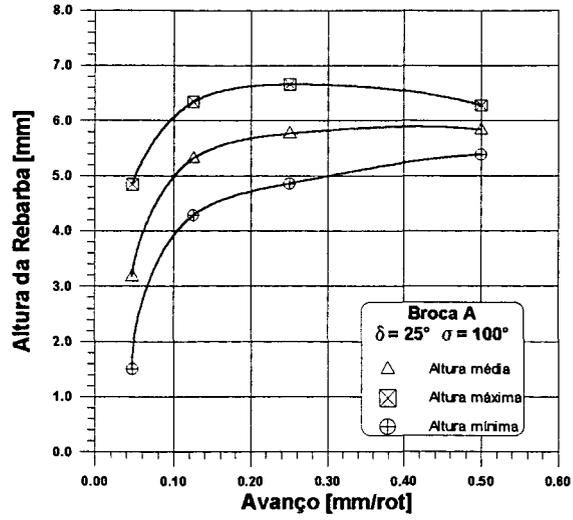
A figura 40 apresenta os resultados da dispersão da altura da rebarba em função do avanço para a broca com ângulo de hélice (δ) igual a 45° .

A figura 40a apresenta a dispersão para a broca com ângulo de ponta igual a 100° . Neste caso a dispersão é pequena, aumenta consideravelmente para um avanço de 0,25 mm/rot., e novamente diminui quando o avanço atinge 0,5 mm/rot.

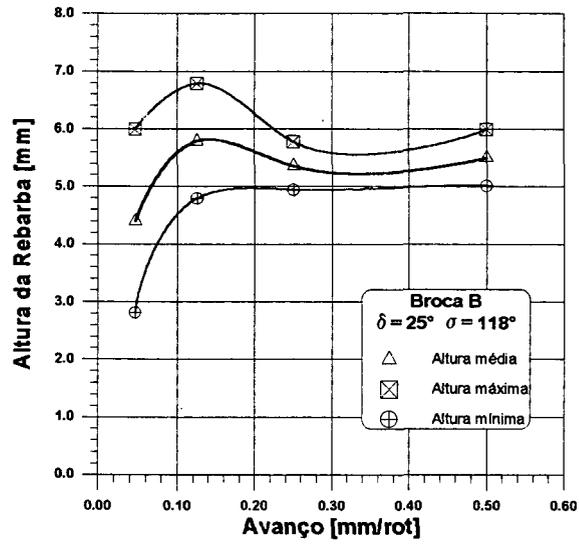
A figura 40b apresenta a dispersão para a broca com ângulo de ponta igual a 118° . Aqui a dispersão tem um comportamento semelhante ao caso anterior, ou seja, inicialmente é pequena, aumenta para o avanço de 0,25 mm/rot., e diminui quando o avanço chega a 0,5 mm/rot.

A figura 40c mostra a dispersão para o caso da broca com ângulo de ponta igual a 135° . Aqui a dispersão é muito pequena quando o avanço foi 0,047 mm/rot. e aumenta a medida que este cresce, atingindo o valor máximo para o avanço de 0,5 mm/rot.

(a)



(b)



(c)

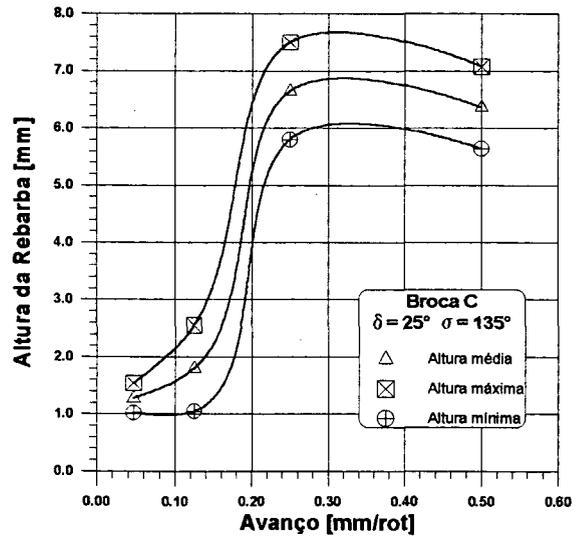
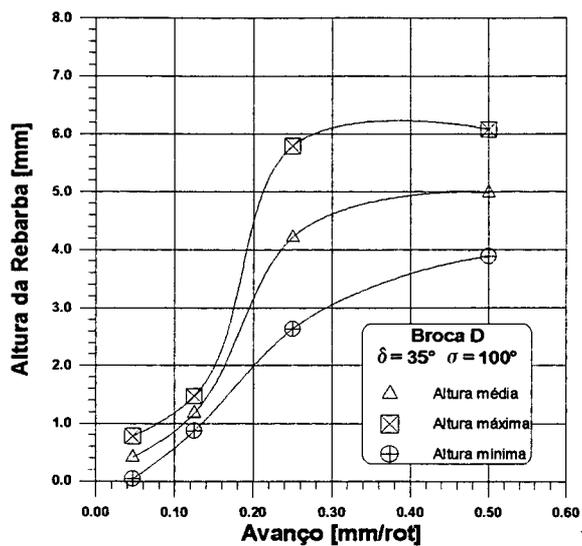
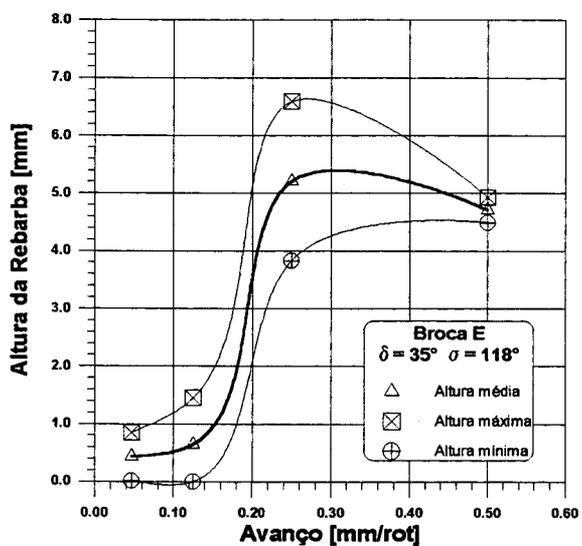


Figura 38 - Dispersão dos resultados da altura da rebarba para broca com $\delta = 25^\circ$.

(a)



(b)



(c)

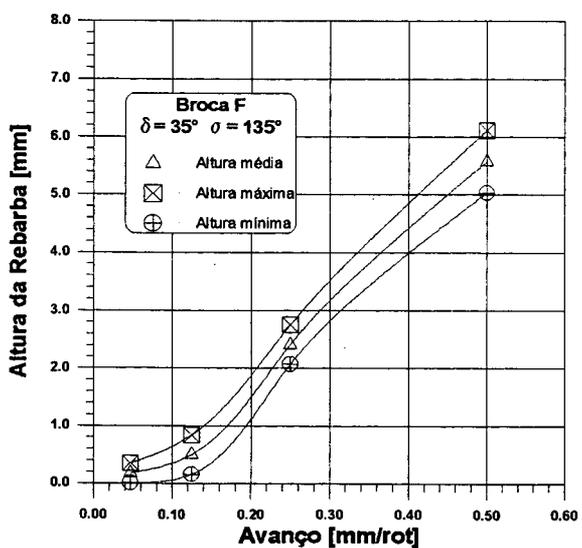
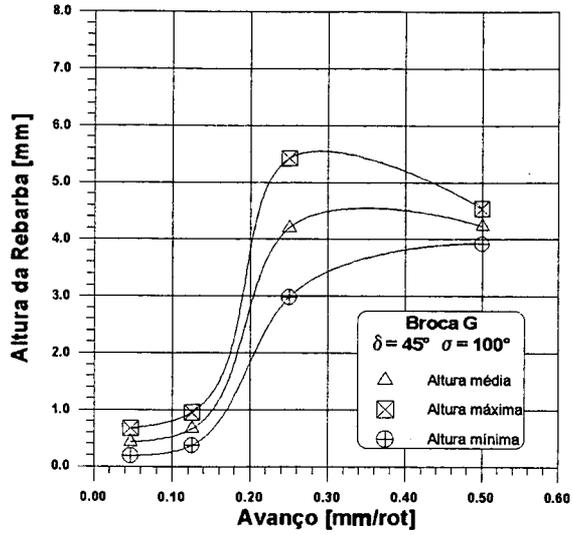
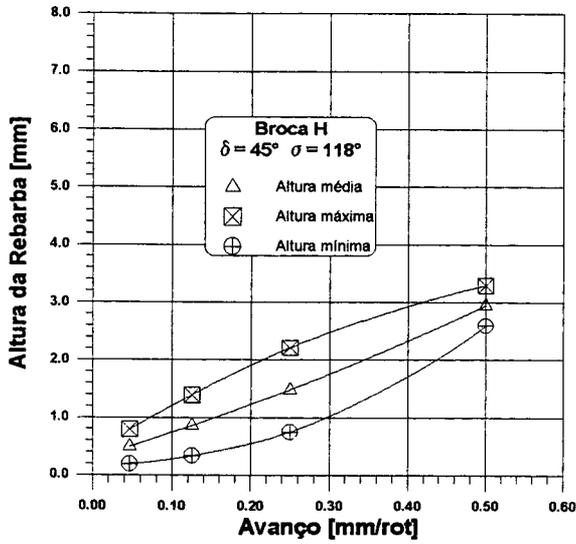


Figura 39 - Dispersão dos resultados da altura da rebarba para broca com $\delta = 35^\circ$.

(a)



(b)



(c)

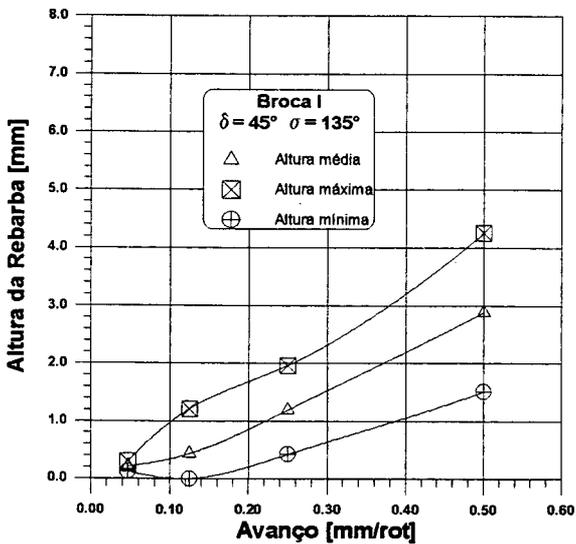


Figura 40 - Dispersão dos resultados da altura da rebarba para broca com $\delta = 45^\circ$.

Análise da Influência do Avanço sobre a Altura Média da Rebarba

No item anterior foram mostradas as dispersões para todas as geometrias de broca individualmente. Agora será analisado o comportamento da altura média da rebarba em função do avanço utilizando os valores médios dos resultados.

A figura 41a mostra o comportamento da altura média da rebarba em função do avanço para brocas com ângulo de ponta de 100° e ângulos de hélice 25° , 35° e 45° . Por esta figura, pode-se observar que a altura média da rebarba aumenta com o avanço, para todos os valores de ângulos de hélices, e tende a se estabilizar a partir de $0,25$ mm/rot.

A broca com ângulo de hélice de 25° apresentou o pior comportamento em termos de altura de rebarba, ou seja, a maior altura de rebarba, atingindo um valor máximo próximo a 6 mm quando o avanço foi $0,25$ e $0,5$ mm/rot.

As brocas com ângulo de hélice de 35° e 45° apresentaram um comportamento semelhante, com uma ligeira melhoria para a broca com hélice de 45° quando o avanço aumentou de $0,25$ para $0,5$ mm/rot.

A figura 41b mostra o comportamento da altura média da rebarba em função do avanço para brocas com ângulo de ponta de 118° e ângulos de hélice 25° , 35° e 45° . Nesta caso, o avanço não teve muita influência sobre a altura média da rebarba quando foi usada uma broca com ângulo de hélice de 25° . Sendo que esta broca foi a que apresentou o pior resultado em relação à altura da rebarba.

Para a broca com hélice de 35° , a altura média da rebarba aumentou extraordinariamente de um valor em torno de $0,6$ mm para mais de 5 mm quando o avanço passou de $0,125$ para $0,25$ mm/rot. e em seguida diminuiu suavemente para uma altura menor do que 5 mm quando o avanço atingiu $0,5$ mm/rot.

A broca com hélice de 45° apresentou um comportamento aproximadamente linear para a altura média da rebarba em função do avanço, tendo um valor mínimo, para a altura média da

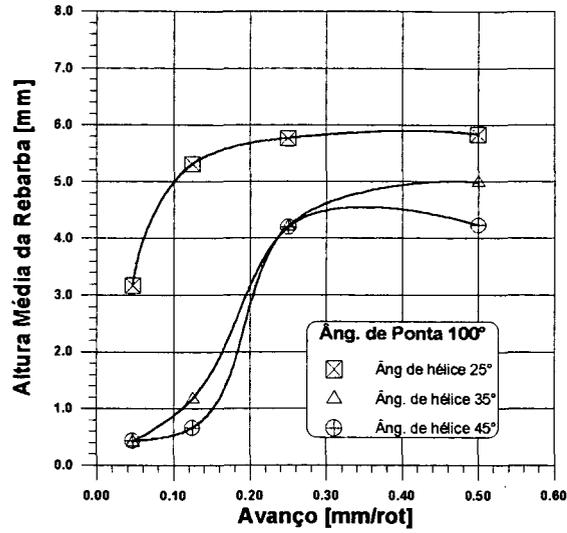
rebarba, em torno de 0,5 mm para um avanço de 0,047 mm/rot. e um valor máximo próximo de 3 mm quando o avanço foi 0,5 mm/rot.

A figura 41c mostra o comportamento da altura média da rebarba em função do avanço para brocas com ângulo de ponta de 135° e ângulos de hélice 25, 35 e 45°. Mais uma vez a broca com hélice 25° foi a que demonstrou o pior resultado para todos os valores de avanço. Para valores baixo de avanço esta broca apresentou relativamente pequena altura média para a rebarba (menor que 2 mm) em seguida esta altura aumentou consideravelmente com o avanço atingindo valores superiores a 6 mm.

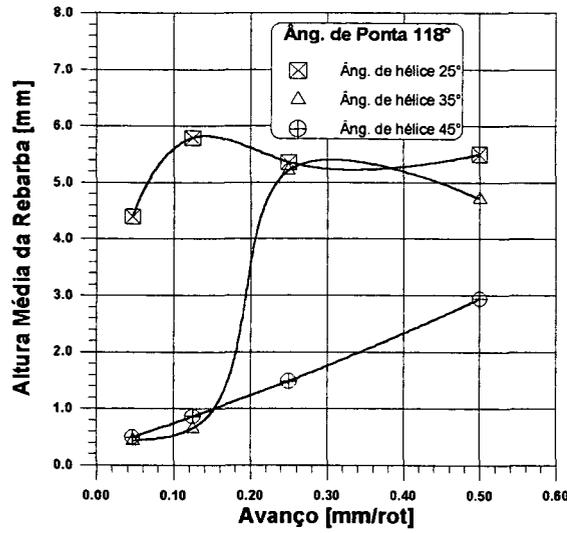
A broca com ângulo de hélice de 35° apresentou valores muito baixos para a altura média da rebarba quando o avanço usado também foi baixo (0,047 e 0,125 mm/rot.), em seguida teve um aumento acentuado quando o avanço passou para 0,25 e 0,5 mm/rot.

A broca com hélice de 45° foi a que apresentou o melhor resultado em termos da altura média da rebarba produzida. Para valores baixo de avanço (0,047 e 0,125 mm/rot.) a altura média da rebarba ficou abaixo 0,5 mm aumentando em seguida para valores pouco acima de 1 mm e pouco abaixo de 3 mm quando o avanço foi 0,25 e 0,5 mm/rot. respectivamente.

(a)



(b)



(c)

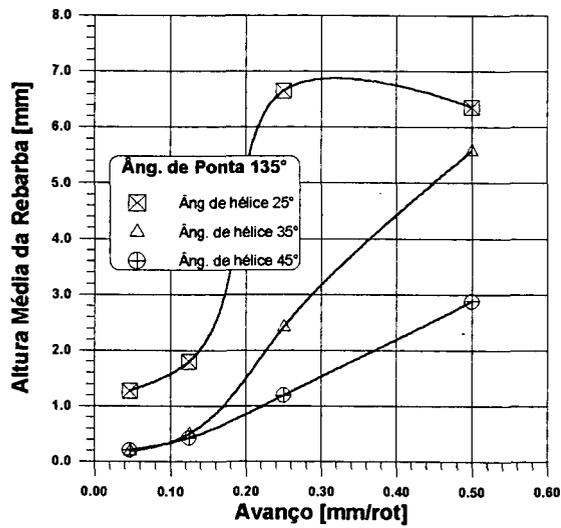


Figura 41 - Influência do avanço sobre a altura média da rebarba.

5.2.2.2. Influência do Ângulo de Hélice

A influência do ângulo de hélice sobre a altura da rebarba será apresentada aqui, com suas respectivas dispersões, para um avanço constante igual a 0,25 mm/rot. Como foram utilizados 4 (quatro) avanços, e as tendências são semelhantes, foi escolhido o avanço 0,25 mm/rot.

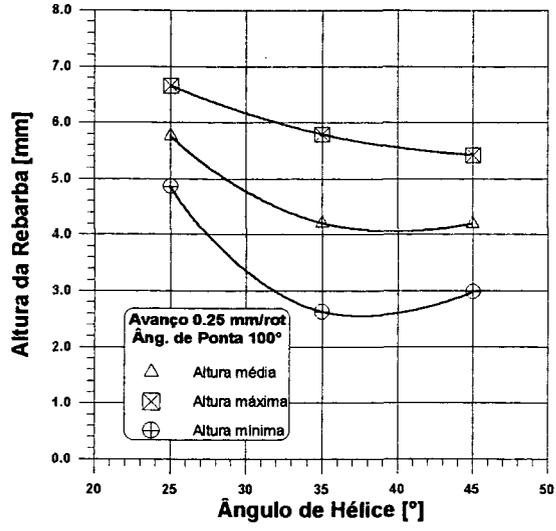
As dispersões são representadas pelas curvas dos valores mínimos e máximos calculados conforme o item 5.2.1.

A figura 42a mostra o comportamento da altura da rebarba em função do ângulo de hélice quando é usada uma broca com ângulo de ponta de 100°. Pode-se observar por este gráfico que a dispersão foi muito grande tornando-se perigoso afirmar com exatidão qual o comportamento real da curva. Fazendo-se uma análise pela curva média, pode-se observar que houve uma tendência da redução da altura da rebarba quando o ângulo de hélice aumentou de 25° para 35°, e manteve-se constante quando passou de 35° para 45°.

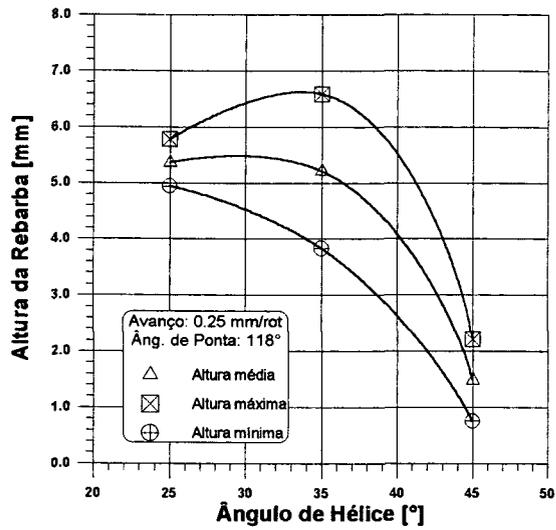
A figura 42b mostra o comportamento da altura da rebarba em função do ângulo de hélice quando é usada uma broca com ângulo de ponta de 118°. Neste caso a curva apresentou um formato oposto ao do caso anterior, ou seja, concavidade para baixo. Aqui apesar da dispersão ser também um pouco grande, pode-se afirmar que houve uma redução da altura da rebarba com o aumento do ângulo de hélice. Pela análise da curva média pode-se observar que quando o ângulo de hélice aumentou de 25° para 35°, a altura da rebarba permaneceu constante (acima de 5 mm). Quando o ângulo de hélice aumentou para 45°, houve uma significativa redução da altura da rebarba, atingindo valores em torno de 1,5 mm.

A figura 42c mostra o comportamento da altura da rebarba em função do ângulo de hélice quando é usada uma broca com ângulo de ponta de 135°. Aqui a dispersão, comparada com os casos anteriores, foi pequena; permitindo afirmar que houve uma expressiva redução na altura da rebarba com o aumento do ângulo de hélice. Pela curva média observa-se que a altura da rebarba caiu de aproximadamente 6,6 mm para 1,3 mm quando o ângulo de hélice aumentou de 25° para 45°.

(a)



(b)



(c)

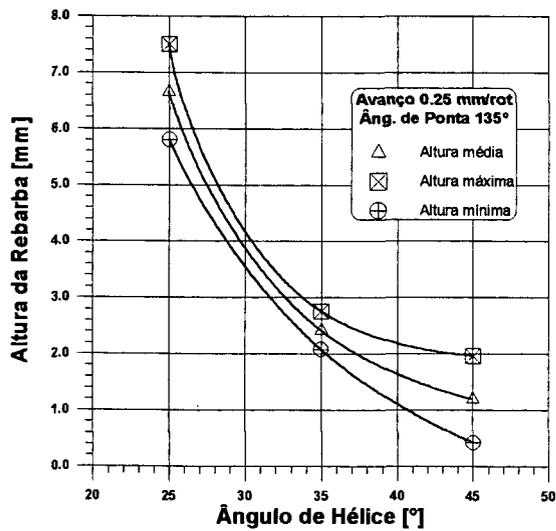


Figura 42 - Influência do ângulo de hélice sobre a altura da rebarba.

5.2.2.3. Influência do Ângulo de Ponta

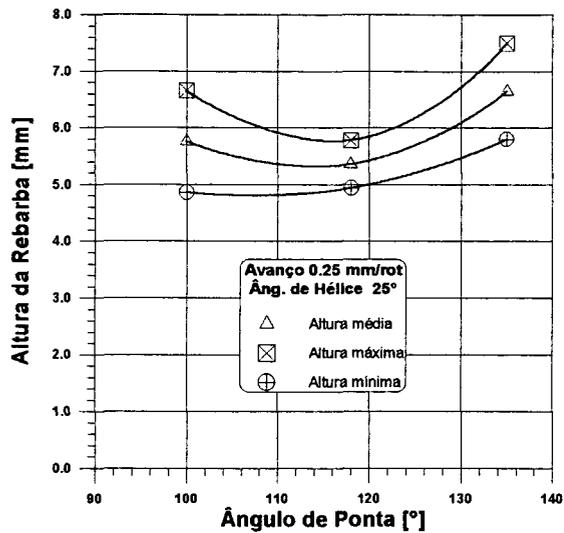
A influência do ângulo de ponta sobre a altura da rebarba será apresentada também, com suas respectivas dispersões, pelos mesmos motivos citados anteriormente, apenas para o avanço de 0,25 mm/rot.

A figura 43a mostra o comportamento da altura da rebarba em função do ângulo de ponta quando é usada uma broca com ângulo de hélice de 25°. Pode-se observar por este gráfico que a dispersão foi significativa; porém tomando a curva dos valores médios, observa-se que quando o ângulo de ponta aumenta de 100° para 118°, houve uma redução da altura da rebarba, e quando este ângulo sobe para 135° a altura da rebarba também aumenta. Este gráfico apresenta uma concavidade voltada para cima.

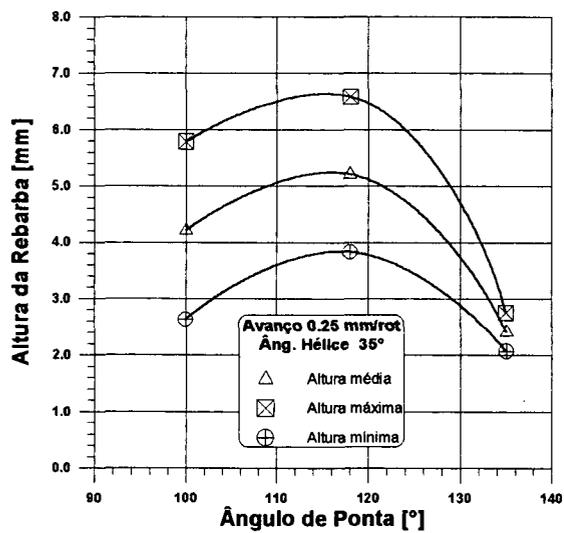
A figura 43b mostra o comportamento da altura da rebarba em função do ângulo de ponta quando é usada uma broca com ângulo de hélice de 35°. A concavidade neste caso foi contrária ao do caso anterior, ou seja, concavidade para baixo. Aqui a dispersão é grande quando o ângulo de ponta é igual a 100° e 118° e diminui quando este ângulo aumenta para 135°. Devido à grande dispersão no início da curva, fica difícil estimar a tendência desta quando o ângulo de ponta aumenta de 100° para 118°. No entanto quando o ângulo de ponta passa de 118° para 135° fica evidente a redução da altura da rebarba que atinge valores em torno de 2,5 mm.

A figura 43c mostra o comportamento da altura da rebarba em função do ângulo de ponta quando é usada uma broca com ângulo de hélice de 45°. A dispersão neste caso foi constante ao longo de toda a curva. A análise destas curvas permite afirmar que houve uma boa redução na altura da rebarba com o aumento do ângulo de ponta. Quando este ângulo é 100° temos uma altura de rebarba, analisando a curva média, um pouco acima de 4 mm, caindo para valores em torno de 1 mm quando o ângulo de ponta atinge 135°.

(a)



(b)



(c)

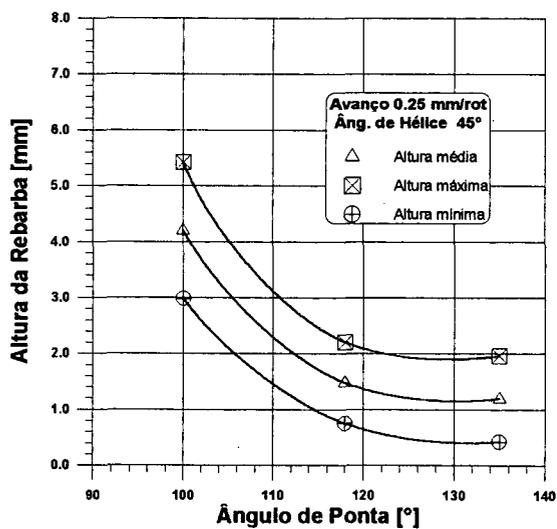


Figura 43 - Influência do ângulo de ponta sobre a altura da rebarba.

5.2.3. Avaliação pela Espessura das Rebarbas

5.2.3.1. Influência do Avanço

Como no caso da Altura, inicialmente será mostrado o comportamento da Espessura da Rebarba em função do avanço para cada geometria de broca individualmente com suas respectivas dispersões. A combinação dos diversos efeitos num mesmo gráfico será apresentado mais adiante.

Resultados da Dispersão para Brocas com Ângulo de Hélice (δ) igual a 25°.

A figura 44 apresenta os resultados da dispersão da Espessura da Rebarba em função do avanço para a broca com ângulo de hélice (δ) igual a 25°.

A figura 44a apresenta os valores mínimos e máximos que podem ser assumidos para a Espessura da Rebarba quando foi utilizada uma broca com ângulo de ponta (σ) igual a 100°. Por este gráfico pode-se observar que a dispersão inicialmente é pequena e depois aumenta com o aumento do avanço.

A figura 44b apresenta a dispersão para a broca com ângulo de ponta igual a 118°. Aqui a dispersão é bastante grande para todos os valores de avanço, principalmente a partir de 0,125 mm/rot.

A figura 44c mostra o resultado da dispersão para a broca com ângulo de ponta igual a 135°. Neste caso a dispersão tende a permanecer mais ou menos constante com um ligeiro aumento quando o avanço ultrapassa 0,25 mm/rot.

Resultados da Dispersão para Brocas com Ângulo de Hélice (δ) igual a 35°.

A figura 45 apresenta os resultados da dispersão da espessura da rebarba em função do avanço para a broca com ângulo de hélice (δ) igual a 35°.

A figura 45a apresenta a dispersão para a broca com ângulo de ponta igual a 100°. Aqui a dispersão para avanços baixos é pequena e aumentou consideravelmente a partir do avanço 0,25 mm/rot.

A figura 45b mostra a dispersão para a broca com ângulo de ponta igual a 118°. Neste caso a dispersão se mantém aproximadamente constante para todos os valores de avanço.

A figura 45c mostra a dispersão para a broca com ângulo de ponta igual a 135°. Como no caso anterior, aqui também a dispersão mantém-se constante.

Resultados da Dispersão para Brocas com Ângulo de Hélice (δ) igual a 45°.

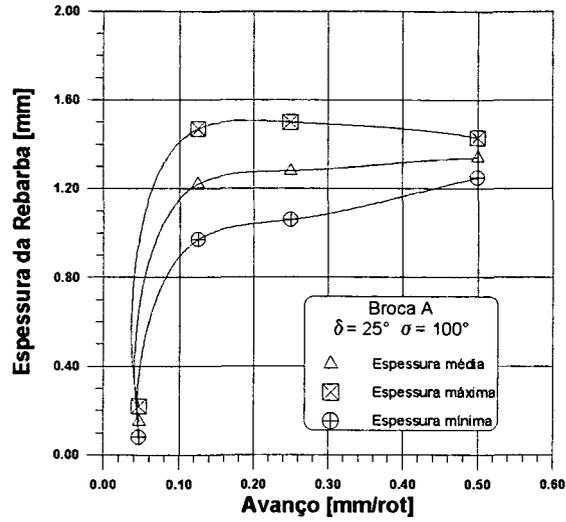
A figura 46 apresenta os resultados da dispersão da altura da rebarba em função do avanço para a broca com ângulo de hélice (δ) igual a 45°.

A figura 46a apresenta a dispersão para a broca com ângulo de ponta igual a 100°. Neste caso a dispersão inicial é pequena, depois aumenta consideravelmente a partir do avanço de 0,25 mm/rot.

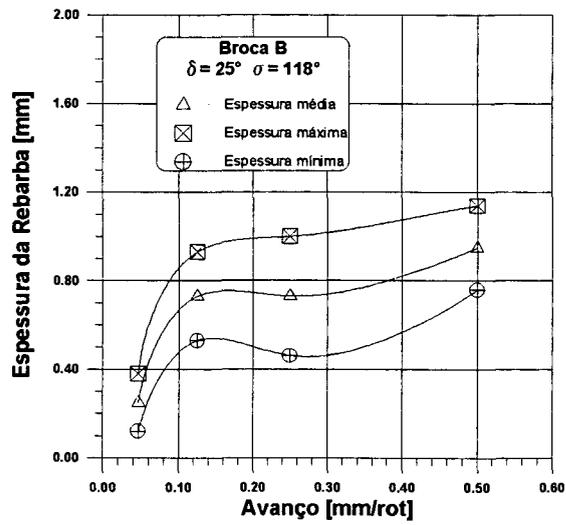
A figura 46b apresenta a dispersão para a broca com ângulo de ponta igual a 118°. Aqui a dispersão mantém-se constante para todos os valores de avanço.

A figura 46c mostra a dispersão para o caso da broca com ângulo de ponta igual a 135°. Aqui a dispersão é muito pequena quando o avanço foi 0,047 mm/rot. e aumenta gradativamente com o aumento do avanço, atingindo o valor máximo para o avanço de 0,5 mm/rot.

(a)



(b)



(c)

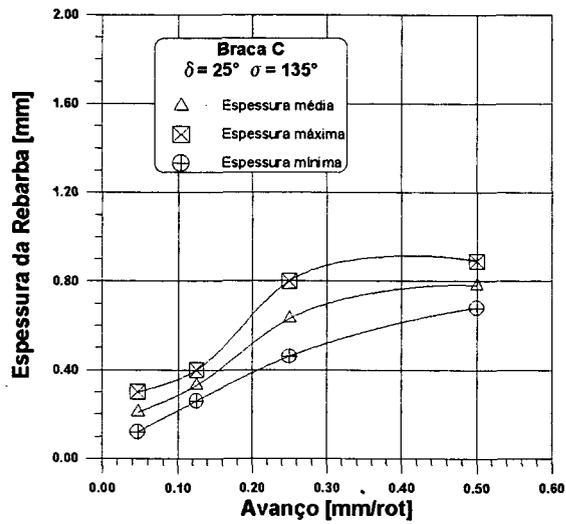
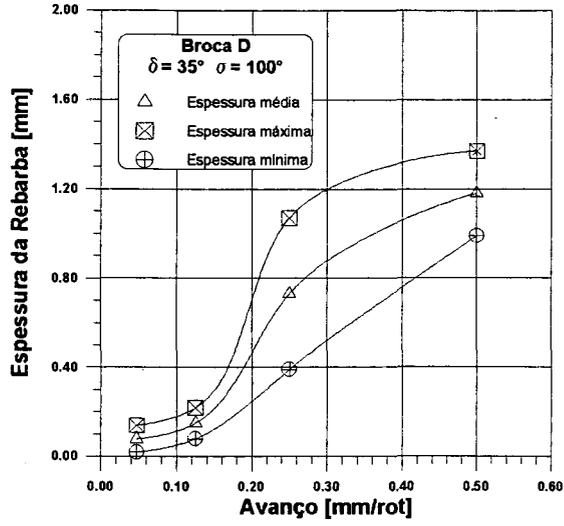
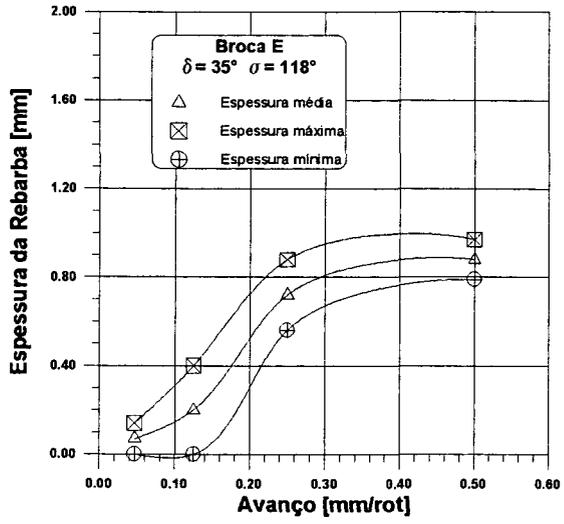


Figura 44 - Dispersão dos resultados da espessura da rebarba para broca com $\delta = 25^\circ$.

(a)



(b)



(c)

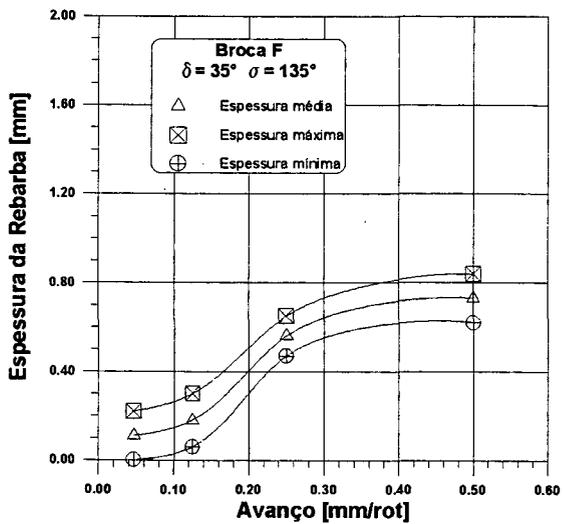
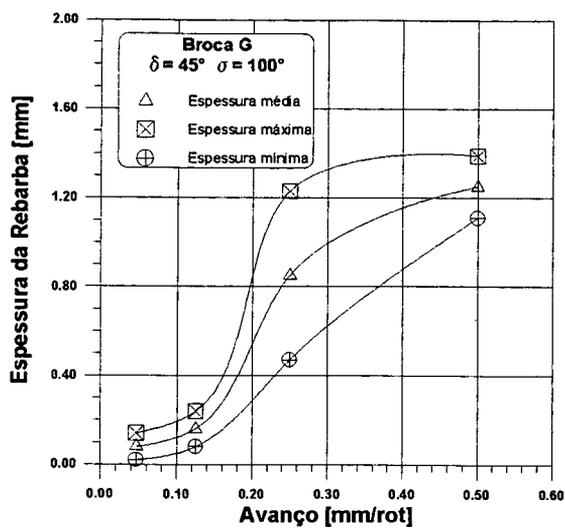
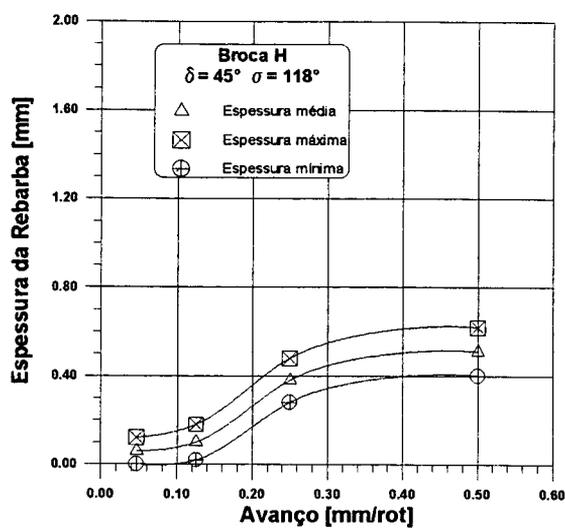


Figura 45 - Dispersão dos resultados da espessura da rebarba para broca com $\delta = 35^\circ$.

(a)



(b)



(c)

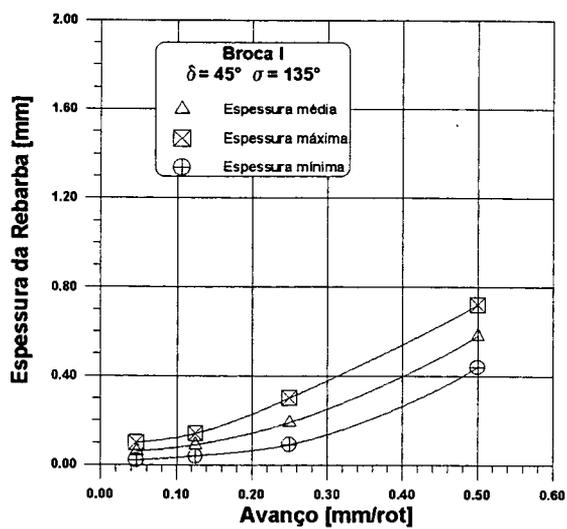


Figura 46 - Dispersão dos resultados da espessura da rebarba para broca com $\delta = 45^\circ$.

Análise da Influência do Avanço sobre a Espessura Média da Rebarba

Mostradas as dispersões para todas as geometrias de broca individualmente, agora será analisado o comportamento da espessura da rebarba em função do avanço utilizando os valores médios dos resultados.

A figura 47a mostra o comportamento da espessura média da rebarba em função do avanço para brocas com ângulo de ponta de 100° e ângulos de hélice 25° , 35° e 45° . Por esta figura, pode-se observar que a espessura média da rebarba aumenta com o avanço, para todos os valores de ângulos de hélices.

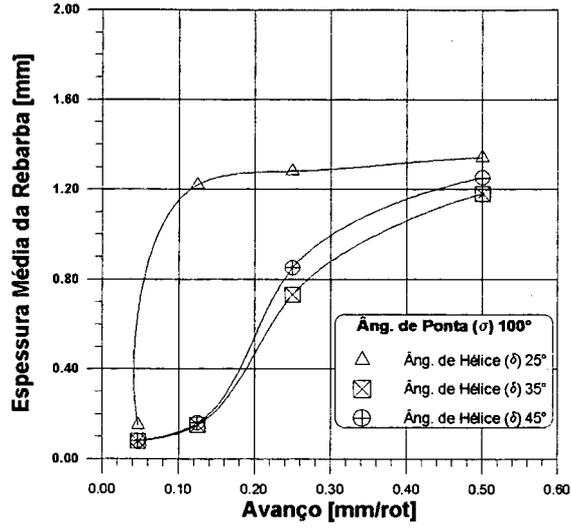
Como no caso da altura, a broca com ângulo de hélice de 25° apresentou o pior comportamento em termos de espessura de rebarba, ou seja, a maior espessura de rebarba, atingindo um valor acima de 1,2 mm já a partir do avanço 0,125 mm/rot.

Também como no caso da altura, as brocas com ângulo de hélice de 35° e 45° apresentaram um comportamento semelhante, com uma ligeira melhoria para a broca com hélice de 35° a partir do avanço 0,125 mm/rot.

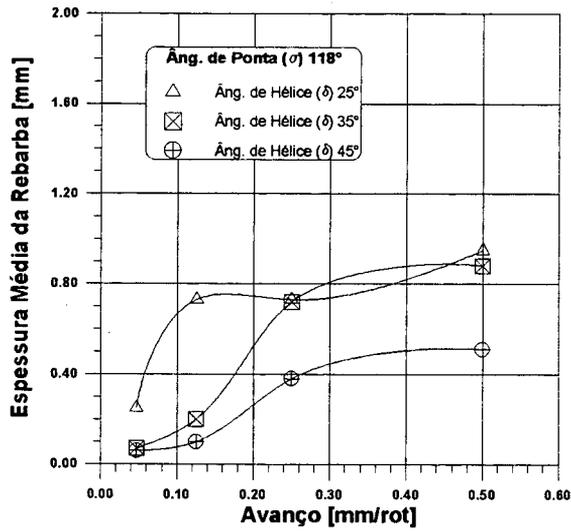
A figura 47b mostra o comportamento da espessura média da rebarba em função do avanço para brocas com ângulo de ponta de 118° e ângulos de hélice 25° , 35° e 45° . Nesta caso as brocas com ângulo de hélice 25° e 35° apresentaram um comportamento mais ou menos semelhante para os valores de espessura de rebarba. A broca com hélice de 45° apresentou o melhor resultado em termos de espessura da rebarba, atingindo um valor máximo em torno de 0,5 mm para esta grandeza.

A figura 47c mostra o comportamento da espessura média da rebarba em função do avanço para brocas com ângulo de ponta de 135° e ângulos de hélice 25° , 35° e 45° . Mais uma vez a broca com hélice 45° foi a que apresentou o melhor resultado para todos os valores de avanço. Em seguida vem a broca com hélice 35° e depois 25° . Em todos os casos houve um aumento progressivo da espessura da rebarba com o aumento do avanço.

(a)



(b)



(c)

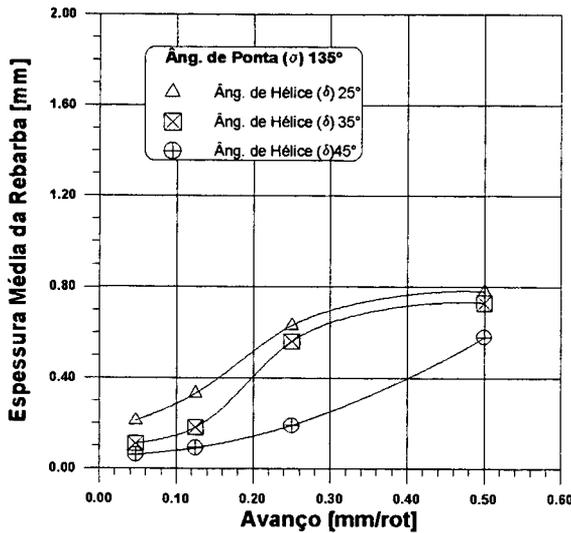


Figura 47 - Influência do avanço sobre a espessura média da rebarba.

5.2.3.2. Influência do Ângulo de Hélice

A influência do ângulo de hélice sobre a espessura da rebarba também será apresentada aqui, com suas respectivas dispersões, para um avanço constante igual a 0,25 mm/rot.

A figura 48a mostra o comportamento da espessura da rebarba em função do ângulo de hélice quando é usada uma broca com ângulo de ponta de 100°. A dispersão foi muito grande, o que torna impossível afirmar qual o comportamento real da curva. Analisando a curva média, pode-se observar que houve uma tendência de redução da espessura da rebarba quando o ângulo de hélice aumentou de 25° para 35°, e manteve-se constante até 45°.

A figura 48b mostra o comportamento da espessura da rebarba em função do ângulo de hélice quando é usada uma broca com ângulo de ponta de 118°. Neste caso a curva apresentou um formato oposto ao do caso anterior, ou seja, concavidade para baixo. Aqui, devido à dispersão ser um pouco grande quando o ângulo de hélice é 25°, só se pode afirmar com segurança é que a espessura da rebarba permaneceu constante com o aumento do ângulo de hélice. Pela análise da curva média pode-se observar que houve uma pequena redução da espessura da rebarba, que passou de 0,7 mm, quando o ângulo de hélice foi 25°, para um pouco menos de 0,4 mm quando o ângulo de hélice passou para 45°.

A figura 48c mostra o comportamento da espessura da rebarba em função do ângulo de hélice quando é usada uma broca com ângulo de ponta de 135°. Este gráfico tem um aspecto semelhante ao anterior (figura 48b), sendo que a dispersão foi menor. Portanto pode-se afirmar que houve uma redução da espessura da rebarba com o aumento do ângulo de hélice. Pela curva média, a espessura da rebarba passou de 0,6 mm, quando o ângulo de hélice foi 25°, para 0,2 mm quando o ângulo de hélice mudou para 45°.

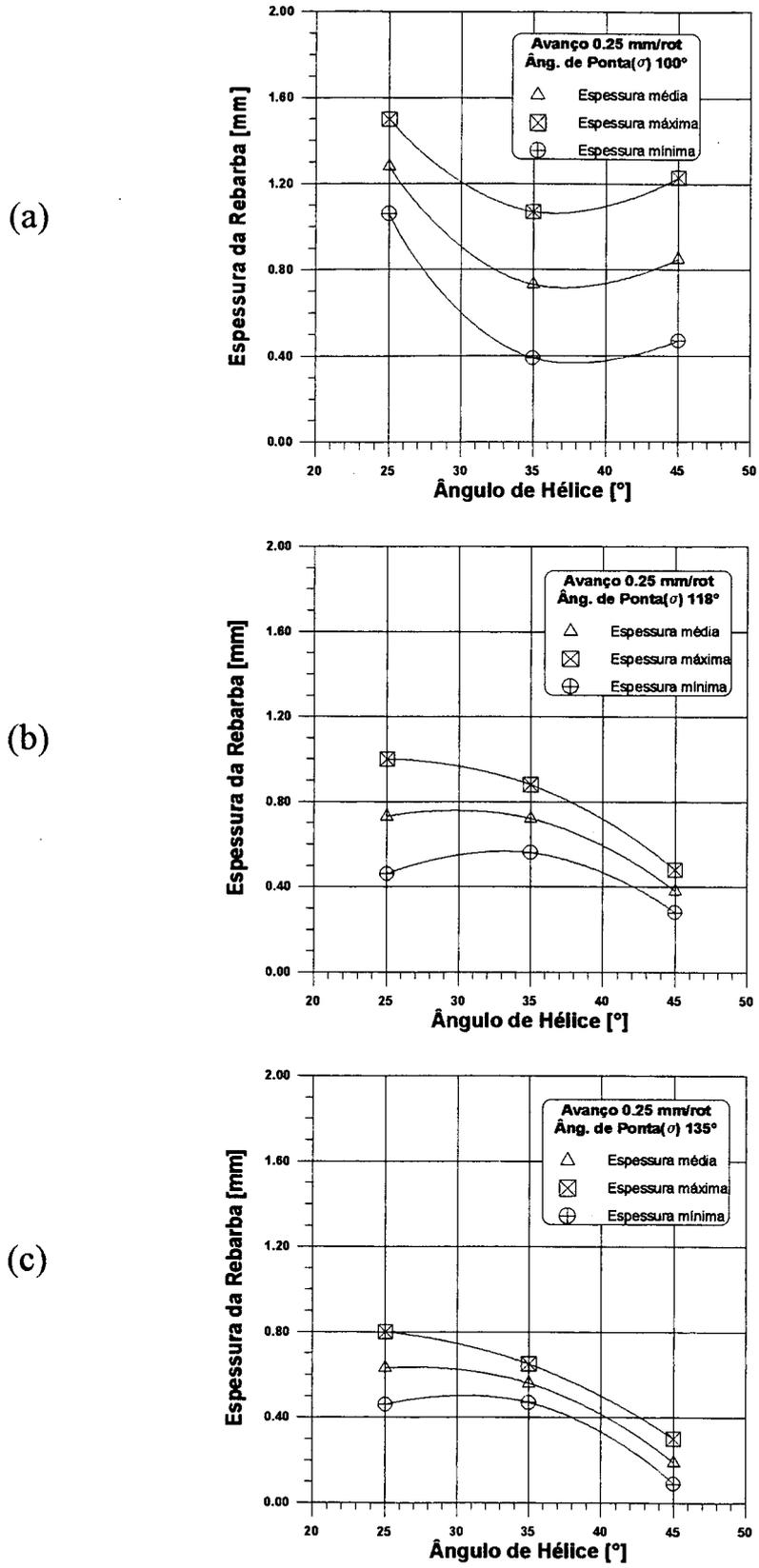


Figura 48 - Influência do ângulo de hélice sobre a espessura da rebarba.

5.2.3.3. Influência do Ângulo de Ponta

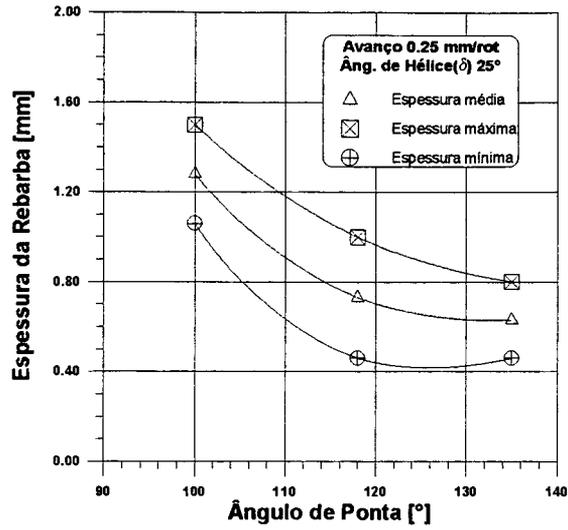
A influência do ângulo de ponta sobre a espessura da rebarba será apresentada, com suas respectivas dispersões, também para o avanço de 0,25 mm/rot.

A figura 49a mostra o comportamento da espessura da rebarba em função do ângulo de ponta quando é usada uma broca com ângulo de hélice de 25°. Apesar da dispersão neste caso ter sido muito grande, pode-se afirmar que houve uma significativa redução da espessura da rebarba com o aumento do ângulo de ponta. Pela análise da curva média observa-se que quando o ângulo de ponta é 100°, a espessura da rebarba é 2,3 mm, e quando este ângulo passa para 135°, a espessura da rebarba cai para um valor em torno de 0,65 mm.

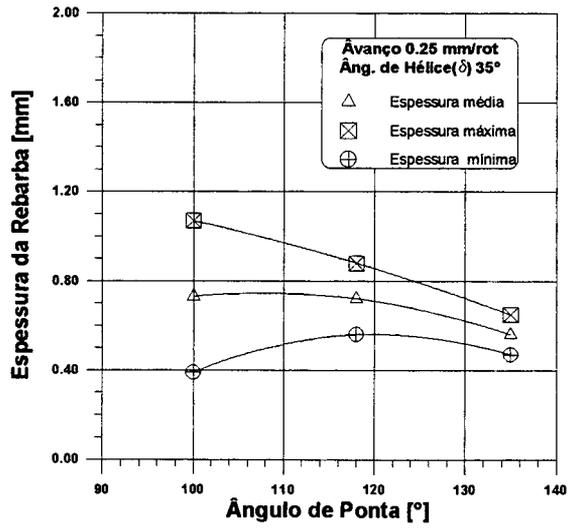
A figura 49b mostra o comportamento da espessura da rebarba em função do ângulo de ponta quando é usada uma broca com ângulo de hélice de 35°. Aqui a dispersão é grande quando o ângulo de ponta é igual a 100° e vai diminuindo quando este ângulo passa para 118° e para 135°. Devido a grande dispersão no início da curva, não é possível estimar o seu comportamento. Portanto, não fica claro a influência do ângulo de ponta sobre a espessura da rebarba quando é usada uma broca com ângulo de hélice de 35°. Pela curva média, existe uma leve tendência para a redução da espessura da rebarba com o aumento do ângulo de ponta.

A figura 49c mostra o comportamento da espessura da rebarba em função do ângulo de ponta quando é usada uma broca com ângulo de hélice de 45°. Como no caso anterior, aqui a dispersão inicial foi muito grande e diminuiu com o aumento do ângulo de ponta. Apesar disto, pode-se afirmar que houve uma redução de espessura da rebarba com o aumento do ângulo de ponta. Tomando a curva média como referência, observa-se que quando o ângulo de ponta é 100°, temos uma espessura de rebarba um pouco acima de 0,8 mm. Quando este ângulo aumenta para 118° a espessura da rebarba cai para um pouco abaixo de 0,4 mm. Quando o ângulo de ponta aumenta para 135° a espessura da rebarba cai ainda mais, para próximo de 0,2 mm.

(a)



(b)



(c)

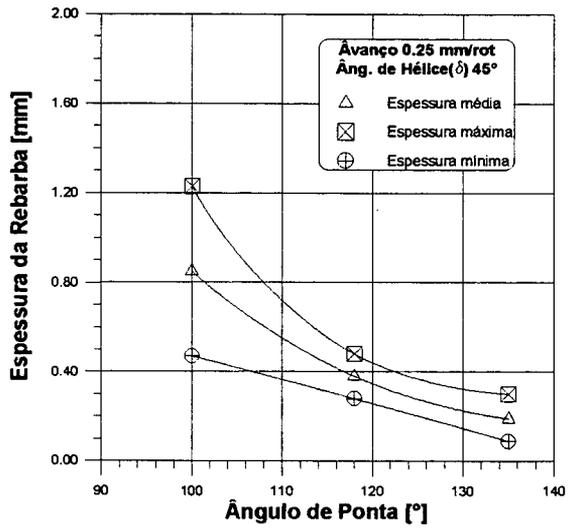


Figura 49 - Influência do ângulo de ponta sobre a espessura da rebarba.

5.2.4. Avaliação pelo Peso das Rebarbas

A avaliação, pelo peso, da quantidade de rebarba formada apresenta a desvantagem de esconder as características dimensionais desta, ou seja, não descreve a forma da rebarba obtida. Uma rebarba com um peso constante pode ser longa e fina (grande altura e pequena espessura) ou curta e espessa (pequena altura e grande espessura).

Aqui o objetivo da avaliação das rebarbas pelo peso era somente para uma complementação dos resultados da altura e espessura das rebarbas. Mesmo assim esta forma de avaliação não teve sucesso.

Quando foram utilizados baixos avanços (principalmente 0,047 e 0,125 mm/rot.), o erro de circularidade do furo foi muito grande, tornando-se impossível tomar um diâmetro representativo para usar no cálculo do volume/peso do furo e assim, pela subtração do peso do cavaco determinar o peso da rebarba.

Somando-se ao grande erro de circularidade, temos o fato do furo apresentar as paredes muito irregulares, o que prejudicava o assentamento da haste do micrômetro sobre a parede do furo.

Os dois problemas citados acima levaram a resultados poucos aceitáveis para o peso da rebarba, e em muitos casos obteve-se valores negativos para esta grandeza.

Quando as rebarbas formadas foram do tipo III e IV, que apresentam pouco volume, o erro cometido na medição do diâmetro do furo, por ser muito grande, leva a valores negativos para o peso da rebarba.

Devido aos problemas apresentados acima, a avaliação das rebarbas pelo peso foi descartada.

Os resultados das medições e cálculos do peso das rebarbas, para os casos onde foi possível, estão todos tabelados no anexo C.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1. Conclusões

Este trabalho mostrou a importância da preocupação com as rebarbas formadas na furação da liga de alumínio 6063-O. Nos últimos anos houve uma evolução muito grande no campo da usinagem dos metais, com o surgimento de modernas máquinas CNC e materiais para ferramentas. Isto levou a uma grande redução dos tempos principais de corte.

O gargalo de muitos sistemas de fabricação está cada vez mais chegando na etapa da pós usinagem, ou seja, na rebarbação. Frequentemente o tempo de rebarbação é da mesma ordem de grandeza do tempo de fabricação, o que justifica a importância da preocupação com as rebarbas.

Este estudo do processo de formação de rebarbas na furação mostrou que estas são fortemente dependentes das condições de corte e da geometria da broca.

Após uma análise geral dos resultados gerados nos experimentos pode-se concluir que:

A pior e a melhor rebarba, sob o ponto de vista de facilidade de remoção, são respectivamente as rebarbas tipo I e IV (ver item 3.8.3, página 70).

A influência do avanço foi marcante sobre a formação de rebarba. Em todos os casos, ou seja, para todas as combinações de geometrias de broca, o tamanho (altura e espessura) da rebarba aumentou com o aumento do avanço. O menor avanço (0,047 mm/rot.) foi o que produziu a menor rebarba. Isto sugere que seja usado o menor avanço possível para se ter o mínimo de rebarba.

Isto parece ser indesejável sob o ponto de vista da produtividade, mas com a utilização de máquinas CNC, este problema pode ser solucionado pelo emprego de dois avanços. Um avanço inicial grande (o recomendado nos manuais e tabelas) para a primeira etapa da furação, e em seguida, quando a broca se aproximar da saída da peça, reduzir este avanço para um valor mínimo

de forma que a broca rompa a peça sob pequeno avanço. Isto pode ser facilmente implementado no programa da máquina.

Na furação da liga de alumínio 6063-O, o ângulo de hélice foi outra variável investigada e que teve bastante influência sobre a formação de rebarba. Com exceção da broca com ângulo de ponta 100° , pode-se afirmar que houve uma grande redução na altura e na espessura das rebarbas com o aumento do ângulo de hélice. A broca com hélice 45° foi a que produziu a menor rebarba.

O ângulo de ponta não apresentou a mesma tendência para todas as combinações deste com o ângulo de hélice. Somente a broca com hélice 45° apresentou clara tendência para a redução da altura da rebarba com o aumento do ângulo de ponta. Já para a análise da espessura, tanto a broca com hélice 25° quanto 45° apresentaram tendência para a redução desta grandeza com o aumento do ângulo de ponta.

A broca que apresentou o melhor resultado em termos de redução de rebarba foi a broca com ângulo de hélice 45° e ângulo de ponta 135° (geometria I).

6.2. Sugestões para Novos Trabalhos

No desenvolvimento deste trabalho ficaram evidenciados inúmeros fatores que contribuem para a formação de rebarba, e que necessitam de um estudo mais detalhado. Assim sendo ficam as seguintes sugestões:

- Estudo dos efeitos de outras geometrias de brocas, outros materiais e outras condições sobre a formação de rebarba.
- Investigação do efeito do fluido de corte sobre a redução de rebarbas.
- Medição das forças de usinagem para verificação do seu comportamento durante a formação da rebarba.
- Realização de uma análise estatística mais completa dos resultados em futuras pesquisas.
- Desenvolvimento e teste de rotinas de furação para aplicações em CN.
- Desenvolvimento de outro método para a medição ou avaliação de rebarbas. Isto pode ser conseguido através de um aparelho de medição sem contato para determinar a altura e espessura da rebarba de forma rápida e com precisão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KO, SungLim. **Burr formation and fracture mechanism at the exit stage of machining metals**. Berkeley: nov. 1989. 182 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) University of California, Berkeley, 1989.
- [2] LINK, R. **Gratbildung und strategien zur gratreduzierung**. Aachen: RWTHA, 1992. 131p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Rheinischwestfalischen Technischen Hochschule Aachen. 1992.
- [3] SULZER, R. Automatisiertes entgraten. **Wt Werkstattstechnik**, v. 81, p. 642-644, 1991.
- [4] TURKOVICH, V. **Comments on burr formation in machining and some forming processes - historical overview**. Seminario apresentado no Scientific Technical Committee "C" (Cutting). Paris, France, 1994.
- [5] TAKAZAWA, K. The challenge of burr technology and its worldwide trends. **Bull. Japan Soc. of Prec. Engg.**, v. 22/3, p. 165-170, Sept. 1988.
- [6] KÖNIG, W. **Minimizing burr formation**. Seminário apresentado no Scientific Technical Committee "C" (cutting). Edinburgh, Scotland, 1993.
- [7] SCHÄFER, F. Gratbildung und entgraten beim umfangsstirnfräsen. **VDI-Z 120**, Nr.1/2, 1978.
- [8] SOFRONAS, A. **The formation and control of drilling burr**. Detroit: Dec. 1975. 114 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - University of Detroit, 1975.

- [9] GILLESPIE, L. K., BLOTTER, P. T. Formation and properties of machining burr. **Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry**, p. 64-74, Feb. 1976.
- [10] SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS. **Tool and manufacturing engineers handbook: materials, finishing and coating**. 4. ed. v. 3, cap. 15. Dearborn, Michigan: SME, 1985.
- [11] NAKAYAMA, K., ARAI, M. Burr formation in metal cutting. **Annals of the CIRP**, v. 36/1, p. 33-36, 1987.
- [12] HASHIMURA, M., DORNFELD, D. Analysis of three-dimensional burr formation in oblique cutting. **Annals of the CIRP**, v. 44/1, p. 27-30, 1995.
- [13] ARZT, P. Why burrs form and how to avoid them. **Metalworking**, p. 44-45, June 1967.
- [14] HASHIMURA, M., CHANG, Y.P. Analysis of burr formation mechanism in orthogonal cutting using micro machining and FEM. **Research Reports 1994/95**. edited by David A. Dornfeld and Dan Abels. LMA, UC Berkeley. Mar. 1995.
- [15] GUO, Y. Analysis of burr formation in drilling process. **Research Reports 1994/95**. edited by David A. Dornfeld and Dan Abels. Laboratory for Manufacturing Automation. University of California, Berkeley. Mar. 1995.
- [16] STEIN, J., AFZAL, A. The exit burrs produced by drilling. **Research Reports 1993/94**. edited by David A. Dornfeld, Julie Stein and Madhu Babu. Laboratory for Manufacturing Automation. University of California, Berkeley. Mar. 1994.
- [17] STEIN, J. The exit burrs produced by drilling. **Research Reports 1994/95**. edited by David A. Dornfeld and Dan Abels. LMA, UC Berkeley. Mar., 1995.

- [18] KÖNIG, W., WEINGAERTNER, W.L. **Tornear, fresar e furar**. Traduzido a adaptado do *Fertigungsverfahren: Drehen, Frasen, Bohren*. Florianópolis. UFSC. 1990.
- [19] STEMMER, C.E. **Ferramentas de corte: ferramenta simples de tornear**. Florianópolis. Ed. da UFSC. 3. ed., 1993.
- [20] STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1992.
- [21] KAWAMURA, S., YAMAKAWA, J. Formation and growing up process of grinding burrs. **Bull. Japan Soc. of Prec. Engg.**, v. 23, n. 3, p.194-199, Sept. 1989.
- [22] ADACHI, K., ARAI, N., HARADA, S., OKITA, K., WAKISAKA, S. A study on burr in low frequency vibratory drilling. **Bull. Japan Soc. of Prec. Engg.**, v 21, n.4, p. 258-264, Dec. 1987.
- [23] TAKEYAMA, H., KATO, S. Burrless drilling by means of ultrasonic vibration. **Annals of the CIRP**, v. 40/1, p. 83-86, 1991.
- [24] STUTTGART, W. S. Kann entgraten geplant werden? **Werkstatt und Betrieb**, v. 122, n. 1, p. 55-57, Jan. 1989.
- [25] GILLESPIE, L. K. **Advances in deburring**, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, 1978.
- [26] KÖNIG, W., BAUER, K. Strömungsschleiten mit diamant und CBN. **IDR-Industrie Diamanten Rundschau**, p. 94-98, Feb. 1992.
- [27] STACKHOUSE, J. Usinagem por fluxo abrasivo: fim de rebarbas até em canais difíceis. Tradução: Noberto P. Lima, Adaptação: Alexandre T. Simon. **Máquinas e Metais**, p. 28-31, fev. 1991.

- [28] FLOWING abrasives deburr parts. **American Machinist**, v. 118, n. 6, p. 53-55, Mar. 1974.
- [29] PILZ, O. Entgraten, abrunden und polieren durch preßläppen. **Werkstatt und Betrieb**, v. 114, n. 10, p. 739-740, 1981.
- [30] HAEUSER, K. Drucklaeppen glattet und entgratet in einem abbeitsgang. **Werkstatt und Betrieb**, v. 119, n. 1, p. 51-56, 1986.
- [31] SCHLATTER, M., WARNECKE, H. J., PREZYLENK, K. Entgraten durch hochdruckwasserstrahlen. **Wt-Z.. ind. Fertig.**, v. 75, p.425-429, 1985.
- [32] MCHUGH, B. Deburring basics. **Tooling and Production**, v. 55, n. 2, p. 52-53, May 1989.
- [33] BAECHLE, F. Entgraten durch buersten. **Werkstatt und Betrieb**, v.116, n. 10, p. 763-765, 1981.
- [34] DOBBINS, D. B. Ultrafine deburring with microabrasives. **Tooling and Production**, v. 53, n. 8, p. 63-65, Nov. 1987.
- [35] RISKO, D.G. A ECM remove rebarbas e gera raios precisos em segundos. Tradução: Noberto P. Lima, Adaptação: Alexandre T. Simon. **Máquinas e Metais**, p. 46-53, jul. 1991.
- [36] DEGROAT, G. ECM deburring-with graphites. **American Machinist**, v. 113, n. 24, p.78-79, Dec. 1969.
- [37] MORTENSEN. A. Uma ferramenta robotizada com controle integrado de força usando superabrasivos. Tradução: Noberto P. Lima. Adaptação: Alexandre T. Simon. **Máquinas e Metais**, p. 60-74, mar. 1995.

- [38] HILTI, D. Entgraten spanend gefertigter werkstuecke mit hilfe von industrieroboten. **Werkstatt und Betrieb**, v. 119, n. 2, p. 127-129. Feb. 1986.
- [39] ROBOTS: ready, aim, deburr!. **Machine and Tool - Blue Book**, p. 61-63, May 1987.
- [40] LEE, S.H. Laser deburring. **Research Reports 1994/95**. edited by David A. Dornfeld and Dan Abels. LMA, UC Berkeley. Mar. 1995.
- [41] LEE, S. H. Deburring using a high-power laser. **Research Reports 1993/94**. edited by David A. Dornfeld, Julie Stein and Madhu Babu. LMA, UC Besrkeley. Mar. 1994.
- [42] TEIXEIRA, C. R. **Influência dos erros geométricos de afiação nas brocas helicoidais de aço rápido na qualidade dos furos produzidos**. Florianópolis: jul. 1995. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.
- [43] WEINGAERTNER, W. L., SCHROETER, R. B. **Tecnologia de usinagem do alumínio e suas ligas**. São Paulo, Alcan alumínio do Brasil, 1. ed., 1990.
- [44] SKF Ferramentas S.A. **Manual Técnico SKF**. São Paulo. SKF Ferramentas S.A. 261p. 1987.
- [45] SHIKATA, H. An experimental investigation of sheet metal drilling. **Annals of the CIRP**, v. 29/1, p. 85-88, 1980.
- [46] LOPES, J. C. O., **Furação por escoamento e rosqueamento por conformação**. Florianópolis: mar. 1994. 192 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, 1994.
- [47] GONÇALVES, A. A. **Metrologia: Parte 1**. Florianópolis: UFSC. Apostila. Não paginado.

ANEXO A

Nomenclatura das brocas Helicoidais Segundo a Norma ABNT - NBR 6176 (DIN 1412)

Dimensões da broca - As brocas são classificadas pelo seu diâmetro externo, que deve estar dentro da tolerância h8. Quanto ao comprimento, distingue-se o comprimento total da broca, o comprimento da hélice e o comprimento da haste, (figura 50)

Haste - A haste é para a fixação da broca, podendo ser cônica ou cilíndrica (figura 50).

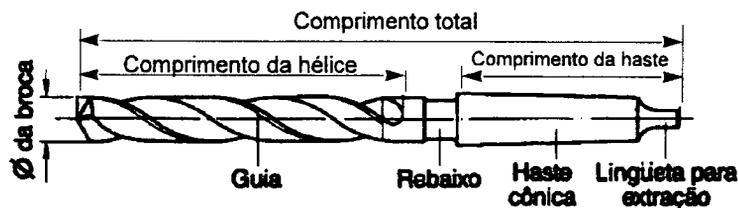


Figura 50 - Nomenclatura de uma broca helicoidal.

Gume principal - É composto pela parcela do gume localizado no lado geométrico da ferramenta que se mantém no sentido de avanço da mesma.

A parte cortante do gume principal pode ser analisada de forma análoga a uma ferramenta simples de corte. Na parte cortante ocorre a separação do material da peça (formação do cavaco). Os dois gumes, vistos de frente, são paralelos entre si e vistos de lado formam entre si o ângulo de ponta da broca.

Gume transversal - Situado na ponta da broca, liga entre si as partes cortantes do gume principal (figura 51). Seu comprimento depende do diâmetro da alma (núcleo da broca).

Na parte central da broca o sentido de corte apresenta uma inclinação maior que o ângulo de incidência, de forma que as condições de corte do gume transversal são péssimas. No centro da broca a velocidade efetiva de corte é a velocidade de avanço, de forma que todo o material a ser cortado tem que ser extrudado para as regiões cortantes do gume principal.

Guias - As guias proporcionam um apoio lateral à broca, responsável por direcioná-la no furo. As guias atuam também como gumes secundários da broca (figura 51).

Canais helicoidais - Representam a face da cunha de corte da broca e são responsáveis pela retirada dos cavacos de dentro do furo (figura 51).

Quina de corte - Na quina de corte tem-se a transição do gume principal para a guia (figura 51). Na quina tem-se as mais alta velocidades de corte e é onde ocorre as maiores solicitações térmicas.

Flanco - O flanco é inclinado pelo ângulo de incidência de modo que a broca entre em contato com o material da peça apenas na região do gume principal.

Face - É a região da ferramenta sobre a qual os cavacos são formados e, na sua continuidade transportados para fora do furo através dos canais.

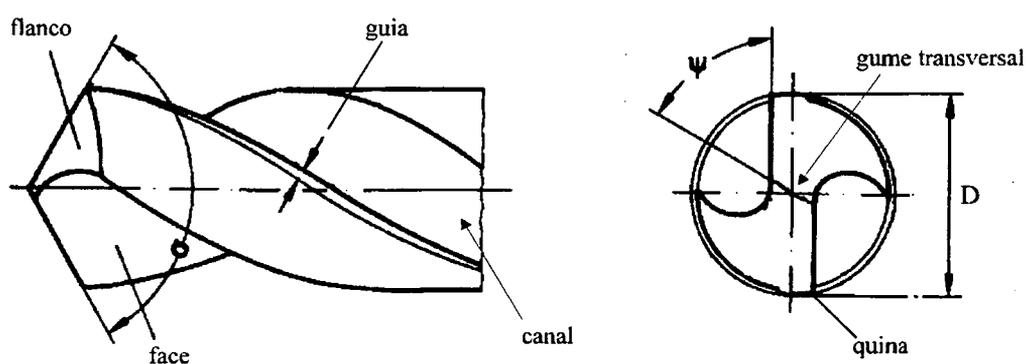


Figura 51 - Partes integrantes de uma broca helicoidal.

Ângulo de ponta (σ) - É o ângulo formado entre as partes cortantes do gume principal que devem está simetricamente posicionados em relação ao eixo da broca (figura 52). Para os ângulos

de hélices usuais, o ângulo de ponta de 118° , produz gumes principais retos. Para ângulos maiores, os gumes tornam-se côncavos. Para ângulos menores que 118° , os gumes principais ficam convexos.

Ângulo de hélice (δ) - O ângulo de hélice é o ângulo da helicóide formada pelos canais da broca, medido no diâmetro externo (figura 52). As hélices usualmente são à direita. A norma ABNT-PB-506 (DIN 1836) classifica três tipos de brocas quanto ao ângulo de hélice: Tipo N (normal), TipoH (para materiais duros e frágeis) e Tipo W (para materiais moles).

Ângulo de saída (γ_f) - É o ângulo responsável pelo corte do material. Para as brocas helicoidais, com afiação normal, o valor do ângulo de saída é variável ao longo dos gumes cortantes, sendo que no diâmetro externo (na quina) o seu valor é aproximadamente igual ao ângulo de hélice.

Ângulo de incidência (α) - O ângulo de incidência é gerado por uma afiação adequada, obtido pelo rebaixamento do flanco (figura 52). Usualmente emprega-se ângulos entre 12 e 15 graus. O ângulo de incidência grande evita o esmagamento do material pelo flanco da broca e afeta favoravelmente a força de avanço, contudo se o seu valor for excessivo, ocorre uma redução na resistência da cunha.

Ângulo do gume transversal (ψ) - É o ângulo formado entre os gumes cortantes e o gume transversal (figura 52). O valor deste ângulo é afetado diretamente pelo valor do ângulo de incidência. Razão pela qual se verifica o ângulo de incidência pela observação do ângulo do gume transversal (ψ).

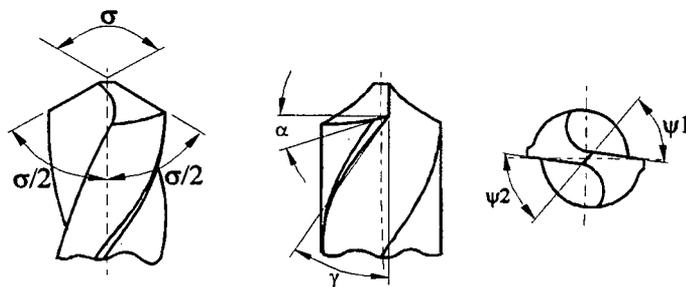


Figura 52 - Ângulos na ponta da broca helicoidal.

ANEXO B

Resultados das Medições das Características Geométricas das brocas

Utilizadas nos Experimentos

Broca	Âng. de incidência (α_1)	Âng. de incidência (α_2)	Âng. de ponta (σ)	Âng. de hélice (δ)
A	12° 20'	12° 30'	103° 00'	24° 40'
B	11° 30'	11° 00'	118° 30'	24° 00'
C	10° 20'	9° 30'	134° 30'	23° 20'
D	11° 50'	12° 30'	102° 00'	34° 50'
E	11° 00'	10° 20'	118° 40'	35° 40'
F	9° 10'	9° 10'	134° 00'	34° 50'
G	13° 00'	12° 30'	102° 00'	45° 30'
H	11° 10'	11° 50'	116° 40'	45° 00'
I	9° 00'	9° 00'	132° 40'	44° 50'

ANEXO C

Broca: A Chapa: 09

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	ø 1 [mm]	ø 2 [mm]	Diâmet. Médio [mm]	Peso do Cavaco [g]	Área do Furo [mm ²]	Volume do Furo [mm ³]	Peso do Furo [g]	Peso da Rebarba [g]	Peso Médio da Rebarba [g]
01	0,047	10,12	10,09	10,10	0,6232	80,118	241,956	0,6388	0,0156	0,0118
02		10,09	10,08	10,08	0,6252	79,801	240,999	0,6362	0,0110	
03		10,08	10,07	10,08	0,6273	79,801	240,999	0,6362	0,0089	
05	0,125	10,06	10,05	10,06	0,4921	79,485	240,045	0,6337	0,1416	0,2524
06		10,08	10,05	10,06	0,3400	79,485	240,045	0,6337	0,2937	
07		10,06	10,04	10,05	0,3104	79,327	239,567	0,6324	0,3220	

Broca: A Chapa: 10

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	ø 1 [mm]	ø 2 [mm]	Diâmet. Médio [mm]	Peso do Cavaco [g]	Área do Furo [mm ²]	Volume do Furo [mm ³]	Peso do Furo [g]	Peso da Rebarba [g]	Peso Médio da Rebarba [g]
01	0,25	10,04	10,02	10,03	0,3689	79,012	238,616	0,6299	0,2610	0,3166
02		10,04	10,02	10,03	0,2768	79,012	238,616	0,6299	0,3531	
03		10,04	10,03	10,04	0,2956	79,169	239,090	0,6312	0,3356	
04	0,5	10,02	10,02	10,02	0,3262	78,854	238,139	0,6287	0,3025	0,3047
05		10,02	10,03	10,02	0,3187	78,854	238,139	0,6287	0,3100	
06		10,03	10,02	10,02	0,3272	78,854	238,139	0,6287	0,3015	

Broca: B Chapa: 01

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	∅ 1 [mm]	∅ 2 [mm]	Diâmet. Médio [mm]	Peso do Cavaco [g]	Área do Furo [mm ²]	Volume do Furo [mm ³]	Peso do Furo [g]	Peso da Rebarba [g]	Peso Médio da Rebarba [g]
05	0,047	10,07	10,10	10,08	0,6207	79,802	241,002	0,6411	0,0204	0,0244
06		10,10	10,12	10,11	0,6135	80,277	242,436	0,6449	0,0314	
08		10,09	10,12	10,10	0,6221	80,118	241,956	0,6436	0,0215	

Broca: B Chapa: 02

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	∅ 1 [mm]	∅ 2 [mm]	Diâmet. Médio [mm]	Peso do Cavaco [g]	Área do Furo [mm ²]	Volume do Furo [mm ³]	Peso do Furo [g]	Peso da Rebarba [g]	Peso Médio da Rebarba [g]
04	0,125	10,05	10,05	10,05	0,5393	79,327	239,568	0,6372	0,0979	0,1294
05		10,03	10,03	10,03	0,4632	79,012	238,616	0,6347	0,1715	
06		10,06	10,05	10,06	0,5198	79,485	240,045	0,6385	0,1187	

Broca: B Chapa: 03

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	∅ 1 [mm]	∅ 2 [mm]	Diâmet. Médio [mm]	Peso do Cavaco [g]	Área do Furo [mm ²]	Volume do Furo [mm ³]	Peso do Furo [g]	Peso da Rebarba [g]	Peso Médio da Rebarba [g]
01	0,250	10,08	10,09	10,08	0,5655	79,801	240,999	0,6410	0,0755	0,1219
02		10,08	10,08	10,08	0,5324	79,801	240,999	0,6420	0,1086	
03		10,06	10,05	10,06	0,4568	79,485	240,045	0,6383	0,1817	

Broca: B Chapa: 04

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	∅ 1 [mm]	∅ 2 [mm]	Diâmet. Médio [mm]	Peso do Cavaco [g]	Área do Furo [mm ²]	Volume do Furo [mm ³]	Peso do Furo [g]	Peso da Rebarba [g]	Peso Médio da Rebarba [g]
01	0,500	10,04	10,03	10,04	0,4426	79,169	239,090	0,6360	0,1934	0,1650
03		10,04	10,04	10,04	0,4223	79,169	239,090	0,6360	0,2137	
05		10,04	10,04	10,04	0,5065	79,169	239,090	0,6360	0,1295	

Broca: C Chapa: 11

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	∅ 1 [mm]	∅ 2 [mm]	Diâmet. Médio [mm]	Peso do Cavaco [g]	Área do Furo [mm ²]	Volume do Furo [mm ³]	Peso do Furo [g]	Peso da Rebarba [g]	Peso Médio da Rebarba [g]
01	0,047	10,42	10,46	10,44	0,6667	85,603	258,521	0,6825	0,0158	0,0223
02		10,24	10,41	10,32	0,6307	83,647	252,614	0,6669	0,0362	
03		10,39	10,41	10,40	0,6623	84,949	256,546	0,6773	0,0150	
04	0,125	10,09	10,11	10,10	0,5857	80,118	241,956	0,6387	0,0530	0,0246
05		10,27	10,11	10,19	0,6328	87,553	246,290	0,6502	0,0174	
06		10,41	10,44	10,42	0,6765	85,276	257,534	0,6799	0,0034	
07	0,250	10,06	10,07	10,06	0,5295	79,485	240,045	0,6337	0,1042	0,1187
08		10,07	10,06	10,06	0,5213	79,485	240,045	0,6337	0,1124	
09		10,05	10,06	10,06	0,4942	79,485	240,045	0,6337	0,1395	

Broca: C Chapa: 12

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	∅ 1 [mm]	∅ 2 [mm]	Diâmet. Médio [mm]	Peso do Cavaco [g]	Área do Furo [mm ²]	Volume do Furo [mm ³]	Peso do Furo [g]	Peso da Rebarba [g]	Peso Médio da Rebarba [g]
01	0,500	10,07	10,04	10,06	0,4852	79,485	240,045	0,6337	0,1485	0,1522
02		10,04	10,10	10,07	0,4846	79,643	240,522	0,6350	0,1504	
03		10,08	10,03	10,06	0,4761	79,485	240,045	0,6337	0,1576	

Broca: D Chapa: 13

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	ø 1 [mm]	ø 2 [mm]	Diâmet. Médio [mm]	Peso do Cavaco [g]	Área do Furo [mm ²]	Volume do Furo [mm ³]	Peso do Furo [g]	Peso da Rebarba [g]	Peso Médio da Rebarba [g]
01	0,047	Furo muito irregular (impossível ter um diâmetro representativo)								
02										
03										
04	0,125	Furo muito irregular (impossível ter um diâmetro representativo)								
05										
06										
07	0,250	10,26	10,25	10,26	0,6157	82,516	249,198	0,6579	0,0422	0,1087
08		10,09	10,07	10,08	0,5325	79,801	240,999	0,6362	0,1037	
09		10,05	10,08	10,06	0,4535	79,485	240,045	0,6337	0,1802	

Broca: D Chapa: 14

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	ø 1 [mm]	ø 2 [mm]	Diâmet. Médio [mm]	Peso do Cavaco [g]	Área do Furo [mm ²]	Volume do Furo [mm ³]	Peso do Furo [g]	Peso da Rebarba [g]	Peso Médio da Rebarba [g]
03	0,500	10,07	10,06	10,06	0,4454	79,485	240,045	0,6337	0,1883	0,2037
04		10,08	10,07	10,08	0,4563	79,801	240,999	0,6362	0,1799	
05		10,07	10,08	10,08	0,3933	79,801	240,999	0,6362	0,2429	

Broca: E Chapa: 05

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	∅ 1 [mm]	∅ 2 [mm]	Diâmet. Médio [mm]	Peso do Cavaco [g]	Área do Furo [mm ²]	Volume do Furo [mm ³]	Peso do Furo [g]	Peso da Rebarba [g]	Peso Médio da Rebarba [g]
01	0,047	Furo muito irregular (impossível ter um diâmetro representativo)								
02										
03										
04	0,125	10,36	10,32	10,34	0,6495	83,647	252,614	0,6669	0,0174	0,0089
05		10,30	10,37	10,34	0,6644	83,647	252,614	0,6669	0,0025	
06		10,09	10,09	10,09	0,6306	79,960	241,480	0,6375	0,0069	
07	0,250	10,07	10,06	10,06	0,5654	79,485	240,045	0,6337	0,0683	0,1025
08		10,08	10,07	10,08	0,5202	79,801	240,999	0,6362	0,1160	
09		10,07	10,06	10,06	0,5116	79,485	240,045	0,6348	0,1232	

Broca: E Chapa: 06

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	∅ 1 [mm]	∅ 2 [mm]	Diâmet. Médio [mm]	Peso do Cavaco [g]	Área do Furo [mm ²]	Volume do Furo [mm ³]	Peso do Furo [g]	Peso da Rebarba [g]	Peso Médio da Rebarba [g]
01	0,500	10,07	10,08	10,08	0,4884	79,801	240,999	0,6362	0,1478	0,1561
02		10,06	10,07	10,06	0,4813	79,485	240,045	0,6348	0,1535	
03		10,06	10,06	10,06	0,4679	79,485	240,045	0,6348	0,1669	

Broca: F Chapa: 15

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	∅ 1 [mm]	∅ 2 [mm]	Diâmet. Médio [mm]	Peso do Cavaco [g]	Área do Furo [mm ²]	Volume do Furo [mm ³]	Peso do Furo [g]	Peso da Rebarba [g]	Peso Médio da Rebarba [g]
01	0,047	Furo muito irregular (impossível ter um diâmetro representativo)								
02										
03										
04	0,125	10,34	10,32	10,33	0,6671	83,898	253,371	0,6689	0,0018	0,0012
05		10,16	10,40	10,28	0,6613	83,020	250,720	0,6619	0,0006	
06		10,21	10,31	10,26	0,6586	82,744	249,886	0,6597	0,0011	
07	0,250	10,09	10,10	10,10	0,6072	80,118	241,956	0,6388	0,0316	0,0360
08		10,11	10,10	10,10	0,6032	80,118	241,956	0,6388	0,0356	
09		10,11	10,09	10,10	0,5981	80,118	241,956	0,6388	0,0407	

Broca: F Chapa: 16

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	∅ 1 [mm]	∅ 2 [mm]	Diâmet. Médio [mm]	Peso do Cavaco [g]	Área do Furo [mm ²]	Volume do Furo [mm ³]	Peso do Furo [g]	Peso da Rebarba [g]	Peso Médio da Rebarba [g]
01	0,500	10,07	10,06	10,06	0,5088	79,485	240,045	0,6337	0,1249	0,1348
02		10,06	10,06	10,06	0,5015	79,485	240,045	0,6337	0,1322	
03		10,06	10,06	10,06	0,4865	79,485	240,045	0,6337	0,1472	

Broca: G Chapa: 17

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	∅ 1 [mm]	∅ 2 [mm]	Diâmet Médio [mm]	Peso do Cavaco [g]	Área do Furo [mm ²]	Volume do Furo [mm ³]	Peso do Furo [g]	Peso da Rebarba [g]	Peso Médio da Rebarba [g]
01	0,047	Furo muito irregular (impossível ter um diâmetro representativo)								
02										
03										
04	0,125	Furo muito irregular (impossível ter um diâmetro representativo)								
05										
06										
07	0,250	10,04	10,03	10,04	0,6014	79,169	239,090	0,6312	0,00298	0,1033
08		10,06	10,02	10,04	0,5311	79,169	239,090	0,6312	0,1001	
09		10,05	10,05	10,05	0,4525	79,327	239,567	0,6324	0,1799	

Broca: G Chapa: 18

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	∅ 1 [mm]	∅ 2 [mm]	Diâmet. Médio [mm]	Peso do Cavaco [g]	Área do Furo [mm ²]	Volume do Furo [mm ³]	Peso do Furo [g]	Peso da Rebarba [g]	Peso Médio da Rebarba [g]
01	0,500	10,04	10,02	10,03	0,4665	78,854	238,139	0,6287	0,1622	0,1871
02		10,04	10,06	10,05	0,4428	79,327	239,567	0,6324	0,1896	
03		10,04	10,04	10,04	0,4217	79,169	239,090	0,6312	0,2095	

Broca: H Chapa: 07

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	∅ 1 [mm]	∅ 2 [mm]	Diâmet. Médio [mm]	Peso do Cavaco [g]	Área do Furo [mm ²]	Volume do Furo [mm ³]	Peso do Furo [g]	Peso da Rebarba [g]	Peso Médio da Rebarba [g]
01	0,047	Furo muito irregular (impossível ter um diâmetro representativo)								
02										
03										
04	0,125	Furo muito irregular (impossível ter um diâmetro representativo)								
05										
06										
07	0,250	10,09	10,11	10,10	0,6262	80,118	241,956	0,6388	0,0126	0,0172
08		10,07	10,10	10,08	0,6173	79,801	240,999	0,6362	0,0189	
09		10,08	10,11	10,10	0,6187	80,118	241,956	0,6388	0,0201	

Broca: H Chapa: 08

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	∅ 1 [mm]	∅ 2 [mm]	Diâmet. Médio [mm]	Peso do Cavaco [g]	Área do Furo [mm ²]	Volume do Furo [mm ³]	Peso do Furo [g]	Peso da Rebarba [g]	Peso Médio da Rebarba [g]
01	0,500	10,10	10,12	10,11	0,6081	80,277	242,436	0,6400	0,0319	0,0333
02		10,09	10,09	10,09	0,6062	79,960	241,479	0,6375	0,0313	
03		10,07	10,08	10,08	0,5995	79,801	240,999	0,6362	0,0367	

Broca: I Chapa: 19

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	ø 1 [mm]	ø 2 [mm]	Diâmet. Médio [mm]	Peso do Cavaco [g]	Área do Furo [mm ²]	Volume do Furo [mm ³]	Peso do Furo [g]	Peso da Rebarba [g]	Peso Médio da Rebarba [g]
01	0,047	Furo muito irregular (impossível ter um diâmetro representativo)								
02										
03										
04	0,125	Furo muito irregular (impossível ter um diâmetro representativo)								
05										
06										
07	0,250	Furo muito irregular (impossível ter um diâmetro representativo)								
08										
09										

Broca: I Chapa: 20

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	ø 1 [mm]	ø 2 [mm]	Diâmet. Médio [mm]	Peso do Cavaco [g]	Área do Furo [mm ²]	Volume do Furo [mm ³]	Peso do Furo [g]	Peso da Rebarba [g]	Peso Médio da Rebarba [g]
01	0,500	10,15	10,16	10,16	0,6036	81,073	244,840	0,6464	0,0428	0,0457
02		10,11	10,13	10,12	0,5932	80,436	242,917	0,6413	0,0481	
03		10,14	10,12	10,13	0,5963	80,595	243,397	0,6426	0,0463	

ANEXO D



Broca: A Chapa: 09

Furo N°	Avanço [mm/rot]	Altura da Rebarba [mm]					Altura Média da Rebarba	Resultados	
		H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H _M			
01	0,047	3,29	4,52	2,74	2,72	3,32	3,17	3,17 ± 1,67	
02		2,97	3,05	3,65	2,29	2,99		4,84	1,50
03		1,51	3,93	3,12	4,22	3,20			
05	0,125	4,41	5,65	4,29	5,53	4,97	5,31	5,31 ± 1,03	
06		5,20	5,03	4,87	5,78	5,22		6,34	4,28
07		5,86	5,60	5,74	5,71	5,73			

Instrumento utilizado: Relógio Comparador

Broca: A Chapa: 10

Furo N°	Avanço [mm/rot]	Altura da Rebarba [mm]					Altura Média da Rebarba	Resultados	
		H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H _M			
01	0,25	5,09	5,41	4,87	5,91	5,32	5,76	5,76 ± 0,90	
02		5,78	5,80	6,31	6,31	6,05		6,66	4,86
03		5,71	6,21	6,14	5,56	5,90			
04	0,5	5,70	6,17	5,62	6,12	5,90	5,83	5,83 ± 0,45	
05		5,39	6,05	6,21	5,70	5,84		6,28	5,38
06		5,49	5,75	6,00	5,72	5,74			

Instrumento utilizado: Relógio Comparador

Broca: B Chapa: 01

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	Altura da Rebarba [mm]					Altura Média da Rebarba	Resultados	
		H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H _M			
05	0,047	4,83	5,39	3,75	4,19	4,54	4,40	4,40 ± 1,59	
06		5,27	3,92	5,27	4,30	4,69		5,99	2,81
08		5,36	3,15	2,82	4,60	3,98			

Instrumento utilizado: Relógio Comparador

Broca: B Chapa: 02

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	Altura da Rebarba [mm]					Altura Média da Rebarba	Resultados	
		H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H _M			
04	0,125	5,44	6,30	5,84	4,80	5,60	5,79	5,79 ± 1,00	
05		6,11	5,64	5,81	5,55	5,78		6,79	4,79
06		5,60	6,44	5,95	6,03	6,00			

Instrumento utilizado: Relógio Comparador

Broca: B Chapa: 03

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	Altura da Rebarba [mm]					Altura Média da Rebarba	Resultados	
		H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H _M			
01	0,25	5,26	4,95	5,00	5,10	5,08	5,36	5,36 ± 0,42	
02		5,45	5,24	5,42	5,37	5,37		5,78	4,94
03		5,61	5,50	5,59	5,77	5,62			

Instrumento utilizado: Relógio Comparador

Broca: B Chapa: 04

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	Altura da Rebarba [mm]					Altura Média da Rebarba	Resultados	
		H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H _M			
01	0,5	5,02	5,77	5,68	5,82	5,57	5,50	5,50 ± 0,49	
03		5,14	5,84	5,80	5,25	5,51		5,99	5,01
06		5,16	5,42	5,21	5,93	5,43			

Instrumento utilizado: Relógio Comparador

Broca: C Chapa: 11

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	Altura da Rebarba [mm]					Altura Média da Rebarba	Resultados	
		H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H _M			
01	0,047	1,03	1,21	1,06	1,25	1,14	1,28	1,28 ± 0,26	
02		1,23	1,35	1,28	1,27	1,28		1,54	1,02
03		1,42	1,47	1,36	1,41	1,42			
04	0,125	2,16	2,14	2,14	2,18	2,16	1,80	1,80 ± 0,75	
05		1,72	1,63	1,72	1,63	1,68		2,55	1,05
06		1,75	1,06	1,60	1,78	1,55			
07	0,25	6,70	6,75	6,95	6,76	6,79	6,65	6,65 ± 0,85	
08		7,05	6,79	6,79	6,86	6,87		7,50	5,80
09		5,81	6,80	6,50	6,02	6,28			

Instrumento utilizado: Relógio Comparador

Broca: C Chapa: 12

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	Altura da Rebarba [mm]					Altura Média da Rebarba	Resultados	
		H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H _M			
01	0,5	6,39	6,79	5,85	5,65	6,17	6,36	6,36 ± 0,72	
02		6,82	5,74	5,82	6,97	6,34		7,08	5,64
03		6,73	6,11	6,64	6,80	6,57			

Instrumento utilizado: Relógio Comparador

Broca: D Chapa: 13

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	Altura da Rebarba [mm]					Altura Média da Rebarba	Resultados	
		H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H _M			
01	0,047	0,55	0,05	0,69	0,07	0,34	0,41	0,41 ± 0,37	
02		0,71	0,67	0,57	0,48	0,61		0,78	0,04
03		0,34	0,12	0,10	0,51	0,27			
04	0,125	1,20	1,12	1,27	1,16	1,19	1,17	1,17 ± 0,30	
05		1,08	1,20	1,26	1,46	1,25		1,47	0,87
06		1,05	1,18	1,17	0,91	1,08			
07	0,25	2,94	3,08	2,64	4,44	3,28	4,21	4,21 ± 1,58	
08		4,70	4,22	4,15	5,05	4,53		5,79	2,63
09		5,05	5,10	4,31	4,86	4,83			

Instrumento utilizado: Relógio Comparador

Broca: D Chapa: 14

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	Altura da Rebarba [mm]					Altura Média da Rebarba	Resultados	
		H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H _M			
03	0,5	5,13	5,07	5,20	5,29	5,17	4,98	4,98 ± 1,10	
04		3,89	4,41	5,13	5,46	4,72		6,08	3,88
05		4,99	4,66	5,22	5,31	5,04			

Instrumento utilizado: Relógio Comparador

Broca: E Chapa: 05

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	Altura da Rebarba [mm]					Altura Média da Rebarba	Resultados	
		H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H _M			
01	0,047	0,33	0,37	0,25	0,61	0,39	0,43	0,43 ± 0,42	
02		0,34	0,84	0,70	0,37	0,56		0,85	0,01
03		0,18	0,57	0,47	0,18	0,35			
04	0,125	0,56	0,37	0,52	0,30	0,44	0,65	0,65 ± 0,80	
05		0,30	0,32	0,37	0,17	0,29		1,45	0,00
06		1,25	1,12	1,08	1,44	1,22			
07	0,25	4,91	5,27	4,29	4,62	4,77	5,21	5,21 ± 1,38	
08		4,69	5,12	5,43	5,88	5,28		6,59	3,83
09		5,41	4,97	6,58	5,32	5,57			

Instrumento utilizado: Relógio Comparador

Broca: E Chapa: 06

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	Altura da Rebarba [mm]					Altura Média da Rebarba	Resultados	
		H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H _M			
01	0,5	4,67	4,64	4,70	4,63	4,66	4,71	4,71 ± 0,22	
02		4,59	4,67	4,70	4,92	4,72		4,93	4,49
03		4,75	4,79	4,80	4,61	4,74			

Instrumento utilizado: Relógio Comparador

Broca: F Chapa: 15

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	Altura da Rebarba [mm]					Altura Média da Rebarba	Resultados	
		H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H _M			
01	0,047	0,02	0,21	0,21	0,22	0,16	0,18	0,18 ± 0,17	
02		0,18	0,29	0,15	0,29	0,23		0,35	0,01
03		0,06	0,16	0,22	0,22	0,16			
04	0,125	0,35	0,39	0,41	0,44	0,40	0,50	0,50 ± 0,34	
05		0,73	0,60	0,67	0,83	0,71		0,84	0,16
06		0,66	0,49	0,38	0,46	0,40			
07	0,25	2,29	2,26	2,08	2,36	2,25	2,41	2,41 ± 0,34	
08		2,58	2,60	2,47	2,51	2,54		2,75	2,07
09		2,48	2,51	2,38	2,43	2,45			

Instrumento utilizado: Relógio Comparador

Broca: F Chapa: 16

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	Altura da Rebarba [mm]					Altura Média da Rebarba	Resultados	
		H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H _M			
01	0,5	5,50	6,10	5,45	5,46	5,63	5,57	5,57 ± 0,54	
02		5,46	5,42	5,37	5,54	5,45		6,11	5,03
03		5,73	5,59	5,65	5,59	5,64			

Instrumento utilizado: Relógio Comparador

Broca: G Chapa: 17

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	Altura da Rebarba [mm]					Altura Média da Rebarba	Resultados	
		H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H _M			
01	0,047	0,53	0,39	0,30	0,56	0,44	0,43	0,43 ± 0,24	
02		0,51	0,33	0,57	0,66	0,52		0,67	0,19
03		0,37	0,26	0,33	0,31	0,32			
04	0,125	0,72	0,66	0,54	0,50	0,60	0,66	0,66 ± 0,29	
05		0,94	0,45	0,51	0,73	0,66		0,95	0,37
06		0,52	0,66	0,83	0,91	0,73			
07	0,25	3,39	3,04	3,08	3,22	3,18	4,20	4,20 ± 1,22	
08		4,94	4,21	4,22	4,76	4,53		5,42	2,98
09		4,00	5,41	5,05	5,12	4,89			

Instrumento utilizado: Relógio Comparador

Broca: G Chapa: 18

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	Altura da Rebarba [mm]					Altura Média da Rebarba	Resultados	
		H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H _M			
01	0,5	3,93	4,11	4,35	4,27	4,16	4,23	4,23 ± 0,31	
02		4,13	4,20	4,15	4,27	4,19		4,54	3,92
03		4,31	4,37	4,43	4,28	4,35			

Instrumento utilizado: Relógio Comparador

Broca: H Chapa: 07

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	Altura da Rebarba [mm]					Altura Média da Rebarba	Resultados	
		H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H _M			
01	0,047	0,62	0,20	0,63	0,22	0,42	0,49	0,49 ± 0,30	
02		0,64	0,20	0,60	0,61	0,51		0,79	0,19
03		0,57	0,67	0,33	0,62	0,55			
04	0,125	0,87	0,89	0,34	1,00	0,78	0,86	0,86 ± 0,53	
05		1,12	1,15	0,67	0,78	0,93		1,39	0,33
06		0,99	0,95	0,68	0,87	0,87			
07	0,25	1,19	1,09	1,50	1,30	1,27	1,48	1,48 ± 0,73	
08		1,26	2,20	1,29	1,81	1,64		2,21	0,75
09		2,03	1,47	1,27	1,30	1,52			

Instrumento utilizado: Relógio Comparador

Broca: H Chapa: 08

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	Altura da Rebarba [mm]					Altura Média da Rebarba	Resultados	
		H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H _M			
01	0,5	2,83	2,60	3,00	3,25	2,92	2,94	2,94 ± 0,35	
02		2,91	2,73	3,21	3,06	2,98		3,29	2,59
03		2,97	2,92	2,87	2,89	2,91			

Instrumento utilizado: Relógio Comparador

Broca: I Chapa: 19

Furo N ^o	Avanço [mm/rot]	Altura da Rebarba [mm]					Altura Média da Rebarba	Resultados	
		H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H _M			
01	0,047	0,13	0,27	0,18	0,18	0,19	0,21	0,21 ± 0,09	
02		0,25	0,26	0,20	0,22	0,23		0,30	0,12
03		0,20	0,26	0,25	0,19	0,22			
04	0,125	0,22	0,40	0,54	1,20	0,59	0,43	0,43 ± 0,78	
05		0,42	0,46	0,29	0,16	0,33		1,21	0,00
06		0,29	0,45	0,24	0,54	0,38			
07	0,25	1,13	0,82	1,04	1,19	1,04	1,19	1,19 ± 0,77	
08		1,48	1,04	0,91	0,89	1,08		1,96	0,42
09		1,39	1,46	1,95	1,06	1,46			

Instrumento utilizado: Relógio Comparador

Broca: I Chapa: 20

Furo N ^o	Avanço [mm/rot]	Altura da Rebarba [mm]					Altura Média da Rebarba	Resultados	
		H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H _M			
01	0,5	2,17	2,10	1,95	2,70	2,23	2,88	2,88 ± 1,37	
02		4,24	4,14	1,95	4,22	3,64		4,25	1,51
03		3,19	3,73	2,14	2,07	2,78			

Instrumento utilizado: Relógio Comparador

ANEXO E

Broca: A Chapa: 09

Furo N ^o	Avanço [mm/rot]	Espessura da Rebarba [mm]					Espessura Média da Rebarba	Resultados	
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E _M			
01 ^①	0,047	0,16	0,20	0,12	0,12	0,15	0,15	0,15 ± 0,07	
02 ^①		0,14	0,16	0,20	0,16	0,16		0,22	0,08
03 ^①		0,10	0,14	0,20	0,14	0,14			
05 ^②	0,125	0,98	1,18	1,09	1,12	1,09	1,22	1,22 ± 0,25	
06 ^②		1,17	1,30	1,22	1,31	1,25		1,47	0,97
07 ^②		1,24	1,35	1,30	1,44	1,33			

Instrumento utilizado: ① Paquímetro, ② Microscópio

Broca: A Chapa: 10

Furo N ^o	Avanço [mm/rot]	Espessura da Rebarba [mm]					Espessura Média da Rebarba	Resultados	
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E _M			
01	0,25	1,26	1,07	1,12	1,20	1,16	1,28	1,28 ± 0,22	
02		1,29	1,37	1,24	1,40	1,32		1,50	1,06
03		1,32	1,33	1,31	1,44	1,35			
04	0,5	1,31	1,42	1,29	1,42	1,36	1,34	1,34 ± 0,09	
05		1,29	1,35	1,30	1,41	1,34		1,43	1,25
06		1,26	1,31	1,26	1,42	1,31			

Instrumento utilizado: Microscópio

Broca: B Chapa: 01

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	Espessura da Rebarba [mm]					Espessura Média da Rebarba	Resultados	
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E _M			
05	0,047	0,20	0,28	0,22	0,20	0,22	0,25	0,25 ± 0,13	
06		0,20	0,24	0,28	0,22	0,24		0,38	0,12
08		0,30	0,28	0,28	0,36	0,30			

Instrumento utilizado: Paquímetro

Broca: B Chapa: 02

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	Espessura da Rebarba [mm]					Espessura Média da Rebarba	Resultados	
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E _M			
04	0,125	0,54	0,65	0,62	0,65	0,62	0,73	0,73 ± 0,20	
05		0,79	0,73	0,83	0,85	0,80		0,93	0,53
06		0,69	0,80	0,81	0,82	0,78			

Instrumento utilizado: Microscópio

Broca: B Chapa: 03

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	Espessura da Rebarba [mm]					Espessura Média da Rebarba	Resultados	
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E _M			
01	0,25	0,51	0,52	0,49	0,72	0,56	0,73	0,73 ± 0,27	
02		0,67	0,69	0,69	0,76	0,70		1,00	0,46
03		0,94	0,89	0,99	0,94	0,94			

Instrumento utilizado: Microscópio

Broca: B Chapa: 04

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	Espessura da Rebarba [mm]					Espessura Média da Rebarba	Resultados	
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E _M			
01	0,5	0,98	1,01	0,98	1,05	1,00	0,95	0,95 ± 0,19	
03		1,03	1,06	1,08	1,06	1,06		1,14	0,76
06		0,77	0,77	0,78	0,87	0,80			

Instrumento utilizado: Microscópio

Broca: C Chapa: 11

Furo N ^o	Avanço [mm/rot]	Espessura da Rebarba [mm]					Espessura Média da Rebarba	Resultados	
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E _M			
01 ^①	0,047	0,18	0,22	0,16	0,18	0,18	0,21	0,21 ± 0,09	
02 ^①		0,20	0,20	0,24	0,20	0,21		0,30	0,12
03 ^①		0,16	0,24	0,28	0,24	0,23			
04 ^①	0,125	0,32	0,30	0,34	0,34	0,32	0,33	0,33 ± 0,07	
05 ^①		0,28	0,34	0,36	0,30	0,32		0,40	0,26
06 ^①		0,38	0,36	0,28	0,36	0,34			
07 ^②	0,25	0,47	0,53	0,54	0,64	0,54	0,63	0,63 ± 0,17	
08 ^②		0,58	0,63	0,76	0,77	0,68		0,80	0,46
09 ^②		0,61	0,70	0,66	0,75	0,68			

Instrumento utilizado: ① Paquímetro, ② Microscópio

Broca: C Chapa: 12

Furo N ^o	Avanço [mm/rot]	Espessura da Rebarba [mm]					Espessura Média da Rebarba	Resultados	
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E _M			
01	0,5	0,68	0,84	0,72	0,87	0,78	0,78	0,78 ± 0,11	
02		0,74	0,78	0,71	0,81	0,76		0,89	0,68
03		0,81	0,78	0,81	0,83	0,81			

Instrumento utilizado: Microscópio

Broca: D Chapa: 13

Furo N ^o	Avanço [mm/rot]	Espessura da Rebarba [mm]					Espessura Média da Rebarba	Resultados	
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E _M			
01 ^①	0,047	0,06	0,04	0,10	0,08	0,07	0,08	0,08 ± 0,06	
02 ^①		0,06	0,10	0,06	0,08	0,08		0,14	0,02
03 ^①		0,06	0,12	0,10	0,08	0,09			
04 ^①	0,125	0,14	0,16	0,10	0,12	0,13	0,15	0,15 ± 0,07	
05 ^①		0,20	0,10	0,18	0,18	0,16		0,22	0,08
06 ^①		0,18	0,16	0,16	0,18	0,17			
07 ^②	0,25	0,41	0,47	0,44	0,58	0,48	0,73	0,73 ± 0,34	
08 ^②		0,69	0,79	0,67	0,78	0,73		1,07	0,39
09 ^②		0,98	1,06	0,87	0,98	0,97			

Instrumento utilizado: ① Paquímetro, ② Microscópio

Broca: D Chapa: 14

Furo N ^o	Avanço [mm/rot]	Espessura da Rebarba [mm]					Espessura Média da Rebarba	Resultados	
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E _M			
03	0,5	1,11	1,22	1,08	1,20	1,15	1,18	1,18 ± 0,19	
04		1,10	1,19	1,12	1,26	1,17		1,37	0,99
05		1,14	1,22	1,21	1,36	1,23			

Instrumento utilizado: Microscópio

Broca: E Chapa: 05

Furo N ^o	Avanço [mm/rot]	Espessura da Rebarba [mm]					Espessura Média da Rebarba	Resultados	
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E _M			
01	0,047	0,06	0,10	0,06	0,08	0,08	0,07	0,07 ± 0,07	
02		0,08	0,04	0,06	0,04	0,06		0,14	0,00
03		0,02	0,10	0,08	0,10	0,08			
04	0,125	0,14	0,12	0,18	0,06	0,12	0,20	0,20 ± 0,20	
05		0,06	0,06	0,20	0,18	0,12		0,40	0,00
06		0,32	0,40	0,36	0,38	0,36			
07	0,25	0,62	0,58	0,62	0,60	0,60	0,72	0,72 ± 0,16	
08		0,80	0,78	0,72	0,70	0,75		0,88	0,56
09		0,82	0,74	0,82	0,80	0,80			

Instrumento utilizado: Paquímetro

Broca: E Chapa: 06

Furo N ^o	Avanço [mm/rot]	Espessura da Rebarba [mm]					Espessura Média da Rebarba	Resultados	
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E _M			
01	0,5	0,87	0,82	0,83	0,85	0,84	0,88	0,88 ± 0,09	
02		0,86	0,83	0,92	0,93	0,88		0,97	0,79
03		0,93	0,94	0,96	0,90	0,93			

Instrumento utilizado: Microscópio

Broca: F Chapa: 15

Furo N ^o	Avanço [mm/rot]	Espessura da Rebarba [mm]					Espessura Média da Rebarba	Resultados	
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E _M			
01 [Ⓢ]	0,047	0,02	0,10	0,08	0,14	0,08	0,11	0,11 ± 0,11	
02 [Ⓢ]		0,10	0,12	0,18	0,08	0,12		0,22	0,00
03 [Ⓢ]		0,06	0,16	0,14	0,16	0,13			
04 [Ⓢ]	0,125	0,10	0,24	0,20	0,08	0,16	0,18	0,18 ± 0,12	
05 [Ⓢ]		0,16	0,16	0,18	0,24	0,18		0,30	0,06
06 [Ⓢ]		0,20	0,18	0,20	0,22	0,20			
07 [Ⓢ]	0,25	0,51	0,57	0,55	0,56	0,55	0,56	0,56 ± 0,09	
08 [Ⓢ]		0,51	0,56	0,52	0,64	0,56		0,65	0,47
09 [Ⓢ]		0,55	0,60	0,54	0,58	0,57			

Instrumento utilizado: Ⓢ Paquímetro, Ⓢ Microscópio

Broca: F Chapa: 16

Furo N ^o	Avanço [mm/rot]	Espessura da Rebarba [mm]					Espessura Média da Rebarba	Resultados	
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E _M			
01	0,5	0,70	0,71	0,65	0,72	0,70	0,73	0,73 ± 0,11	
02		0,67	0,69	0,66	0,82	0,71		0,84	0,62
03		0,80	0,75	0,72	0,83	0,78			

Instrumento utilizado: Microscópio

Broca: G Chapa: 17

Furo N ^o	Avanço [mm/rot]	Espessura da Rebarba [mm]					Espessura Média da Rebarba	Resultados	
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E _M			
01 ^①	0,047	0,10	0,08	0,06	0,10	0,08	0,08	0,08 ± 0,06	
02 ^①		0,08	0,08	0,06	0,10	0,08		0,14	0,02
03 ^①		0,06	0,08	0,10	0,04	0,07			
04 ^①	0,125	0,18	0,20	0,10	0,12	0,15	0,16	0,16 ± 0,08	
05 ^①		0,20	0,18	0,12	0,20	0,18		0,24	0,08
06 ^①		0,10	0,16	0,16	0,18	0,15			
07 ^②	0,25	0,51	0,53	0,53	0,53	0,52	0,85	0,85 ± 0,38	
08 ^②		0,86	0,96	0,86	0,91	0,90		1,23	0,47
09 ^②		1,06	1,12	1,06	1,22	1,12			

Instrumento utilizado: ① Paquímetro, ② Microscópio

Broca: G Chapa: 18

Furo N ^o	Avanço [mm/rot]	Espessura da Rebarba [mm]					Espessura Média da Rebarba	Resultados	
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E _M			
01	0,5	1,25	1,16	1,20	1,26	1,22	1,25	1,25 ± 0,14	
02		1,36	1,15	1,23	1,20	1,24		1,39	1,11
03		1,35	1,19	1,38	1,25	1,29			

Instrumento utilizado: Microscópio

Broca: H Chapa: 07

Furo N ^o	Avanço [mm/rot]	Espessura da Rebarba [mm]					Espessura Média da Rebarba	Resultados	
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E _M			
01	0,047	0,04	0,08	0,10	0,06	0,07	0,06	0,06 ± 0,06	
02		0,06	0,02	0,04	0,10	0,06		0,12	0,00
03		0,08	0,06	0,04	0,06	0,06			
04	0,125	0,10	0,06	0,06	0,12	0,08	0,10	0,10 ± 0,08	
05		0,10	0,12	0,10	0,10	0,10		0,18	0,02
06		0,16	0,10	0,08	0,10	0,11			
07	0,25	0,30	0,34	0,32	0,32	0,32	0,38	0,38 ± 0,10	
08		0,44	0,36	0,38	0,40	0,40		0,48	0,28
09		0,36	0,40	0,46	0,44	0,42			

Instrumento utilizado: Paquímetro

Broca: H Chapa: 08

Furo N ^o	Avanço [mm/rot]	Espessura da Rebarba [mm]					Espessura Média da Rebarba	Resultados	
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E _M			
01	0,5	0,44	0,48	0,44	0,48	0,46	0,51	0,51 ± 0,11	
02		0,50	0,52	0,50	0,56	0,52		0,62	0,40
03		0,60	0,54	0,46	0,60	0,55			

Instrumento utilizado: Paquímetro

Broca: I Chapa: 19

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	Espessura da Rebarba [mm]					Espessura Média da Rebarba	Resultados	
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E _M			
01	0,047	0,08	0,08	0,04	0,04	0,06	0,06	0,06 ± 0,04	
02		0,04	0,08	0,04	0,08	0,06		0,10	0,02
03		0,06	0,06	0,04	0,06	0,06			
04	0,125	0,12	0,06	0,12	0,12	0,10	0,09	0,09 ± 0,05	
05		0,06	0,10	0,10	0,06	0,08		0,14	0,04
06		0,04	0,08	0,10	0,10	0,08			
07	0,25	0,14	0,12	0,10	0,12	0,12	0,19	0,19 ± 0,11	
08		0,18	0,20	0,16	0,18	0,18		0,30	0,09
09		0,22	0,20	0,28	0,22	0,28			

Instrumento utilizado: Paquímetro

Broca: I Chapa: 20

Furo Nº	Avanço [mm/rot]	Espessura da Rebarba [mm]					Espessura Média da Rebarba	Resultados	
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E _M			
01	0,5	0,45	0,57	0,50	0,57	0,52	0,58	0,58 ± 0,14	
02		0,58	0,64	0,57	0,65	0,61		0,72	0,44
03		0,63	0,60	0,58	0,68	0,62			

Instrumento utilizado: Microscópio