

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MON
621
B574i
TES/ME

INFLUÊNCIA DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS NO PROCESSO DE
ALARGAMENTO DE UMA LIGA DE ALUMÍNIO-SILÍCIO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia por:

ALEXANDRE ARAÚJO BEZERRA

como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

DIRBI/UFU



1000186994

Banca Examinadora:

Prof^o Dr. Álisson Rocha Machado (UFU) - Orientador.

Prof^o Dr. Claudionor Cruz (UFU).

Prof^a Dr^a. Noemia Gomes de Mattos de Mesquita (UFPE).

Eng^o Antônio Maria de Souza Júnior (FIAT Automóveis S.A.).

Uberlândia, março de 1998.

BEZERRA, A.A. (1998). *Influência dos Principais Parâmetros no Processo de Alargamento de uma Liga de Alumínio-Silício*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 139 p.

RESUMO

O propósito deste trabalho consiste em avaliar a estabilidade dimensional (diâmetro, cilíndricidade e circularidade) e o acabamento superficial (rugosidade) de furos cilíndricos obtidos pelo processo de alargamento com alargadores de lâminas soldadas de metal duro K10 na usinagem da liga fundida hipoeutética de alumínio-silício 62 (UNI). Para tanto variou-se alguns dos principais parâmetros de usinagem tais como sobremetal, velocidade de corte, avanço e fluido de corte, além de alguns elementos geométricos do alargador como o ângulo de hélice, o número de lâminas, o guia cilíndrico e o acabamento da superfície de saída das lâminas do mesmo. Durante a usinagem, a potência consumida foi monitorada por um sensor de corrente que utiliza efeito Hall. Esta avaliação consistiu em verificar a influência dos principais parâmetros sobre a qualidade final dos furos, o que permitiu otimizar as condições de corte do processo. A superfície alargada dos furos foi analisada no Microscópio Eletrônico de Varredura de modo a melhor elucidar os resultados dos ensaios. No geral, uma profundidade de corte pequena, pequenos valores de velocidade de corte, grandes avanços, alargadores de canais retos, número de lâminas elevados (5), pequenos valores da dimensão do guia cilíndrico, acabamento do plano de saída com rugosidade em torno de $0,05 \mu\text{m}$ (parâmetro Ra) e utilização do fluido de corte semi-sintético, aqui denominado fluido número 1, contribuem para a obtenção de resultados satisfatórios quanto à qualidade dos furos alargados.

BEZERRA, A.A. (1998). *Influence of the Main Parameters in Reaming of an Aluminium-Silicon Alloy*, M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, 139 p.

ABSTRACT

The purpose of this work is to evaluate the dimensional stability (diameter, cylindricity and circularity) and surface finishing (roughness) of cylindrical holes produced by reaming process with K10 cemented carbide welded blade reamers in aluminium-silicon 62 (UNI) hypoeutectic cast alloy under different cutting conditions. The following parameter were individually varied: depth of cut, cutting speed, feed rate, cutting fluids, helix angle, number of blades, margin and rake face finishing. During machining, power consumption was recorded by a Hall current sensor. This evaluation consisted in checking the influence of these parameters on the final quality of the holes, which allowed to optimise the cutting conditions of the process. Reamed holes surface was analyzed within scanning electron microscope. Generally, a small depth of cut, low cutting speeds, high feed rates, straight-flute reamers, high number of blades (5), small values of margins, surface roughness of the rake face of the blades around 0,05 μm (parameter Ra) and the use of a semi-synthetic cutting fluid, called here cutting fluid number 1, contribute for the achievement of satisfactory results in terms of hole qualities.

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Álisson R. Machado, pela orientação e pelo suporte técnico fundamental necessários à realização desta dissertação.

A todos os membros do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU-UFU), em especial ao técnico Reginaldo F. de Souza, ao doutorando Wisley F. Sales, aos mestrandos Anderson C. A. de Melo e Flávio J. da Silva, e aos alunos de Iniciação Científica Marcelo F. Barbosa e Márcio A. Cordeiro.

Aos membros do Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM-UFU), em especial aos técnicos Ivo Vieira, Ângela M. S. Andrade e Tereza C. G. Maia, e ao professor Sinésio Domingues Franco, pela ajuda relativa à caracterização metalográfica do material do corpo de prova e análise das superfícies usinadas no MEV.

À Oficina Mecânica, em especial ao técnico Carlos H. F. Vieira.

Ao Eng^o André L. Vasconcellos, às professoras Vera L. D. S. Franco e Sônia A. G. Oliveira, ao mestrando Admilson V. da Costa e ao desenhista Márcio Melazo pela atenção e colaboração dada ao presente trabalho.

A Secretaria do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFU, em especial a Janete A. Fernandes e a Marta F. de Queiroz.

A empresa FIAT Automóveis S.A., em especial ao Engenheiro Antônio M. de Souza Júnior e aos Técnicos Walter Seppe e Márcio G. Zarattini, pelo apoio fundamental à realização deste trabalho.

A todos os fornecedores de ferramentas e de materiais necessários à realização dos ensaios: BMD pelos alargadores; TWILL pelas brocas; TEKSID pelas barras de AISi; Tutela, Shell e Castrol pelos fluidos de corte.

Ao suporte financeiro da CAPES, através da concessão da bolsa de estudo.

A todos os meus colegas da Pós-Graduação e aos meus grandes companheiros da República *Jurassic Park*: Alexandre Carlos, Anderson, Flávio, Francisco Aurilo, Hélio, Jalon, Marcelo, Rouverson e Sandro.

Em especial, à minha namorada Rejane M. da Silva pelo constante incentivo durante boa parte do desenvolvimento desta dissertação.

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

Ao meu pai, Manoel

À minha mãe, Edinalda

Aos meus irmãos, André e Adriano

A todos os meus parentes das

famílias Araújo e Bezerra

INFLUÊNCIA DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS NO PROCESSO DE ALARGAMENTO DE UMA LIGA DE ALUMÍNIO-SILÍCIO

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. ALARGAMENTO.....	5
2.1.1. <i>Capabilidades do Processo.....</i>	5
2.1.2. <i>Material e Dureza da Peça de Trabalho.....</i>	7
2.1.3. <i>Máquinas.....</i>	7
2.1.4. <i>Embuchamentos e Suportes.....</i>	8
2.2. ALARGADORES.....	11
2.2.1. <i>Terminologia.....</i>	12
2.2.2. <i>Materiais.....</i>	13
2.2.3. <i>Seleção.....</i>	15
2.2.4. <i>Classificação.....</i>	17
2.2.5. <i>Tipos.....</i>	19
2.2.6. <i>Aplicação.....</i>	19
2.2.7. <i>Reafiação.....</i>	27
2.3. ALUMÍNIO E SUAS LIGAS.....	27
2.3.1. <i>Propriedades.....</i>	28
2.3.2. <i>Classificação das Ligas de Alumínio.....</i>	30
2.3.3. <i>A Liga de Alumínio-Silício.....</i>	31
2.4. VARIÁVEIS INDEPENDENTES DO PROCESSO.....	34
2.4.1. <i>Parâmetros de Corte.....</i>	34
2.4.2. <i>Geometria da Ferramenta.....</i>	36
2.4.3. <i>Fluido de Corte.....</i>	39
2.5. VARIÁVEIS DEPENDENTES DO PROCESSO.....	41
2.5.1. <i>Precisão Dimensional.....</i>	42
2.5.2. <i>Integridade Superficial.....</i>	43
2.5.3. <i>Potência Efetiva de Corte.....</i>	44
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	46
3.1. METODOLOGIA DOS ENSAIOS.....	46
3.2. MATERIAL DA PEÇA DE TRABALHO.....	47

3.3. MATERIAL DAS FERRAMENTAS.....	50
3.3.1. Brocas.....	50
3.3.2. Alargadores.....	51
3.4. FLUIDOS DE CORTE.....	51
3.5. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	54
3.5.1. Máquina-Ferramenta.....	54
3.5.2. Micrômetro Interno.....	55
3.5.3. Rugosímetro.....	55
3.5.4. Medidor de Circularidade e Cilindricidade.....	56
3.5.5. Refratômetro.....	56
3.5.6. Microscópio Eletrônico de Varredura.....	57
3.6. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE POTÊNCIA.....	57
3.7. SISTEMA DE FIXAÇÃO.....	58
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59
4.1. SOBREMETAL.....	60
4.2. VELOCIDADE DE CORTE.....	65
4.3. AVANÇO.....	71
4.4. ÂNGULO DE HÉLICE.....	76
4.5. NÚMERO DE LÂMINAS.....	82
4.6. GUIA CILÍNDRICO.....	87
4.7. ACABAMENTO DO PLANO DE SAÍDA.....	92
4.8. FLUIDO DE CORTE.....	97
4.9. SUMÁRIO DOS MELHORES RESULTADOS.....	103
5. CONCLUSÕES.....	104
6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	106
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107
8. ANEXOS.....	115
8.1. CONDIÇÕES DE USINAGEM DE CADA SUB-ETAPA.....	115
8.2. CARACTERÍSTICAS DOS ALARGADORES UTILIZADOS CONFORME RELATÓRIO DE INSPEÇÃO DO FABRICANTE.....	118
8.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICOS DOS FLUIDOS DE CORTE UTILIZADOS.....	119
8.4. RESULTADOS DE DIÂMETRO, RUGOSIDADE, POTÊNCIA, CIRCULARIDADE E CILINDRICIDADE DE TODAS AS SUB-ETAPAS.....	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Duas montagens de suportes e buchas para guiar os alargadores de forma precisa (Metals Handbook - Volume 16, 1989).....	9
Figura 2.2 - Dois tipos de desalinhamentos possíveis nos suportes pendulares (Metals Handbook - Volume 16, 1989).....	10
Figura 2.3 - Terminologia dos alargadores (SKF, 1987).....	12
Figura 2.4 - Ângulos dos alargadores (SKF, 1987).....	13
Figura 2.5 - Tipos de canais dos alargadores (SKF, 1987).....	17
Figura 2.6 - Formas de entrada dos alargadores (SKF, 1987).....	18
Figura 2.7 - Alargadores de mandril de canal reto (Metals Handbook - Volume 16, 1989).....	19
Figura 2.8 - Alargador de canal helicoidal para furo com rasgo enchavetado. Rugosidade superficial de 2,3 μm , obtido com alargador de estria helicoidal convencional (a) no alargamento do furo com rasgo enchavetado (b), foi reduzido para 1,23 μm pela modificação do ângulo de inclinação como em (c). Dimensões em polegadas (Metals Handbook - Volume 16, 1989).....	20
Figura 2.9 - Alargadores de corte frontal. (a) Um tipo comum de alargador de corte frontal usado para acabamento de furos cegos. (b) Quando guiado numa bucha, um alargador de corte frontal pode corrigir desvios dimensionais em furos passantes. Dimensões em polegadas (Metals Handbook - Volume 16, 1989).....	21
Figura 2.10 - Alargador ajustável de lâmina inserida e detalhes típicos de projeto (Metals Handbook - Volume 16, 1989).....	22
Figura 2.11 - Alargador ajustável com pino de expansão (Metals Handbook - Volume 16, 1989).....	22
Figura 2.12 - Alargadores ocios típicos e árvores de acomodação (Metals Handbook - Volume 16, 1989).....	23
Figura 2.13 - Detalhes de um alargador típico de lâminas flutuantes (Metals Handbook - Volume 16, 1989).....	24
Figura 2.14 - Dois tipos de ferramentas conjugadas broca-alargador (Metals Handbook - Volume 16, 1989).....	26
Figura 2.15 - Três tipos de alargadores de diâmetro múltiplo (Metals Handbook - Volume 16, 1989).....	26

Figura 3.1 - Corpo de prova com dimensões em milímetros (sem escala).....	48
Figura 3.2 - Microestrutura na seção transversal da liga de alumínio-silício utilizada nos ensaios.....	49
Figura 3.3 - Brocas utilizadas nos ensaios.....	50
Figura 3.4 - Alargadores utilizados nos ensaios.....	51
Figura 3.5 - Fresadora CNC utilizada nos ensaios.....	54
Figura 3.6 - Micrômetro interno e furo padrão.....	55
Figura 3.7 - Medição da rugosidade dos furos do corpo de prova utilizando blocos de apoio.....	56
Figura 3.8 - Refratômetro manual.....	57
Figura 3.9 - Sistema de aquisição de potência.....	58
Figura 3.10 - Montagem do sistema de fixação para realização dos testes.....	58
Figura 4.1 - Modelo simplificado do gráfico polar, onde se mede os erros de circularidade.....	59
Figura 4.2 - Modelo simplificado do gráfico linear, onde se mede os erros de cilindridade.....	60
Figura 4.3 - Influência do sobremetal sobre o diâmetro.....	61
Figura 4.4 - Influência do sobremetal sobre a rugosidade.....	62
Figura 4.5 - Superfícies dos furos alargados com variação do sobremetal (mm): (a) 0,8; (b) 0,7; (c) 0,6; (d) 0,5; (e) 0,4; (f) 0,3; (g) 0,2; (h) 0,1. Ampliação de 7 vezes.....	63
Figura 4.6 - Influência do sobremetal sobre a circularidade.....	64
Figura 4.7 - Influência do sobremetal sobre a cilindridade.....	65
Figura 4.8 - Influência da velocidade de corte sobre o diâmetro.....	66
Figura 4.9 - Influência da velocidade de corte sobre a rugosidade.....	67
Figura 4.10 - Superfícies dos furos alargados com variação da velocidade de corte (m/min): (a) 25; (b) 45; (c) 60; (d) 80. Ampliação de 7 vezes.....	68
Figura 4.11 - Influência da velocidade de corte sobre a circularidade.....	69
Figura 4.12 - Influência da velocidade de corte sobre a cilindridade.....	70
Figura 4.13 - Influência da velocidade de corte sobre a potência.....	70
Figura 4.14 - Influência do avanço sobre o diâmetro.....	72
Figura 4.15 - Influência do avanço sobre a rugosidade.....	73
Figura 4.16 - Superfícies dos furos alargados com variação do avanço (mm/rot): (a) 0,1; (b) 0,2; (c) 0,4; (d) 0,8. Ampliação de 7 vezes.....	74
Figura 4.17 - Influência do avanço sobre a circularidade.....	75
Figura 4.18 - Influência do avanço sobre a cilindridade.....	75

Figura 4.19 - Influência do avanço sobre a potência.....	76
Figura 4.20 - Influência do ângulo de hélice sobre o diâmetro.....	77
Figura 4.21 - Influência do ângulo de hélice sobre a rugosidade.....	78
Figura 4.22 - Superfícies dos furos alargados com variação do ângulo de hélice (°): (a) -10; (b) -7; (c) 0; (d) 7; (e) 10. Ampliação de 7 vezes.....	79
Figura 4.23 - Influência do ângulo de hélice sobre a circularidade.....	80
Figura 4.24 - Influência do ângulo de hélice sobre a cilindridade.....	81
Figura 4.25 - Influência do ângulo de hélice sobre a potência.....	81
Figura 4.26 - Influência do número de lâminas sobre o diâmetro.....	83
Figura 4.27 - Influência do número de lâminas sobre a rugosidade.....	83
Figura 4.28 - Superfícies dos furos alargados com variação do número de lâminas: (a) 3; (b) 4; (c) 5. Ampliação de 7 vezes.....	84
Figura 4.29 - Influência do número de lâminas sobre a circularidade.....	85
Figura 4.30 - Influência do número de lâminas sobre a cilindridade.....	85
Figura 4.31 - Influência do número de lâminas sobre a potência.....	86
Figura 4.32 - Influência do guia cilíndrico sobre o diâmetro.....	87
Figura 4.33 - Influência do guia cilíndrico sobre a rugosidade.....	88
Figura 4.34 - Superfícies dos furos alargados com variação do guia cilíndrico (mm): (a) 0,2; (b) 0,4; (c) 0,7. Ampliação de 7 vezes.....	89
Figura 4.35 - Influência do guia cilíndrico sobre a circularidade.....	90
Figura 4.36 - Influência do guia cilíndrico sobre a cilindridade.....	91
Figura 4.37 - Influência do guia cilíndrico sobre a potência.....	91
Figura 4.38 - Influência do acabamento do plano de saída sobre o diâmetro.....	93
Figura 4.39 - Influência do acabamento do plano de saída sobre a rugosidade.....	94
Figura 4.40 - Superfícies dos furos alargados com variação do acabamento do plano de saída: (a) D7; (b) D15; (c) D45. Ampliação de 7 vezes.....	94
Figura 4.41 - Influência do acabamento do plano de saída sobre a circularidade.....	95
Figura 4.42 - Influência do acabamento do plano de saída sobre a cilindridade.....	96
Figura 4.43 - Influência do acabamento do plano de saída sobre a potência.....	96
Figura 4.44 - Influência do fluido de corte sobre o diâmetro.....	98
Figura 4.45 - Influência do fluido de corte sobre a rugosidade.....	99

Figura 4.46 - Superfícies dos furos alargados com variação do fluido de corte: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6; (g) 7. Ampliação de 7 vezes.....	100
Figura 4.47 - Influência do fluido de corte sobre a circularidade.....	101
Figura 4.48 - Influência do fluido de corte sobre a cilindricidade.....	102
Figura 4.49 - Influência do fluido de corte sobre a potência.....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Sobremetal em milímetros, recomendados para alargamento de furos (Metals Handbook - Volume 16, 1989).....	35
Tabela 2.2 - Fluidos de corte utilizados no alargamento de vários metais (Metals Handbook - Volume 16, 1989).....	41
Tabela 3.1 - Etapas dos ensaios de alargamento.....	47
Tabela 3.2 - Composição química da liga de alumínio-silício utilizada.....	48
Tabela 3.3 - Características físicas e elétricas da liga de alumínio-silício utilizada.....	48
Tabela 4.1 - Resumo dos resultados encontrados na etapa 1.....	61
Tabela 4.2 - Resumo dos resultados encontrados na etapa 2.....	66
Tabela 4.3 - Resumo dos resultados encontrados na etapa 3.....	71
Tabela 4.4 - Resumo dos resultados encontrados na etapa 4.....	77
Tabela 4.5 - Resumo dos resultados encontrados na etapa 5.....	82
Tabela 4.6 - Resumo dos resultados encontrados na etapa 6.....	87
Tabela 4.7 - Resumo dos resultados encontrados na etapa 7.....	92
Tabela 4.8 - Resumo dos resultados encontrados na etapa 8.....	97
Tabela 4.9 - Resumo das melhores condições.....	103

LISTA DE SÍMBOLOS

- a_p - Profundidade de corte ou sobremetal [mm]
APC - Aresta postiça de corte
 $b_{\alpha'}$ - Largura da guia do corte secundário [mm]
Cl - Cilindricidade [μm]
Cr - Circularidade [μm]
d - Distância mínima
D - Distância máxima
EP - Aditivos extrema pressão
f - Avanço [mm/rot]
Fc - Força de corte
MEV - Microscópio eletrônico de varredura
pH - Potencial de hidrogênio
r - Raio menor
R - Raio maior
Ra - Rugosidade média aritmética [μm]
 V_c - Velocidade de corte [m/min]
 x_r - Ângulo da entrada [$^\circ$]
z - número de lâminas
 α_0 - Ângulo de folga da entrada [$^\circ$]
 α_p' - Ângulo de folga do corte secundário ângulo de folga da entrada [$^\circ$]
 γ_0 - Ângulo de saída do corte principal [$^\circ$]
 γ_f - Ângulo lateral de saída (ângulo de hélice) [$^\circ$]
 γ_p' - Ângulo de saída do corte secundário [$^\circ$]
 \varnothing - Diâmetro [mm]
 $\varnothing_{\text{broca}}$ - Diâmetro da broca [mm]

1. INTRODUÇÃO

Há aproximadamente 50 mil anos o homem estava em condições de produzir ferramentas de pedras com gumes afiados por lascamento. Mas um fato marcante para o desenvolvimento tecnológico foi a descoberta dos metais, como o cobre, o zinco e o ferro. Já a partir de 700 anos a.C., praticamente todas as ferramentas eram executadas em ferro, e a partir do século XVII foram descobertas constantes melhoras no processo de fabricação do ferro e na siderurgia do aço, que o colocaram em posição vantajosa em relação aos metais até então conhecidos. Estudos sistemáticos sobre a tecnologia de usinagem, no entanto, apenas surgiram no início do século XIX e levaram, entre outros, à descoberta de novos materiais de ferramentas de corte (König, 1981).

Usinagem abrange um grande conjunto de processos de fabricação utilizados para remover material indesejado, na forma de cavacos, de uma peça de trabalho. Usinagem é utilizada para transformar blocos fundidos, forjados ou preformados de metal dentro dos formatos desejados, com dimensão e acabamento especificado para cumprir os requisitos de projeto. Quase todo produto fabricado possui componentes que necessitam ser submetidos à usinagem, frequentemente para se obter grande precisão. Portanto, este conjunto de processos é um dos mais importantes dentro da fabricação considerando o valor adicionado ao produto final (Black, 1989).

A maioria das aplicações industriais de usinagem são em metais. Embora o processo de corte de metal ter resistido às análises teóricas por causa de sua complexidade, a aplicação destes processos no mundo industrial é generalizado (Black, 1989). As operações de corte mais utilizadas dentro da usinagem são o torneamento, o fresamento e a furação (Shaw, 1986).

O torneamento e o fresamento são operações as quais, em comparação à furação, podem ser vistas como mais simples em termos da cinemática, dinâmica e controle do processo, da remoção do cavaco e da dissipação de calor (Tönshoff, 1991, e König, 1990, apud Tönshoff et alli, 1994). Por outro lado, a furação é realizada sob condições desfavoráveis tais como:

- o processo de geração de cavaco é inacessível para se ver e acompanhar;
- existe apenas um espaço limitado para a remoção do cavaco nas estrias da broca;
- o atrito entre a ferramenta, o cavaco e o material da peça de trabalho é significativo;

- o fluxo de calor das superfícies geradas é insatisfatório;
- a velocidade de corte varia ao longo da aresta de corte, o qual é zero no eixo de revolução (Tönshoff et alli, 1994), onde o metal é extrudado e não removido pelas arestas de corte (Shaw, 1986), e é máximo na periferia (Trent, 1984);
- o fluido de corte que deve atuar como refrigerante, lubrificante e como meio de transporte dos cavacos, chega com dificuldades ao gume da ferramenta, onde é mais necessário (Stemmer, 1992).

A broca e o processo de furação precisam portanto ser adequados ao serviço de usinagem específico, ao material da peça de trabalho, à qualidade requerida do furo a ser gerado e aos níveis requeridos de credibilidade do processo (Tönshoff et alli, 1994).

A broca helicoidal é a mais importante de todas as ferramentas de furar. Ela foi inventada pela “Moses Twist Drill and Machine Company” em 1820. Hoje é ainda a ferramenta mais importante, para diâmetros entre 2 e 20 mm, para a produção de furos cilíndricos em materiais sólidos ou para ampliação de furos já existentes. A ferramenta tem que cumprir várias exigências: as arestas de corte têm que gerar dois cavacos idênticos; os cavacos têm que ser conduzidos para fora do furo através das estrias helicoidais; as forças e o torque necessários têm que ser transmitidos pelo corpo da broca; a ferramenta tem que ser guiada inicialmente pela extremidade da broca, em seguida pelas margens sobre o diâmetro interno; a energia transformada tem que ser removida parcialmente pelo corpo da broca. Essas exigências estão parcialmente em contradição; por um lado as estrias deveriam ser tão largas quanto possível para proporcionar bastante espaço para conduzir os cavacos, mas por outro lado o eixo ou o corpo da broca deve ser bastante resistente e rígido para transmitir o torque e as forças sem que o mesmo quebre e nem se submeta a deformações e vibrações intoleráveis (Tönshoff et alli, 1994). Nos ensaios de Coelho et alli (1995), onde ligas de alumínio-silício e um compósito de matriz metálica foram furados com brocas de aço-rápido convencional, mostraram vários problemas de conicidade e formação de rebarba na saída.

A furação com brocas é, normalmente, considerada uma operação de desbaste. Operações subseqüentes são muitas vezes exigidas para dar ao furo as necessárias características operacionais, tais como melhor precisão dimensional, maior precisão de forma e de alinhamento, melhor acabamento superficial, etc. (Stemmer, 1992). Na prática, os furos são usinados com brocas helicoidais e o alargamento é realizado como uma segunda operação com uma ferramenta multi-cortante chamada de alargador (Dieter, 1982, apud Shunmugam e

Somasundaram, 1990). O alargamento é a operação secundária mais utilizada, pois com uma única ferramenta é possível alargar um grande número de furos, além de poder ser realizado com quase todas as máquinas-ferramentas que possuam árvore rotativa (Dallas, 1976, apud Soratgar, 1987), além de, em muitos casos, eliminar a necessidade de se utilizar operações subsequentes como a retificação e o brunimento (Booth, 1989), nos casos em que bons níveis de precisão são necessários.

A engenharia moderna frequentemente exige uma produção em massa de furos com bom acabamento e precisão geométrica necessários para a montagem de precisão. Estes requisitos geralmente não podem ser atendidos pelas brocas helicoidais convencionais, embora estas ferramentas de gume frontal produzam furos em material sólido de forma bem econômica (Shunmugam e Somasundaram, 1990).

Para fabricação flexível, isto é, operações em centros de usinagem CNC, apenas o alargamento e a furação de precisão são adequados, pois o brunimento e a retificação interna necessitam de máquinas e equipamentos especiais, enquanto a furação canhão trabalha apenas se as ferramentas forem guiadas por buchas guias (Kress e Erdel, 1987).

O processo de alargamento tem grande aplicação na indústria automobilística, onde durante a última década houve grande desenvolvimento na produção de veículos cada vez mais eficientes como consequência do uso de materiais de menores pesos tais como as ligas de alumínio-silício (Coelho et alli, 1995). Entretanto, existe uma dificuldade técnica em se definir os parâmetros de usinagem corretos para se conseguir boa qualidade nos furos em peças de alumínio. Estes furos são feitos na construção, por exemplo, de cabeçote do motor, caixas de câmbio e coletores de admissão.

Essa dificuldade técnica se deve ao fato das ligas de alumínio moles, e algumas duras, terem, em geral, uma tendência de formar a aresta postiça de corte (APC) em decorrência da soldagem de partículas de alumínio, que tem baixo ponto de fusão, à aresta da ferramenta, devido ao calor gerado na usinagem (Weingaertner e Schroeter, 1991). Esta aresta postiça de corte forma uma nova superfície de corte, resultando na formação de cavaco irregular, acabamento superficial pobre, aquecimento excessivo da peça e falha prematura da ferramenta (Chamberlain, 1989). A adição de elementos de liga ao alumínio produz modificações microestruturais que tem reflexo sobre a usinabilidade. O silício, por exemplo, melhora a fundibilidade e também aumenta a resistência abrasiva do produto final (Coelho et alli, 1995),

influenciando de forma desfavorável no desgaste da ferramenta, dificultando desta forma a sua usinabilidade.

Existem poucos trabalhos técnico-científicos sobre alargamento na literatura. Entretanto, existem várias recomendações práticas oferecidas pelos fabricantes de ferramentas, as quais são muitas vezes conflitantes entre os concorrentes ou com resultados de testes práticos. Este motivo e a necessidade da FIAT Automóveis S.A. de otimizar o processo de alargamento em algumas operações dentro de sua linha de produção despertaram o interesse pela elaboração deste trabalho. Estudou-se a estabilidade dimensional, o acabamento e a potência consumida dos furos obtidos em peças de alumínio-silício, visando otimizar os principais parâmetros de corte do alargamento e elementos geométricos do alargador: sobremetal, velocidade de corte, avanço, ângulo de hélice, número de lâminas, guia cilíndrico, acabamento do plano de saída e fluido de corte. Este estudo foi desenvolvido em 8 etapas, onde na primeira etapa variou-se apenas o sobremetal. Na segunda variou-se somente a velocidade de corte utilizando o sobremetal otimizado da etapa anterior. A terceira teve apenas a variação do avanço, usando os valores otimizados do sobremetal e da velocidade de corte, e assim sucessivamente.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica, a qual enfoca a operação de alargamento, os alargadores, o alumínio e suas ligas e finaliza com as variáveis independentes e dependentes inerentes ao processo. No capítulo 3, descreve-se a metodologia, os materiais do corpo de prova e das ferramentas, os fluidos de corte e os equipamentos utilizados nos ensaios. No capítulo 4 são mostrados e analisados os resultados encontrados nos ensaios do capítulo anterior. Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões obtidas neste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ALARGAMENTO

Alargamento é uma operação de usinagem na qual uma ferramenta rotativa executa um leve corte para melhorar a precisão do furo circular e reduzir a rugosidade da superfície do mesmo (Metals Handbook - Volume 16, 1989). É um seguro e perfeito processo de usinagem para o acabamento de furos longos e pequenos (Kress e Erdel, 1987), podendo-se facilmente chegar a uma tolerância de qualidade IT 7. Pode-se conseguir uma precisão maior com lubrificação e refrigeração adequada (Ferraresi, 1972).

A qualidade dos furos alargados, precisão dimensional e acabamento superficial, dependem de todos ou de alguns dos seguintes fatores (Schroeter, 1989, e Soratgar, 1987):

- condições do furo após a furação;
- tipo e rigidez da máquina;
- fixações da peça e da ferramenta;
- velocidades de corte e avanços;
- tipo e forma de aplicação do fluido de corte;
- propriedades, diâmetro e geometria do corpo e da ponta do alargador e da broca;
- propriedades da peça;
- profundidade de corte;
- efeitos térmicos.

2.1.1. Capabilidades do Processo

Embora os aços com dureza na faixa de 15 a 30 HRC, sejam os materiais mais frequentemente alargados, os metais não ferrosos mais moles bem como aços com dureza superior a 52 HRC podem também ser alargados.

A maioria dos furos alargados estão dentro da faixa de 3,2 a 32 mm de diâmetro. Entretanto, em casos especiais, furos com diâmetros de 0,1 mm até cerca de 150 mm ou mais podem ser alargados (Metals Handbook - Volume 16, 1989).

A maioria das operações de alargamento não é destinada a remoção de grandes quantidades de cavacos. Isto pode, normalmente, ser feito mais economicamente por outros processos, tais como furação e mandrilamento. Quando uma profundidade de corte maior que 0,5 mm por diâmetro deve ser removida de um furo de diâmetro menor que 50 mm, métodos de alargamento especiais ou o mandrilamento são normalmente considerados. Métodos de alargamento especiais podem incluir o uso de alargadores canhão ou alargamento de desbaste e de acabamento com diferentes tipos de ferramentas. A quantidade de metal mínima a ser removida, na prática, para o alargamento é influenciado pela composição e dureza da peça de trabalho. Por ser o alargamento uma operação de corte, a formação do cavaco é um fator importante para a eficiência da operação. Se muito pouco material é removido, o alargador irá apenas atritar-se na peça ao invés de cortá-la; isto resultaria em danos para o alargador e para a superfície da peça. Para metais moles, a remoção de 0,20 mm sobre o diâmetro por passe é próximo do mínimo, dependendo do comprimento do furo e da rigidez da máquina. Se a ferramenta for de metal duro, por causa da diferença na formação do cavaco, esta quantidade pode ser reduzida para 0,13 mm. Para a remoção de menos que 0,13 mm de metal, um outro processo de usinagem, tal como o brunimento, é usualmente preferível (Metals Handbook - Volume 16, 1989).

Os alargadores são retificados para dimensões que eliminem ajustes da ferramenta durante os percursos de produção. Tolerâncias de 0,025 a 0,075 mm sobre o diâmetro são comuns no alargamento de produção. Tolerâncias menores que 0,025 mm podem ser obtidas, mas isto requer um controle muito mais preciso das dimensões do alargador, da velocidade de corte, do avanço e de todas as variáveis da operação. Para o alargamento de alta precisão, é recomendável reduzir levemente a conicidade do alargador e alinhar a bucha guia com o alargador, de modo que uma folga mínima possa ser obtida (Metals Handbook - Volume 16, 1989).

A ocorrência de vibrações durante o alargamento tem um efeito prejudicial na vida do alargador assim como no acabamento do furo. As vibrações podem ser consequência de diversos fatores, como segue abaixo:

- avanço excessivo ou insuficiente;

- rigidez insuficiente na máquina ou na fixação da ferramenta;
- má fixação da peça;
- comprimento excessivo do alargador ou do fuso da máquina;
- excessiva folga no cabeçote flutuante.

Controlando estes fatores, pode-se aumentar tanto a vida do alargador como a qualidade dos furos (SKF, 1987).

2.1.2. Material e Dureza da Peça de Trabalho

A dureza dos aços carbono e aços de baixa liga tem muito mais efeito que a composição dos mesmos sobre a facilidade de serem alargados. Metais moles tais como o alumínio e o latão podem ser alargados a velocidades de corte cinco a dez vezes maiores que aquelas utilizadas para aços recozidos (Metals Handbook - Volume 16, 1989). O item 2.3 faz uma abordagem do alumínio e sua ligas, onde o material utilizado neste trabalho está enquadrado.

2.1.3. Máquinas

Quanto às máquinas-ferramentas, o Metals Handbook - Volume 16 (1989) faz os seguintes comentários:

- provavelmente todo tipo de máquina capaz de rotacionar uma ferramenta ou uma peça de trabalho tem sido utilizado para o alargamento. Peças relativamente grandes são rotacionadas num torno mecânico, e os alargadores são avançados da luneta composta ou do cabeçote móvel do torno. A maioria do alargamento de produção, entretanto, é feito em máquinas de furação ou num torno revólver ou outra máquina de operação múltipla;
- em muitas aplicações, o alargamento é suplementar, e realizado na mesma sequência com outras operações, tal como a furação. Sob estas condições, a máquina é selecionada principalmente para a operação primária;
- para o alargamento de produção de furos menores que 32 mm de diâmetro, máquinas que rotacionam a ferramenta e mantêm a peça de trabalho estacionária (furadeiras de coluna,

por exemplo) são usualmente as mais práticas e econômicas. As buchas guias podem ser utilizadas nestas máquinas para manter tolerâncias de 0,075mm ou menores para furos longos;

- para uma precisão máxima, entretanto, é preferível, se a dimensão e a forma da peça de trabalho permitir, rotacionar a peça e manter a ferramenta estacionária. Isto também se aplica ao alargamento de furos que são consideravelmente maiores que 32 mm de diâmetro ou que tenham uma razão comprimento por diâmetro superior a 8:1;

- dimensão e forma da peça de trabalho são frequentemente os maiores problemas na escolha de uma máquina para o alargamento e para a furação ou outras operações que antecedem o alargamento. Em muitos casos, embora apenas furos relativamente pequenos são alargados, a peça de trabalho é grande ou pesada demais para ser rotacionada em máquinas tais como os tornos revólveres. Em outros casos, a dimensão ou o peso da peça de trabalho pode permitir que a mesma se submeta à rotação, mas o formato não simétrico da peça faz com que a rotação seja impraticável. Para qualquer condição, o alargador deve ser rotacionado em máquinas tais como a furadeira de coluna ou a broqueadeira. Furos relativamente pequenos em peças relativamente grandes são frequentemente alargados por máquinas portáteis operadas manualmente.

2.1.4. Embuchamentos e Suportes

Buchas e suportes são dispositivos fundamentais para garantir os resultados de qualidade que o processo de alargamento pode proporcionar. A Figura 2.1 mostra duas montagens de suportes e buchas para guiar alargadores de forma precisa.

Se o comprimento do furo é maior que uma vez o diâmetro do mesmo, é melhor guiar o alargador em buchas nos dois lados da peça (Figura 2.1a). Para isto, um alargador piloto especial é requerido. As buchas guias devem se encaixar com os pilotos, mas não muito apertado de forma a evitar o grimpamento dos mesmos. Os pilotos devem ser estriados por todo o seu comprimento. As estrias servem para permitir que o fluido de corte lubrifique os pilotos e proporcionar uma saída para os cavacos que poderiam ficar presos entre os pilotos e as buchas. Se o comprimento do furo não é maior que o valor do diâmetro, o alargador pode ser guiado apenas no lado da entrada do furo da peça, numa bucha guia feita para encaixar-se com o alargador (Metals Handbook - Volume 16, 1989).

Para qualquer montagem mostrada na Figura 2.1, um suporte rígido (haste de alargador mantida diretamente e rigidamente na árvore da máquina) é necessário porque qualquer leve desalinhamento entre a árvore da máquina e a peça será corrigido pelas buchas guias. Entretanto, se o alargador é auto guiável, um suporte rígido pode não ser satisfatório porque qualquer desalinhamento da árvore da máquina com a peça resultará em furos alargados em forma de sino, cônico ou com excentricidade. Algum tipo de suporte pendular ou alargador especial é normalmente utilizado para estas aplicações.

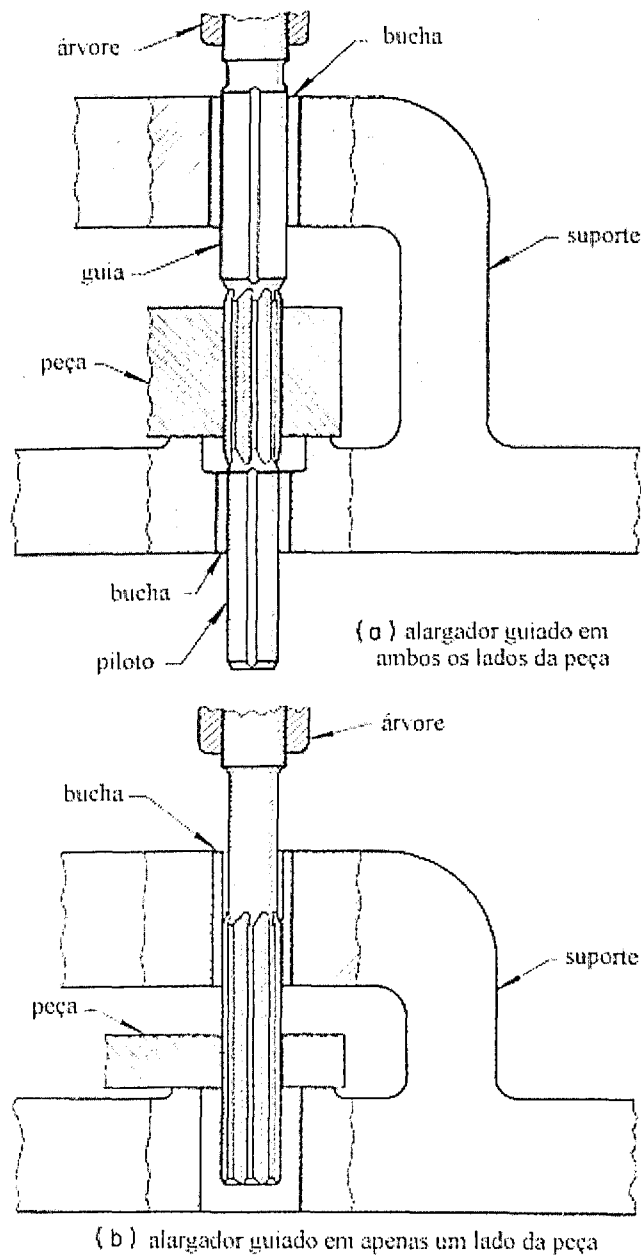


Figura 2.1 - Duas montagens de suportes e buchas para guiar os alargadores de forma precisa (Metals Handbook - Volume 16, 1989).

O suporte pendular permite um desalinhamento angular limitado do alargador ou um desalinhamento paralelo limitado, ou ambos (Figura 2.2). O suporte pendular ideal permite os dois tipos de desalinhamento em quantidades que possam ser ajustadas para o maior desalinhamento tolerável na montagem (Metals Handbook - Volume 16, 1989). É através desta ação pendular que se alcança a eficiência desejada da bucha de guia, a qual define a posição do furo na peça. Ohgo et alli (1979) observou, no alargamento de ferro-fundido cinzento, que na ausência da bucha, o alargador vibrava. Entretanto, não foi observado diferença de precisão entre os suportes rígido e oscilante. Em contrapartida, Schroeter (1989) demonstra em seus experimentos que o uso do suporte pendular resultou numa redução da qualidade superficial, que é explicado pelo fato deste suporte proporcionar menor estabilidade à ferramenta nos furos quando do seu uso, já que o mesmo permite um jogo axial e radial.

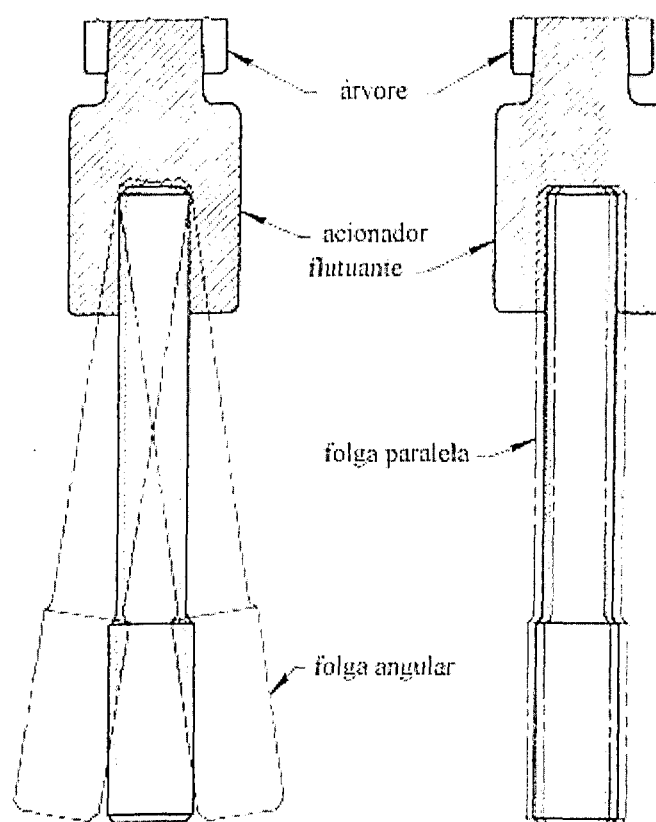


Figura 2.2 - Dois tipos de desalinhamentos possíveis nos suportes pendulares (Metals Handbook - Volume 16, 1989).

Porém, o ideal na operação de alargamento é que o eixo da máquina, o alargador, a bucha de guia e o furo a ser alargador estejam perfeitamente alinhados (SKF, 1987), pois o mesmo é dependente do comprimento da bucha guia, da rigidez da ferramenta e da resistência ao escorregamento (Galloway, 1957, apud Soratgar, 1987). Quaisquer variações tendem a aumentar o desgaste da ferramenta, bem como provocar furos fora da tolerância. Furos sobredimensionados ou cônicos indicam um mau alinhamento (SKF, 1987).

2.2. ALARGADORES

O processo de furação com brocas helicoidais consiste numa operação de desbaste, cujas tolerâncias de fabricação normalmente variam entre a qualidade ISO IT 11 a IT 14. Para calibrar o furo e melhorar o acabamento da superfície originada pela furação com broca helicoidal, empregam-se alargadores. Estes são ferramentas multicortantes ou monocortantes, de forma cilíndrica ou cônica que, através dos movimentos de corte, rotativo, e avanço, axial, servem para alargar e acabar furos, deixando-os com dimensões mais precisas através de uma pequena remoção de metal (Stemmer, 1992, e Shunmugam e Somasundaram, 1990). Para isso, os alargadores possuem canais, ou paralelos ao eixo da ferramenta ou em hélice, que proporcionam dentes para o corte e ranhuras para a saída de cavacos (Metals Handbook - Volume 16, 1989). As ferramentas para o processo multicortante são alargadores cujas lâminas estão num único conjunto e encontram-se simultaneamente em contato com a peça. A usinagem é subdividida em duas operações básicas: corte pelas arestas principais de corte e alisamento pelas arestas laterais, as quais se apóiam numa extensão relativamente grande contra a superfície do furo já usinado e conduzem a ferramenta. Para isto as cunhas cortantes dispõem de uma superfície lateral que têm forte influência no resultado da usinagem durante o processo de alargamento. Por outro lado, o projeto dos alargadores de corte único apresenta uma separação das funções de corte e de guia em elementos de trabalho diferentes - lâmina e guia - são especialmente importantes. Já foi demonstrado que com alargadores de corte único é possível utilizar velocidade de corte superiores, chegando a 400 m/min (Kress, 1975, apud Weinert et alli, 1998; Kress, 1982, apud Schroeter, 1989; Kress e Erdel, 1987; Erdel, 1989; e Weinert et alli, 1998).

2.2.1. Terminologia

A Figura 2.3 apresenta a terminologia usada para os alargadores e a Figura 2.4 detalha os principais ângulos dos mesmos, segundo a NBR 7487.

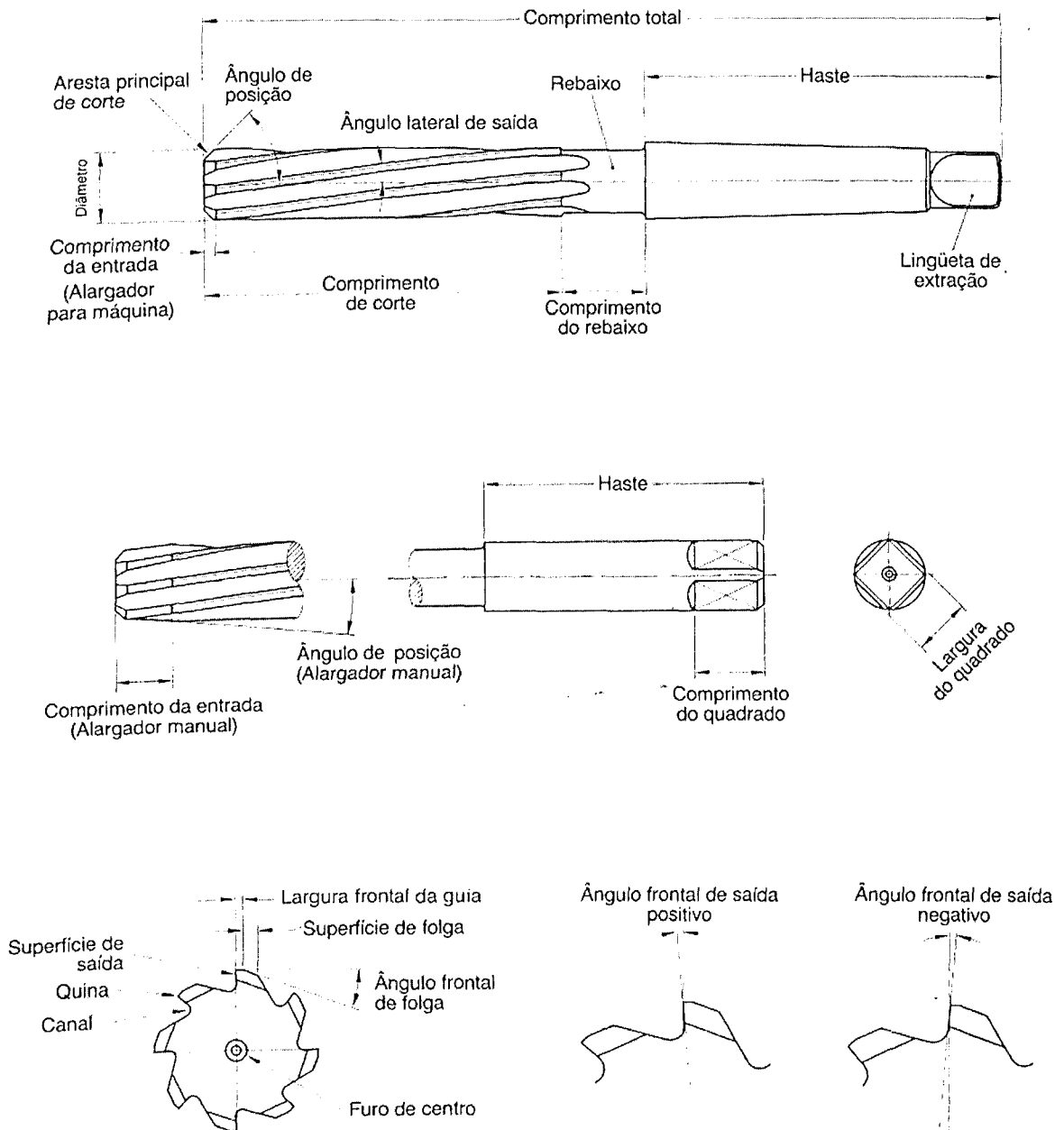


Figura 2.3 - Terminologia dos alargadores (SKF, 1987).

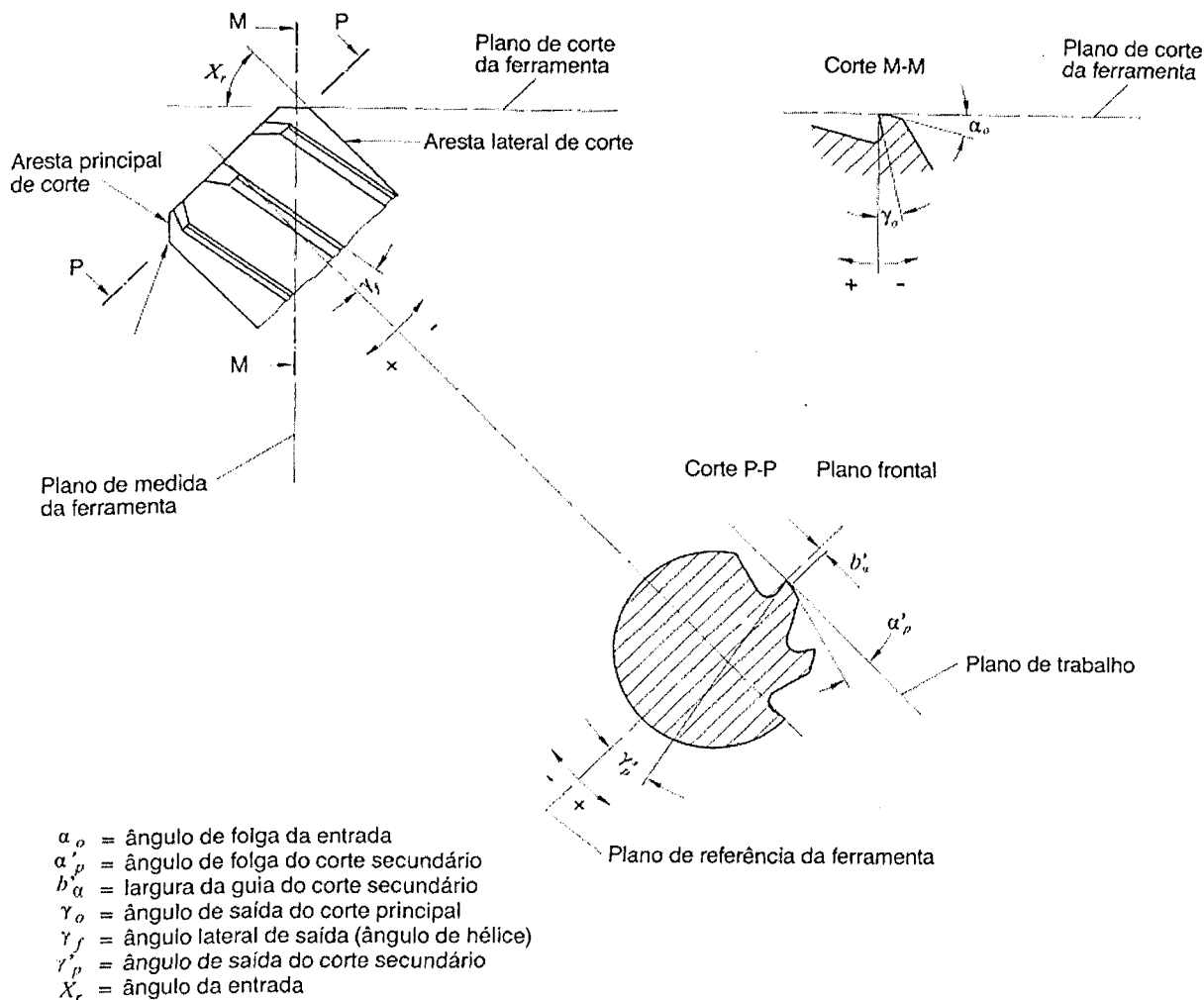


Figura 2.4 - Ângulos dos alargadores (SKF, 1987).

2.2.2. Materiais

Em geral, as hastes dos alargadores são fabricadas de aço-rápido ou de aço ferramenta de mais baixa liga, enquanto os insertos são de metal duro nas arestas de corte. Por causa da carga imposta sobre a ferramenta no alargamento ser menor que na furação, alargadores requerem menos tenacidade que as brocas. Em contrapartida, os alargadores de aço-rápido devem ser de dureza máxima (65 HRC ou mais) para se obter acabamento superficial e vida da ferramenta ótimos (Metals Handbook - Volume 16, 1989).

Muitos alargadores padrões e especiais são fabricados inteiramente de metal duro ou contém insertos de metal duro. Embora mais caro que o aço-rápido, o metal duro frequentemente possui uma vida dez ou mais vezes superior quando se alarga aço com dureza próxima de 20 HRC. No caso de usinagem de aços com dureza superior a 40 HRC, os alargadores de metal duro são sempre indicados (Metals Handbook - Volume 16, 1989). No alargamento do ferro-fundido cinzento, Ohgo et alli (1979) constatou uma maior precisão ao usar uma ferramenta de metal duro que uma de aço-rápido, usando pouco ou nenhum refrigerante. Da mesma forma, Il'in e Mukhin (1977), utilizando um alargador de sulcos retos com lâminas de metal duro para o alargamento de furos em bronze a estanho-chumbo, obteve melhor acabamento superficial, maior produtividade e custo de usinagem menor do que com alargadores de aço-rápido.

As vantagens dos metais duros são: boa distribuição da estrutura em decorrência do próprio processo metalúrgico de fabricação, dureza elevada, resistência elevada, resistência a compressão e resistência ao desgaste a quente. Além disso, existe a possibilidade de conseguir propriedades distintas nos metais duros, pela mudança específica dos carbonetos e das proporções do ligante (König, 1981). Existem no mercado três classes de metal duro: a classe P, que são WC + Co com adições de TiC, TaC e às vezes NbC, geralmente aplicados à usinagem dos aços e materiais que produzem cavacos longos; a classe K, que são os WC + Co puros e geralmente aplicados à usinagem do ferro fundido e ligas não-ferrosas que produzem cavacos curtos. E finalmente a classe M, que é intermediária entre as duas primeiras (Machado e da Silva, 1997).

Para o uso eficiente do metal duro, máxima rigidez é essencial na máquina, no alargador e na peça de trabalho. Mesmo com uma máquina rígida, se o comprimento não guiado e não sustentado do alargador for maior que seis vezes seu diâmetro, o uso de metal duro torna-se questionável. Poderá haver vibração e a vida das ferramentas de metal duro serão encurtadas acentuadamente. Neste caso, aços rápidos devem ser utilizados (Metals Handbook - Volume 16, 1989).

2.2.3. Seleção

O alargador deve ser compatível com a máquina na qual ele será utilizado. Além disso, outros fatores devem ser considerados:

- composição e dureza da peça de trabalho;
- diâmetro do furo;
- configuração do furo;
- comprimento do furo;
- sobremetal;
- tipo de posicionamento fixo, quando utilizado;
- requisitos de precisão e acabamento;
- quantidade de produção;
- custo (inicial e de manutenção);
- custo a ser recuperado.

Na seleção de um alargador, o Metals Handbook - Volume 16 (1989) apresenta as seguintes orientações:

- quando mais de um tipo de alargador pode produzir resultados aceitáveis, a escolha pode depender da disponibilidade ou da prática considerando a padronização das ferramentas;

- composição e dureza da peça possuem, em geral, maior influência na escolha do material do alargador que o tipo de alargador. Entretanto, existem exceções, por exemplo, alargadores ocos têm sido menos satisfatório que os alargadores sólidos para alargamento de materiais metálicos duros e tenazes;

- para furos maiores que 50 mm de diâmetro, alargadores sólidos confeccionados de aço-rápido são raramente utilizados, principalmente porque eles seriam caros demais. Alargadores ocos são usualmente a melhor escolha para furos desta dimensão;

- quando o comprimento do furo é menor que dois diâmetros, vários tipos de alargadores são adequados. Entretanto, quando essa razão é maior, poderá ocorrer problemas de precisão. Nestes casos, é comum utilizar alargadores especiais;

- quando o sobremetal é grande, um alargador sólido ou especial é usualmente preferido. Alargadores ocos não são adequados para a remoção de grandes quantidades de sobremetals. Em algumas aplicações de remoção pesada, o alargamento é feito em dois estágios, usando um alargador oco para o segundo estágio;

- o tipo de fixação determina se há ou não necessidade de um alargador guiado;
- requisitos de precisão e acabamento são relacionados com vários outros fatores. Nos casos de alta precisão, a peça de trabalho deverá ser rotativa, se possível. Portanto, a haste do alargador deve se encaixar com a máquina escolhida. A precisão depende da rigidez da montagem e do método de condução do alargador. Alargadores auto-guiados são geralmente escolhidos para alta precisão e acabamento fino no alargamento de furos compridos;
- para o alargamento de algumas peças que podem ser produzidas com uma afiação do alargador, o método de afiação mais simples é a escolha lógica. Para a produção de larga escala, tipos ajustáveis devem ser considerados para minimizar a afiação e o tempo improdutivo;
- o custo do alargador deve ser considerado de três pontos de vista relacionados: custo inicial, custo de manutenção e custo a ser recuperado. Custo inicial alto é frequentemente compensado pelo baixo custo de manutenção e alta produção. Alargadores com lâminas de metal duro inseridas custam mais que os alargadores sólidos de aço, mas podem usar um número muito maior de furos;
- é prática comum retrabalhar um alargador gasto para uma dimensão menor do que vendê-lo como sucata. A economia do retrabalho depende principalmente se há ou não equipamento necessário disponível; comprar tal equipamento depende da quantidade de ferramentas a serem retrabalhadas. Alargadores gastos podem, em alguns casos, ser vendidos às ferramentarias onde eles serão retrabalhados para a revenda. Caso isto ocorra, o custo recuperado será muito maior do que a venda dos mesmos como sucata;
- a extensão na qual um alargador pode ser retrabalhado é também governado pelo projeto do alargador. Um alargador grande pode ser retrabalhado progressivamente até dimensões menores, mas esta prática é limitada pelo projeto do alargador. O limite de redução do diâmetro do alargador pelo retrabalho é normalmente governado pela profundidade do canal. Quando o diâmetro é pequeno demais uma redução adicional requereria um aprofundamento das estrias. Isto se torna inviável e o alargador é normalmente sucateado.

2.2.4. Classificação

Segundo Stemmer apud Schroeter (1989), os alargadores podem ser classificados da seguinte forma:

- Quanto ao tipo de operação, podem ser de desbaste ou de acabamento. Os de desbaste são usados para aumentar o diâmetro de furos em bruto, como os obtidos por fundição ou forjamento. Os de acabamento possibilitam a obtenção de furos calibrados, com exigências quanto ao acabamento superficial e à tolerância;
- Quanto ao tipo de dentes (canais), podem ser de dentes retos ou helicoidais. Estes podem ser de hélice à direita ou à esquerda. A hélice é direita quando, olhando-se o alargador de cima, normalmente ao eixo, a hélice se desenvolve para a direita, como mostra a Figura 2.5 (Stemmer apud Schroeter, 1989);

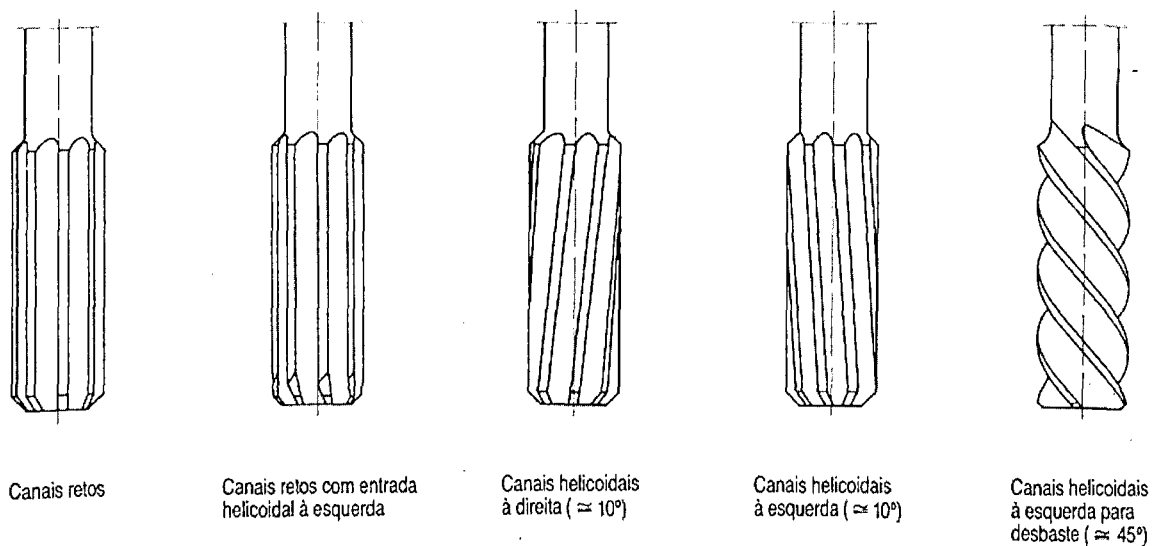


Figura 2.5 - Tipos de canais dos alargadores (SKF, 1987).

- Quanto à fixação, podem possuir haste cônica ou cilíndrica;
- Quanto ao sentido de corte. Olhando-se o alargador de topo, posicionado horizontalmente diante do observador, se o dente inferior corta da esquerda para a direita, diz-

se que o corte é à direita. Neste caso, o alargador observado de topo corta em sentido anti-horário. Caso contrário, o corte é à esquerda;

- Quanto ao uso, podem ser manuais ou de máquina. Os alargadores manuais distinguem-se dos alargadores de máquina pelo chanfro de entrada, maior e de menor inclinação nos alargadores manuais, para facilitar a entrada da ferramenta no furo;

- Quanto à regulagem, podem ser fixos ou ajustáveis. Nos alargadores fixos, uma ferramenta é construída para apenas uma dimensão, enquanto que nas ferramentas ajustáveis é possível variar o diâmetro destas, dentro de uma certa faixa de valores, através de uma regulagem radial dos dentes;

- Quanto à geometria do furo, podem ser cônicos ou paralelos;

- Quanto ao número de dentes, podem ser de corte múltiplo (vários dentes) ou de corte único;

- Quanto à forma de entrada, os alargadores podem possuir a entrada conforme mostrado na Figura 2.6 (SKF, 1987).

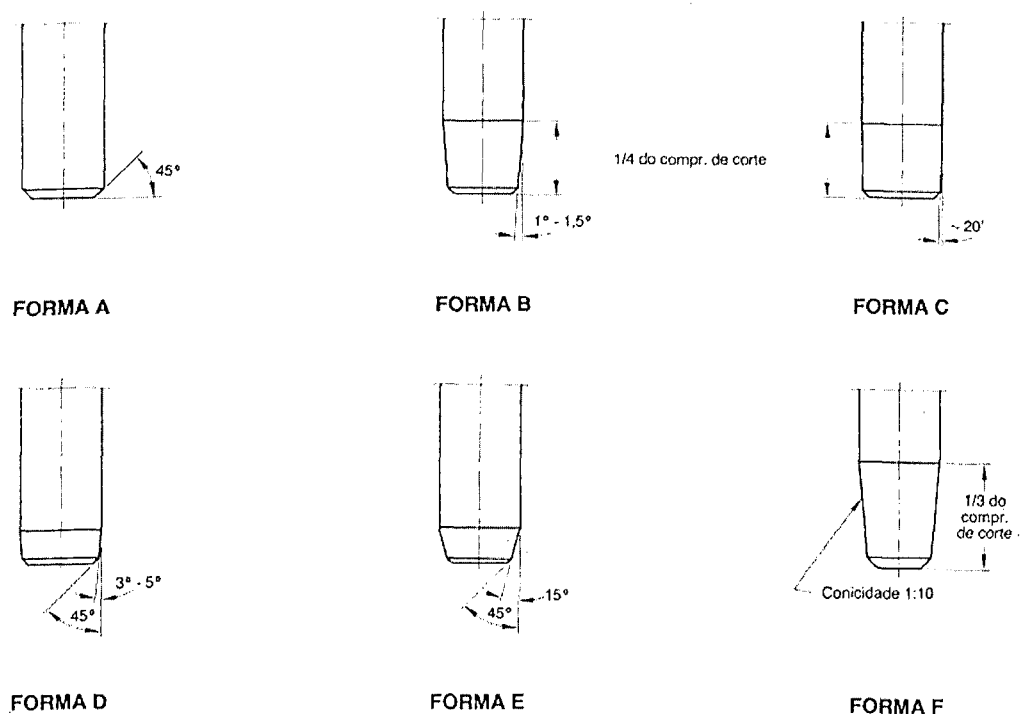


Figura 2.6 - Formas de entrada dos alargadores (SKF, 1987).

2.2.5. Tipos

Alargadores padrões incluem os seguintes tipos principais (Metals Handbook - Volume 16, 1989):

- alargadores de mandril de canal reto;
- alargadores de mandril de canal helicoidal;
- alargadores de corte frontal;
- alargadores de expansão;
- alargadores ocos (e alargadores expandíveis);
- alargadores de lâminas flutuantes;
- alargadores canhão.

Há também numerosos tipos de alargadores especiais, incluindo alargadores ferramenteiros, alargadores cônicos, alargadores ponte, escareadores de tubos, ferramentas conjugadas broca-alargador e alargadores de diâmetro múltiplo.

2.2.6. Aplicação

São apresentadas, a seguir, as principais aplicações dos diferentes tipos de alargador, segundo a orientação da Metals Handbook - Volume 16 (1989).

Os alargadores de mandril de canal reto são alargadores sólidos de aplicação geral, projetados para uso em máquinas, tais como furadeiras de coluna e tornos revólveres. Eles são disponíveis com haste cônica ou retas (Figura 2.7) e portanto podem ser mantidas em buchas bipartidas ou de anéis, ou por parafusos de pressão.

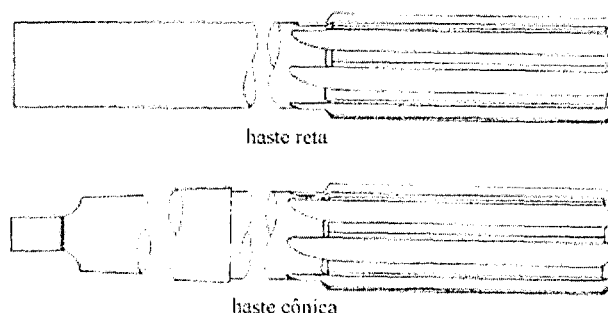


Figura 2.7 - Alargadores de mandril de canal reto (Metals Handbook - Volume 16, 1989).

Alargadores de mandril de canal reto são normalmente afiados com um chanfro de 45° e são adequados para o alargamento de quase todos os metais. Entretanto, rasgos de chavetas ou outras irregularidades em furos, requisitos de tolerâncias, furos cegos, quantidade de sobremetal que deve ser removido, ou dureza da peça podem exigir outros tipos de alargadores.

Alargadores de canal helicoidal diferem dos alargadores de canal reto apenas nos canais, os quais são fresadas na forma de hélice. Eles são usados nas mesmas máquinas e são disponíveis com hastes retas ou cônicas, nas mesmas dimensões dos alargadores de canal reto. Um alargador de mandril de canal helicoidal típico é mostrado na Figura 2.8(a).

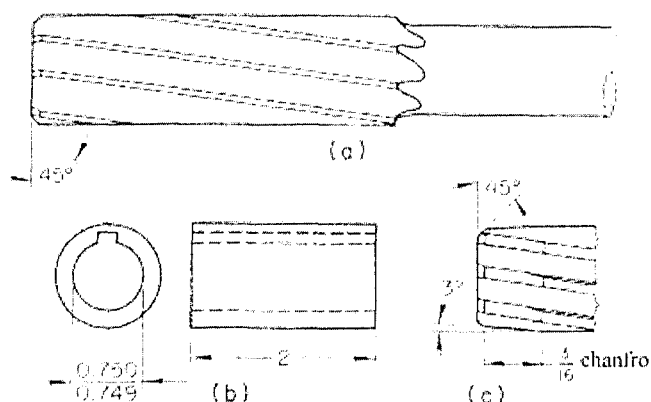


Figura 2.8 - Alargador de canal helicoidal para furo com rasgo enchavetado. Rugosidade superficial de $2,3 \mu\text{m}$ obtido com alargador de estria helicoidal convencional (a) no alargamento do furo com rasgo enchavetado (b), foi reduzido para $1,23 \mu\text{m}$ pela modificação do ângulo de inclinação como em (c). Dimensões em polegadas (Metals Handbook - Volume 16, 1989).

Alargadores de canal helicoidal são melhores que os alargadores de canal reto para alargamento de furos que possuem irregularidades tais como rasgos de chavetas (Figura 2.8b). As arestas de corte helicoidais proporcionam uma entrada suave nas irregularidades, e isto minimiza vibrações, melhora a rugosidade superficial e a variação da medida, além de prolongar a vida do alargador.

Um alargador de corte frontal, com canais retos ou helicoidais, não tem chanfro na extremidade para usar como guia; em vez disso, a extremidade possui arestas de corte a ângulos retos ao eixo do alargador (Figura 2.9a), assemelhando-se com as fresas de topo.

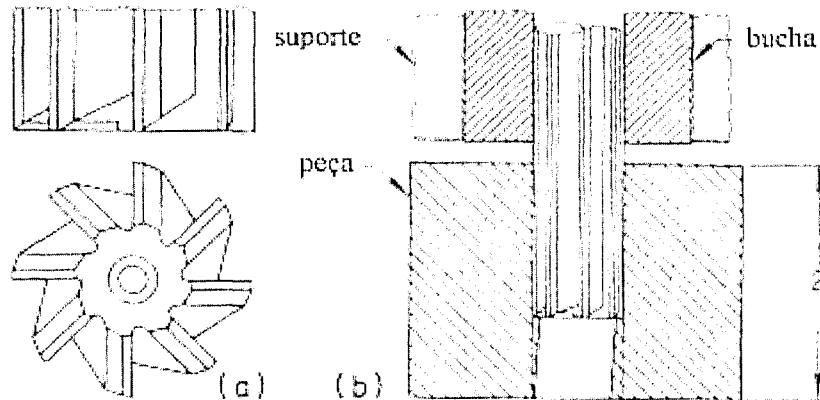


Figura 2.9 - Alargadores de corte frontal. (a) Um tipo comum de alargador de corte frontal usado para acabamento de furos cegos. (b) Quando guiado numa bucha, um alargador de corte frontal pode corrigir desvios dimensionais em furos passantes. Dimensões em polegadas (Metals Handbook - Volume 16, 1989).

Alargadores de corte frontal são utilizados para acabamento de furos cegos que devem ter pouco ou nenhum raio na base. Uma aplicação importante é a correção de desvios de paralelismo em furos passantes. Um alargador possuindo uma extremidade chanfrada para guia, normalmente, seguirá o furo já realizado. Um alargador de corte frontal, quando guiado por uma bucha (Figura 2.9b), pode corrigir o paralelismo por vários centésimos de milímetros. A principal desvantagem dos alargadores de corte frontal é que os mesmos produzem comparativamente superfícies ásperas. Quando estes alargadores são utilizados, por exemplo, para correção de desvios de furo, eles são normalmente utilizados como alargadores de desbaste, e um alargador convencional é utilizado para o acabamento.

Os alargadores ajustáveis são constituídos de lâminas de aço rápido montadas em ranhuras de profundidade variável, permitindo variar o diâmetro dentro de uma faixa de valores. Embora vários tipos de alargadores podem ser ajustáveis, incluindo alargadores de lâmina flutuante e alargadores ocos expandíveis, o termo alargador de expansão é geralmente utilizado para se referir apenas a um limitado número de tipos. Dois dos mais comuns são os alargadores de lâmina inserida e ajustável com pino de expansão.

Os alargadores de lâminas inseridas, os quais são confeccionados com e sem regulagem de medida, são porta-ferramentas nos quais, rasgos são fresados para receber lâminas. No tipo ajustável (Figura 2.10), as lâminas são deslizadas em rasgos por uma porca

de ajustagem para variar o diâmetro de corte. As lâminas ajustáveis são seguras pela porca de pressão e pelo parafuso de pressão.

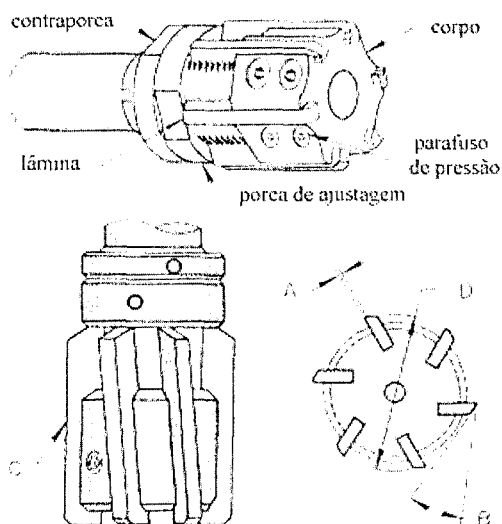


Figura 2.10 - Alargador ajustável de lâmina inserida e detalhes típicos de projeto (Metals Handbook - Volume 16, 1989).

Alargadores de lâmina inserida são disponíveis com canais retos (Figura 2.10) ou helicoidais. Eles são especialmente adequados para aplicações de alto volume de remoção nos quais variações no material da peça de trabalho, na temperatura, na firmeza da fixação ou rigidez das máquinas dificultam a manutenção da medida do furo.

Os alargadores com pino de expansão fazem uso de uma conicidade e pino de expansão do tipo parafuso para mover as lâminas e variar a dimensão do alargador (Figura 2.11). Estes alargadores são disponíveis apenas com canais retos.

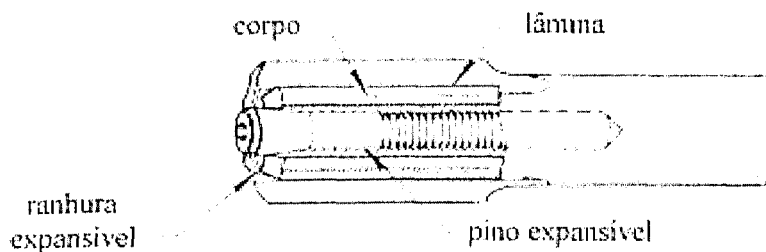


Figura 2.11 - Alargador ajustável com pino de expansão (Metals Handbook - Volume 16, 1989).

Em muitas operações de alta produção, alargadores de lâminas inseridas e com pino de expansão são mais econômicos que alargadores sólidos porque as lâminas podem ser reafiadas várias vezes antes da substituição e a vida do corpo do alargador não tem limite. Além disso, esses alargadores possuem outras duas vantagens sobre os alargadores sólidos:

- os materiais das lâminas podem ser trocados de acordo com a necessidade, usando o mesmo corpo;
- na reafiação e projeto da ferramenta, detalhes como ângulo de conicidade, largura dos guias cilíndricos e folga radial, são mais facilmente modificados por um alargador com lâmina inserida que por um alargador sólido.

Alargadores ocios são geralmente utilizados quando a ferramenta permanece estacionária e a peça de trabalho é rotacionada, como num torno revólver. Em alguns casos, entretanto, eles são utilizados em máquinas especiais nas quais tanto a peça de trabalho quanto as ferramentas são rotacionadas. Os alargadores ocios são menos rígidos que os alargadores sólidos pois são conjuntos de duas peças montados sobre árvores (Figura 2.12). São mais adequados para operações de acabamento que para remoção de grandes quantidades de metais.

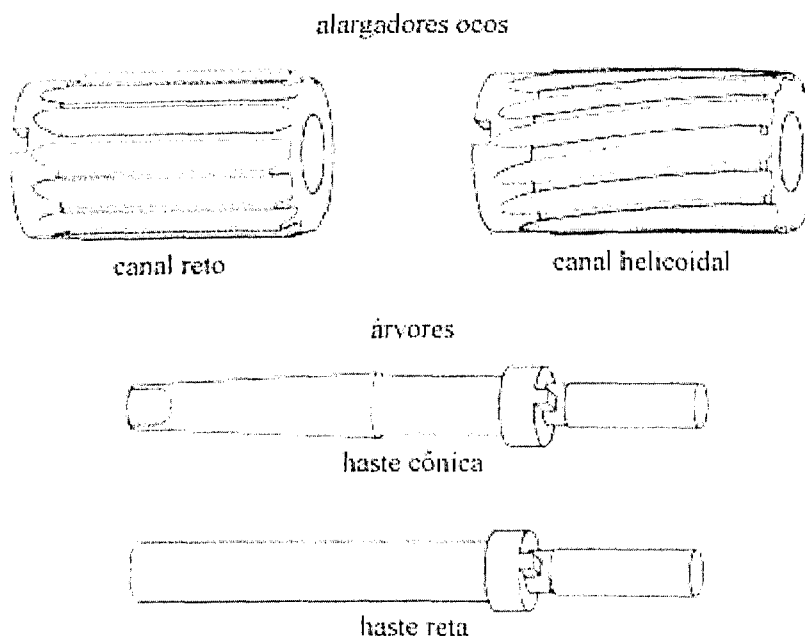


Figura 2.12 - Alargadores ocios típicos e árvores de acomodação (Metals Handbook - Volume 16, 1989).

Alargadores ocos expandíveis não são projetados para ajustar diferentes medidas de furos, mas apenas para compensar o desgaste da ferramenta. Quando o alargador se desgasta fora da tolerância, ele é ajustado até o limite máximo, quando então será substituído por um novo.

Alargadores de lâminas flutuantes possuem arestas de corte intercambiáveis e ajustáveis (Figura 2.13). As lâminas, de aço rápido ou de metal duro, podem ser ajustadas para compensar desgastes. A montagem de lâmina de duas peças é mantida num rasgo na barra, como mostra a Figura 2.13, na qual ela pode flutuar.

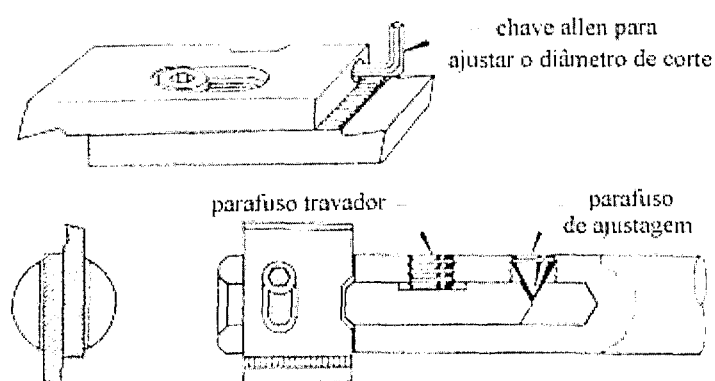


Figura 2.13 - Detalhes de um alargador típico de lâminas flutuantes (Metals Handbook - Volume 16, 1989).

Alargadores de lâminas flutuantes proporcionam folga para os cavacos e podem cortar mais rápido que alargadores sólidos. Outras vantagens dos alargadores de lâminas flutuantes são:

- as lâminas podem ser substituídas, ou removidas para ajuste, sem revoção do portaferramenta da máquina;
- o portaferramenta não é expandível e pode ser usado para muitas lâminas;
- o custo da ferramenta é normalmente menor que dos alargadores sólidos de mesma dimensão.

O uso de alargadores de lâminas flutuantes é normalmente restrita à aplicações nas quais a peça de trabalho é rotacionada, como nos tornos revólveres.

Alargadores canhão consistem de uma haste oca com uma aresta de corte (normalmente metal duro) afastado da extremidade. A alimentação de fluido de corte é feita através de um canal sob pressões de 170 a 700 kPa para garantir o corte, para refrigerar a peça

de trabalho e as ferramentas e transportar cavacos. Alargadores canhão são utilizados em máquinas nas quais a peça de trabalho é rotacionada e a ferramenta permanece estacionária. Para furo cego possuem canais por todo o comprimento, para permitir ejeção dos cavacos para trás. Um alargador canhão parece com uma broca canhão no que se refere ao princípio de auto-guia, com rendimentos similares de retilinidade, tolerância e acabamento. Velocidades mais usadas para o alargamento canhão são aproximadamente 60 m/min (cerca da mesma para a furação canhão), mas os avanços são geralmente 50 a 100 % maiores que aqueles usados na furação canhão. No alargamento de metais moles, avanços de até 0,25 mm/rot são frequentemente utilizados, além de possibilitar a remoção de até 13 mm de material do diâmetro.

Vários tipos de alargadores projetados para aplicações especiais são facilmente disponíveis, dentre os quais podemos destacar os alargadores com canais de lubrificação, alargadores ferramenteiros, alargadores cônicos, alargadores ponte, alargadores de tubos, conjugados broca-alargador e alargadores de diâmetro múltiplo.

Alargadores com canais de lubrificação possuem um núcleo oco através do qual o fluido de corte é forçado a remover os cavacos para fora através dos canais. Eles são disponíveis como alargadores sólidos ou como alargadores de lâminas inseridas. Alargadores com canais de lubrificação podem produzir bom acabamento no alargamento horizontal.

Alargadores ferramenteiros possuem um grande ângulo de hélice e canais helicoidais à esquerda e são cônicos cerca de 0,013 mm/mm. Eles são usados para o alargamento de furos de pinos de guia em partes de moldes.

Alargadores cônicos são usados para tornar cônicos furos para pinos ou cones Morse. Os tipos de desbaste tem rasgos para quebra-cavaco. São padronizados pela norma DIN 1896, para cones métricos (Stemmer, 1992).

Alargadores ponte são usados para alargamento de furos em produtos tais como chapas e membros estruturais para construção naval. Eles são disponíveis com canais retos ou em hélice.

Alargadores de tubos são pequenos, com ferramentas curtas e grossas usadas para encaixe de tubo cônico alargado para desobstrução. Eles tem uma conicidade de 62 mm/m.

A ferramenta conjugada broca-alargador permite eliminar uma operação secundária de furação para furos rasos. Dois tipos são mostrados na Figura 2.14. A ferramenta mostrada na Figura 2.14(a) é feita por fresamento de dois canais em hélice por toda extensão do

comprimento da ferramenta. A seção da broca é levemente menor em diâmetro que a seção do alargador, e os limites da broca prolonga-se apenas sobre o comprimento da seção da broca. A seção do alargador consiste de um para três canais de alargador fresado em cada espaço entre ranhuras à esquerda pela fresa nos canais da broca. Este tipo de ferramenta é sujeito às mesmas dificuldades na reafiação como às encontradas com brocas escalonadas. Estas dificuldades podem ser superadas pelo uso da ferramenta mostrada na Figura 2.14(b). Com esta ferramenta, os dois canais e arestas de corte da broca prolongam-se para trás através da seção do alargador; as arestas de corte do alargador estão em adição a estas e começam a uma distância adequada da ponta da broca.



Figura 2.14 - Dois tipos de ferramentas conjugadas broca-alargador (Metals Handbook - Volume 16, 1989).

Alargadores de diâmetro múltiplo são usados quando dois ou mais furos concêntricos de diferentes diâmetros devem ser alargados. Se um alargador separado é utilizado para cada furo, várias operações são necessárias, e torna-se difícil de manter o alinhamento dos furos. A Figura 2.15 mostra 3 tipos de alargadores de diâmetro múltiplo.

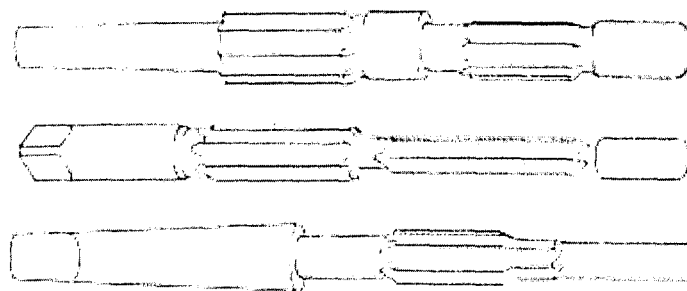


Figura 2.15 - Três tipos de alargadores de diâmetro múltiplo (Metals Handbook - Volume 16, 1989).

2.2.7. Reafiação

Para se obter o máximo rendimento dos alargadores, deve-se aplicar os mesmos princípios da maioria das ferramentas de corte. Um desses princípios é não permitir que a ferramenta perca demasiadamente o corte, através de reafiações periódicas. A reafiação é restringida à entrada, devendo-se observar que cada corte seja retificado igualmente, caso contrário a ferramenta poderá produzir furos sobredimensionados. A reafiação da entrada não deve ser feita manualmente, pois, é praticamente impossível manter as arestas de corte iguais (SKF, 1987), devendo ser realizada com todo o cuidado, em afiadoras de ferramentas, para garantir perfeita concentricidade dos gumes (Stemmer, 1992). Rocek e Boleslau (1982) e Stemmer apud Schroeter (1989) observaram que a vida do alargador é dez vezes maior quando o mesmo é lapidado ao invés de retificado.

2.3. ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O alumínio é o metal, depois do ferro, mais utilizado na fabricação de peças. Isto se deve ao grande campo de aplicação deste material, em virtude de suas características. O alumínio e suas ligas têm grande importância técnica devido à sua baixa densidade, elevada relação resistência/peso, elevada resistência à corrosão, endurecibilidade de muitas ligas, boa aparência, fabricabilidade e possibilidade de tratamentos superficiais (Weingaertner e Schroeter, 1991), além de outras propriedades.

Os maiores campos de aplicação dos alumínios são hoje a indústria de transportes (automóveis, aviões, vagões, etc.), a construção civil, a engenharia mecânica e eletrotécnica e a indústria de embalagens (Weingaertner e Schroeter, 1991).

As indústrias automobilística e aeronáutica desenvolveram numerosas ligas de alumínio de, normalmente, baixa resistência à corrosão e de baixa eletrocondutibilidade, mas com valores bem elevados de resistência à tração (por exemplo, 54 kgf/mm^2), após adequados tratamentos térmicos e mecânicos (Coutinho, 1980).

A usinagem deste material oferece várias vantagens importantes, incluindo velocidade de corte quase ilimitada, baixas forças de corte, excelente acabamento, bom controle dimensional e longa vida da ferramenta (Weingaertner e Schroeter, 1991).

As ligas de alumínio são consideradas, de uma maneira geral, de boa usinabilidade, e podem normalmente ser usinadas a velocidades bem maiores que metais pesados. Para uma máxima eficiência de corte, entretanto, as ferramentas e as condições de usinagem devem ser adequadas a cada liga específica (Weingaertner e Schroeter, 1991).

Entre as ligas de alumínio, a usinabilidade, assim como outras propriedades físicas e tecnológicas, varia muito com a composição química e com o tratamento térmico. A noção errônea de que o alumínio não é adequado à usinagem vem da falta de familiaridade com os parâmetros corretos de trabalho; em geral existe a tendência a aplicar as mesmas condições de usinagem de outros materiais ao alumínio, com resultados desfavoráveis (Weingaertner e Schroeter, 1991).

2.3.1. Propriedades

O conhecimento de algumas propriedades físicas do alumínio é fundamental para o trabalho vantajoso em usinagem, pois elas condicionam a escolha dos parâmetros de processo e os cuidados a serem tomados na fabricação (Weingaertner e Schroeter, 1991).

O alumínio é um metal notoriamente de pequena resistência mecânica. A resistência à tração do alumínio puro (99,99 %), que possui rede cristalina cúbica de faces centradas (Coutinho, 1980), é apenas de 6 kg/mm^2 em média. Entretanto, o alumínio comercial tem resistência à tração de cerca de 9 a 14 kg/mm^2 . É interessante notar que as impurezas metálicas presentes nessa forma de alumínio, principalmente ferro, silício e cobre, contribuem para aumentar sua resistência à tração de mais de 50 %. Por meio da introdução de elementos de liga, trabalho a frio ou tratamento térmico pode ser atingida resistência à tração até 60 kg/mm^2 . No estado recozido, a resistência à tração do alumínio é cerca da terça parte da do cobre recozido e de apenas a quinta parte da do aço doce (Gomes e Bresciani Filho, 1976).

Com uma densidade de 1/3 da densidade do aço e do latão, aproximadamente $2,7 \text{ g/cm}^3$ (Coutinho, 1980) em face de $7,9 \text{ g/cm}^3$ para o aço (Gomes e Bresciani Filho, 1976), as ligas de alumínio permitem operações em velocidades elevadas com menor desgaste do equipamento (fusos, correias, mancais e motores). Por serem menores os esforços inerciais, são possíveis mudanças de velocidade e manobras rápidas com menor vibração do conjunto, o que auxilia na obtenção de bom acabamento superficial. Para cada quilograma de material

usinado, a utilização de alumínio permite que sejam produzidas um número de peças 3 vezes maior. Dessa forma, o custo por peça confeccionada em alumínio é sempre inferior ao do latão e, em alguns casos, ao do aço, dependendo dos tipos de operações envolvidas, por exemplo, onde a velocidade de corte for fundamental (Weingaertner e Schroeter, 1991).

O ponto de fusão das ligas de alumínio está na faixa de 650 a 700 °C, temperatura que pode ser atingida na interface de contato peça/cavaco/ferramenta. Daí existe a facilidade de ocorrer soldagem por fusão do alumínio à ferramenta, empastando-a. O uso de recursos para diminuir o atrito e refrigerar é essencial para remover o calor gerado e evitar a formação da APC (Weingaertner e Schroeter, 1991).

O módulo de elasticidade é de aproximadamente 1/3 do módulo do aço e latão, cerca de 7.000 kg/mm² comparado a 21.000 kg/mm² para o aço (Gomes e Bresciani Filho, 1976), o que exige que certos cuidados sejam tomados na usinagem do alumínio, para evitar deformações e erro dimensional das peças. Deve-se então trabalhar com avanços menores, diminuindo a carga de compressão sobre a peça, evitando flexão indesejável; na usinagem de peças longas, fazer uso de apoios ao longo do comprimento; utilizar ferramentas com ângulos de corte agudos e bem afiadas (gumes bem acabados e polidos); o aperto na fixação deve ser controlado a fim de evitar amassamento e deformações. Neste caso, é indicado fixar as peças a usinar somente em suas seções mais sólidas. Ao se trabalhar com mordentes hidráulicos em equipamentos automáticos, dimensionados para o trabalho com aços, é recomendável diminuir a pressão de trabalho (Weingaertner e Schroeter, 1991).

A elevada condutividade térmica do alumínio, 0,57 cal/cm s °C (Coutinho, 1980), é um fator importante nos processos de usinagem, pois favorece a rápida dissipação do calor gerado, possibilitando o trabalho em velocidades elevadas (Weingaertner e Schroeter, 1991).

O coeficiente de dilatação térmica do alumínio, por ser maior que o do aço e do latão, pode gerar inconvenientes nos sistemas de fixação e medição das dimensões (Weingaertner e Schroeter, 1991).

O coeficiente de atrito do alumínio em relação ao aço é alto. Isso resulta em uma diminuição do ângulo de cisalhamento e, conseqüentemente, a deformação necessária para ocorrer o destaque da fração de metal que forma o cavaco é maior, o mesmo acontecendo com a energia consumida no processo. A situação piora se o cavaco é contínuo, com contato intenso entre ele e a face da ferramenta. A utilização de lubrificantes, materiais de ferramenta com menor coeficiente de atrito relativo e dispositivos de quebra de cavacos ajuda a diminuir

o arrasto sobre a ferramenta e a melhorar as condições de corte. Um bom acabamento na afiação também é importante na redução do atrito (Weingaertner e Schroeter, 1991).

Dentre as demais propriedades importantes das ligas de alumínio, tem-se:

- condutividade elétrica, todas as ligas de alumínio apresentam alta condutividade elétrica, $35 \times 10^4 \text{ } |\Omega \text{ cm} |^{-1}$ (Coutinho, 1980);
- conformabilidade, a boa conformabilidade possibilita a fabricação de perfis e tubos com formas e diâmetros quase irrestritos;
- soldabilidade, todos os métodos usuais de soldagem são aplicáveis às ligas de alumínio;
- tratamentos superficiais, as ligas de alumínio permitem uma grande variedade de processos específicos de tratamento superficial, com objetivos decorativos, para maior resistência mecânica, dureza superficial, resistência ao desgaste e outros;
- inofensivo à saúde, o alumínio e a maior parte de suas ligas não são tóxicos, sendo de fácil limpeza e esterilizáveis;
- alta resistência mecânica, algumas ligas de alumínio possuem resistência mecânica equivalente ou superior a determinados aços, com peso bastante inferior;
- resistência química e contra corrosão, o alumínio puro e as ligas sem cobre têm alta resistência química, bem como boa resistência à corrosão salina ou por meios ácidos;
- neutralidade magnética, todas as ligas de alumínio são livres de influências magnéticas (Weingaertner e Schroeter, 1991);
- alta ductilidade, com alongamento aproximado de 40% (Coutinho, 1980).

Apresenta ainda baixa dureza, HB 17-20, e limite de fadiga de $3,5 \text{ kgf/mm}^2$. Quando polido, tem o aspecto de prata, com grande refletibilidade (Coutinho, 1980).

2.3.2. Classificação das Ligas de Alumínio

Segundo Gomes e Bresciani Filho (1976), todas as ligas à base de alumínio podem ser divididas em dois grupos principais, a saber: ligas para tratamento mecânico ou conformadas; e ligas de fundição.

As ligas para tratamento ou trabalho mecânico são aquelas em que o metal é mecanicamente trabalhado por processos como laminação, extrusão, forjamento e estiramento. Este grupo admite duas subdivisões como segue: ligas que não respondem ao tratamento térmico e nas quais as propriedades mecânicas são determinadas pelo grau de trabalho a frio e consequente encruamento que podem sofrer, são conhecidas também como ligas trabalhadas não tratáveis ou ligas encruáveis; e ligas termicamente tratáveis, as quais suas propriedades mecânicas podem ser otimizadas através de tratamento térmico (Gomes e Bresciani Filho, 1976).

As ligas de fundição se classificam em ligas binárias, com um único elemento adicionado, e ligas complexas ou ternárias, com mais de dois elementos de liga. São três as ligas binárias comuns: ao cobre, ao magnésio e ao silício; menos comum é a liga ao estanho usada como anti-fricção. As ligas complexas são os grupos alumínio-cobre-silício, alumínio-cobre-silício-magnésio, alumínio-silício-magnésio e alumínio-cobre-silício-níquel-magnésio (Gomes e Bresciani Filho, 1976), as quais originam diversos microconstituintes, como Al_7Cu_2Fe , $NiAl_3$, Mg_2Si e Al_2CuMg , difíceis de se identificar pela microscopia óptica (Coutinho, 1980). Estes elementos de liga são adicionados com o objetivo de resolver alguns problemas de usinagem. Ferramentas com pequenos ângulos de saída podem normalmente ser utilizadas com pouco perigo de rebarbação das partes ou desenvolvimento da APC sobre as arestas de corte das ferramentas. As ligas que contêm silício como o principal elemento de liga requerem ferramentas com maiores ângulos de saída, e elas são mais economicamente usinadas a baixas velocidades e avanços (Metals Handbook - Volume 2, 1989).

2.3.3. A Liga de Alumínio-Silício

As ligas de alumínio-silício, largamente usadas, são fundidas em areia e em moldes permanentes, por gravidade ou por pressão. Apresentam boas propriedades em geral, com excelente resistência à corrosão, até mesmo a ácidos fracos. Essas ligas, principalmente em composições próximas do eutético, contendo de 11 a 14% de silício (Trent, 1984), e sob fusão simples, são muito frágeis devido à estrutura grosseira apresentada pelos grãos de silício e placas de alumínio (Perret, 1948, apud Gomes e Bresciani Filho, 1976). Porém, mediante o tratamento conhecido por “modificação”, é possível empregar um teor de silício até maior do

que o correspondente à composição do eutético e obter peças moldadas em areia de boas características estruturais, ao lado de melhor resistência mecânica e grande ductilidade. O tratamento de “modificação” não é necessário para ligas de alto teor em silício que venham a ser resfriadas rapidamente por moldagem sob pressão, ou em molde permanente (Gomes e Bresciani Filho, 1976).

As ligas de alumínio-silício são materiais difíceis de se cortar, tendo nódulos de silício, fase dura, distribuídos aleatoriamente sobre uma matriz de alumínio, fase mole. Estas ligas tem provado ser muito resistente ao desgaste, fazendo delas potencialmente úteis na confecção de instrumentos de precisão, máquinas, pistões e blocos de cilindros de motores em automóveis. Até agora, ligas de alumínio com pouco silício tem sido largamente utilizadas por causa de suas maiores usinabilidades do que as ligas de alumínio de alto silício (Fukumoto e Ayabe, 1990).

O silício aumenta a fluidez do alumínio líquido, permitindo que ele flua através de delgadas paredes na cavidade do molde e reproduza detalhes mais delicados. Ele também reduz a contração externa, melhora a estanqueidade, diminui porosidade no produto fundido, reduz o coeficiente de expansão e melhora a soldabilidade. Entretanto, não contribui apreciavelmente para a usinabilidade. Em teores altos torna difícil a usinagem. Contribui para a resistência mecânica, principalmente quando combinado com o magnésio por tornar a liga tratável termicamente. O silício preferivelmente deve estar na liga no estado modificado, isto é, em formas arredondadas e bastante dispersas na matriz de alumínio. O ferro presente em mais de 1,5 % pode causar uma estrutura grossa e quebradiça no silício alto, mas previne o metal de soldar-se ao molde metálico na fundição em molde permanente; vem daí a justificativa de prescreverem-se baixos teores de ferro nas ligas fundidas em areia e mais altos teores nas ligas fundidas em moldes permanentes (Gomes e Bresciani Filho, 1976).

O silício é um dos principais elementos de ligas em muitas ligas fundidas (tipos Al-Si, Al-Si-Cu, Al-Si-Mg e Al-Si-Mg-Cu). Embora as partículas duras de silício livre nestas ligas possui nenhum efeito prejudicial sobre a características de formação dos cavacos, elas causam um rápido desgaste na ferramenta. Tanto o percentual de silício quanto a dimensão da partícula de silício influenciam diretamente a quantidade de desgaste na ferramenta, de forma que aumentando qualquer um resultaria num aumento no desgaste daquela (Chamberlain, 1989). Isto foi verificado experimentalmente por Fukumoto e Ayabe (1990), onde observaram que quando a quantidade de silício aumentava os nódulos de silício também aumentava em

dimensão e número, resultando numa relação linear entre o aumento percentual em silício e o aumento em dureza da liga. A dimensão das partículas de silício nas ligas podem ser diminuídas pela adição de um modificador tais como sódio, estrôncio ou cálcio. Nas ligas de silício hipereutéticas, fósforo é o nucleante do silício primário mais eficiente, e sua adição na fusão resulta em maior número de partículas de silício de menores diâmetros. O refinamento das partículas de silício é muito eficaz na redução do desgaste da ferramenta (Chamberlain, 1989).

Quando se avalia a usinabilidade das ligas de alumínio, uma distinção deve ser feita entre as ligas conformadas e ligas fundidas. Estas últimas, com teores de silício que podem atingir cerca de 12 % ou mais, têm caráter abrasivo e impõe um desgaste acentuado às ferramentas de corte, que aumenta com o teor de silício. Para esse grupo devem ser empregadas ferramentas de metal duro da classe K, resistentes à abrasão (Weingaertner e Schroeter, 1991).

O núcleo e a periferia de peças fundidas podem apresentar uma usinabilidade bastante variável. Para ligas hipoeutéticas, do tipo GD-AlSi8Cu3, a periferia, dependendo do processo de fabricação, apresenta uma usinabilidade pior do que no núcleo. A resistência e a dureza menor do núcleo e o acúmulo de heterogeneidades em decorrência do processo de fundição do mesmo são responsáveis por isso (König e Erinski, 1979, apud König, 1981).

As ligas fundidas de alumínio-silício entre 17 e 23% de silício, onde o percentual de silício está acima da composição eutética, contêm em suas estruturas grandes grãos de silício, além do silício espalhado finamente da estrutura eutética. Os cristais grandes de silício aumentam demasiadamente o desgaste, até quando se usa ferramentas de metal duro. As ligas eutéticas podem ser usinadas a uma velocidade na faixa de 300 a 450 m/min com boa vida da ferramenta de metal duro, mas a presença de grãos grandes de silício pode reduzir a velocidade permissível para apenas 100 m/min. O efeito drástico das partículas de silício grandes é o resultado da alta tensão e temperatura as quais são impostas sobre a aresta de corte. As partículas de silício possuem um alto ponto de fusão (1420°C) e alta dureza (> 400 HV). O desgaste da ferramenta não depende apenas das fases presentes no material da peça, mas também de suas dimensão e distribuição. Partículas finas de silício no eutético podem passar pela aresta de corte sem maiores danos a ferramenta. A usinagem das ligas de alumínio-silício hipereutética é uma das mais importantes aplicações para as ferramentas de diamante policristalino (PCD) (Trent, 1984), e só podem ser usinadas satisfatoriamente com

estas ferramentas; a velocidade deverá ser diminuída com aumento do teor de silício (Weingaertner e Schroeter, 1991). Além disso, ligas que contêm mais que 5% de silício não terá o mesmo acabamento brilhante das superfícies usinadas como o de outras ligas de alumínio de alta resistência, mas terá superfícies levemente cinzentas com pouco brilho. Os cavacos são rasgados da peça ao invés de cizalhados, e precauções especiais, tal como o uso de fluidos de corte com características lubrificantes, devem ser tomadas para evitar a APC e rebarbas sobre as arestas de corte (Metals Handbook - Volume 2, 1989).

2.4. VARIÁVEIS INDEPENDENTES DO PROCESSO

Os engenheiros ou operadores de máquinas-ferramentas possuem controle direto sobre as variáveis de entrada, ou variáveis independentes, e podem especificá-las ou selecioná-las quando da montagem do processo de usinagem. As principais variáveis independentes são material e geometria da peça e da ferramenta, processo de usinagem específico, parâmetros de corte, dispositivos de fixação e fluido de corte (Black, 1989). Destacaremos os parâmetros de corte, a geometria da ferramenta e o fluido de corte.

2.4.1. Parâmetros de Corte

Para todas as operações de usinagem, é necessário selecionar uma profundidade de corte, uma velocidade de corte e um avanço. Muitos fatores afetam estas decisões entre eles, a quantidade total de material a ser removido, os materiais da peça e da ferramenta e o processo ou processos de usinagem. Estes devem ser especificados antes da escolha da profundidade de corte, da velocidade de corte e do avanço (Black, 1989), sendo estes últimos os principais parâmetros de corte no alargamento. Conforme a operação de usinagem e o par ferramenta/peça, são aconselhados intervalos de valores para profundidade de corte, velocidade de corte e avanço. Entretanto, esses valores podem ser modificados como adaptação às condições particulares de um trabalho. Devido a isso, é aconselhável o conhecimento da influência das variações dos parâmetros de corte sobre a usinagem (Weingaertner e Schroeter, 1991).

A profundidade de corte, ou sobremetal, deve ser tão grande quanto permitem os limites do equipamento (Weingaertner e Schroeter, 1991). Um sobremetal insuficiente poderá provocar um esfregamento ao invés de uma ação de corte. É muito difícil generalizar esse fato, pois, está intrinsecamente ligado ao tipo de material, avanço, acabamento desejado, profundidade do furo e saída de cavacos do alargador. O sobremetal recomendado para o alargamento é dado na norma DIN 2172, parte 1, na página 101. Esses valores servirão de referência para o início da usinagem (SKF, 1987). A qualidade e a exatidão da medida dos furos alargados dependem principalmente da diferença entre o diâmetro do furo aberto por uma operação preliminar e o diâmetro do furo alargado. Os valores do sobremetal recomendado, que representam o volume de material a ser removido pelo alargamento, são indicados na Tabela 2.1. Os valores a seguir referem-se a alargadores fixos, de aço-rápido. Para alargadores ajustáveis, os valores a seguir devem ser reduzidos à metade. Para alargadores manuais se tomam normalmente 0,03 a 0,08 mm de sobremetal (Stemmer, 1992).

Tabela 2.1 - Sobremetal em milímetros, recomendados para alargamento de furos (Metals Handbook - Volume 16, 1989).

Diâmetro dos furos	Aço e FoFo	Zn, Cu e ligas de Al	Plásticos
até 5 mm	0,1 a 0,2	0,5	0,2
5 a 20 mm	0,2 a 0,3	0,6 a 0,8	0,4
20 a 50 mm	0,3 a 0,5	-	0,5
maior que 50 mm	0,5 a 1,0	-	-

A velocidade de corte para o alargamento em máquinas pode variar consideravelmente, dependendo da composição e dureza do material a ser usinado, da máquina, da qualidade desejada ao furo (tolerância e acabamento) (SKF, 1987), do material, geometria e tipo do alargador, da quantidade de material a ser removido (Schroeter, 1989), da rigidez da montagem e da profundidade do furo. Embora a composição do material a ser alargado tenha influência sobre a velocidade ótima, a dureza tem muito mais efeito (Metals Handbook - Volume 16, 1989).

Por causa de seu projeto, a maioria dos alargadores são mais facilmente danificados que as brocas. Portanto, é prática usual alargar um furo com aproximadamente dois terços da velocidade utilizada na furação. Para o alargamento sob condições similares, velocidades recomendadas para alargadores de metal duro são três a quatro vezes maiores que os de aço-rápido. (Metals Handbook - Volume 16, 1989). Quanto maior a quantidade de material a ser

removido, menor deve ser a velocidade de corte empregada (Schroeter, 1989). A baixas velocidades de corte a produtividade diminui sem que haja um aumento significativo na vida da ferramenta, e a altas velocidades de corte pode provocar a quebra das arestas, aumentar o desgaste e produzir superfícies com maior rugosidade (Society of Manufacturing Engineers, 1983, apud Schroeter, 1989).

Os avanços para o alargamento são, normalmente, muito maiores do que aqueles utilizados para a furação, geralmente de 2,5 a 3,0 vezes o avanço utilizado para a furação do mesmo material. A utilização de avanços muito baixos pode resultar em um desgaste excessivo do alargador. É necessário que o avanço seja elevado o suficiente para evitar que o alargador esfregue ao invés de cortar. A utilização de avanços muito elevados resulta em furos fora da tolerância (SKF, 1987), acabamento ondulado com marcas espirais na parede do furo e maior vida da ferramenta (Society of Manufacturing Engineers, 1983, apud Schroeter, 1989). A idéia básica é utilizar o avanço mais elevado possível que resulte no acabamento e na tolerância desejados (SKF, 1987).

O avanço depende do acabamento superficial desejado, da resistência e rigidez da peça e da máquina-ferramenta (Weingaertner e Schroeter, 1991), da dimensão do furo e da profundidade de corte (Metals Handbook - Volume 16, 1989). A taxa de avanço no alargamento das ligas de alumínio é geralmente a mesma para todas as ligas e materiais de ferramenta; a dimensão do furo, entretanto, afeta mais significativamente o avanço ótimo (Metals Handbook - Volume 2, 1989).

2.4.2. Geometria da Ferramenta

As ferramentas de corte são normalmente projetadas para executar operações específicas, e desta forma a geometria da ferramenta (ângulos) é selecionada para executar funções específicas de usinagem. De uma maneira geral, prefere-se grandes ângulos de saída e de folga, mas eles são possíveis apenas nas ferramentas de aço-rápido. Ferramentas fabricadas de metal duro, cerâmica e outros tipos de materiais muito duros devem possuir pequenos ângulos, para garantir maior resistência nas ferramentas e evitar fraturas frágeis (Black, 1989).

A importância confiada aos alargadores exige que sua fabricação seja precisa, tomando-se cuidados especiais para obter a máxima concêntrica do diâmetro externo em

relação ao eixo de rotação, além de uma perfeita afiação das lâminas cortantes (Rossi, 1970). Os ângulos de corte e outros detalhes da ferramenta normalmente não são modificados para o alargamento de diferentes metais, exceto para metais moles tais como o alumínio quando o ângulo de alívio do chanfro é geralmente aumentado (Metals Handbook - Volume 16, 1989).

A hélice das lâminas tem uma grande importância para uma execução perfeita do furo. Ela pode ter sentido direito ou esquerdo. Aconselha-se para o alargamento de materiais dúcteis uma hélice a esquerda; para os materiais frágeis (ferro fundido ou bronze) uma hélice quase nula, e para os materiais mais duros e tenazes, uma hélice direita. Os sentidos da hélice das lâminas cortantes, e os ângulos de hélice, têm sido razões de numerosas experiências que, às vezes, tem dado resultados contrastantes. Achou-se, por exemplo, que os alargadores com dentes helicoidais de sentido esquerdo e de rotação direita tem produzido furos calibrados e perfeitamente lisos também num aço duro; requereu-se porém uma maior pressão axial (Rossi, 1970).

No caso de se alargar furos com interrupções na parede (rasgos de chaveta, furos, fenda), deve-se usar alargadores com dentes helicoidais. Os alargadores em geral são de corte à direita. Usando-se, então, uma hélice esquerda, o cavaco é empurrado para frente, evitando que prejudique a superfície já usinada. Além disto, ocorre um empuxo axial que fixa melhor a ferramenta no cone e elimina eventuais folgas da máquina. O emprego de uma hélice direita com alargador de corte à direita faz com que o cavaco seja puxado para cima, onde, se penetrar entre as paredes do furo e as guias do alargador, provoca arranhões. O empuxo é no sentido de arrancar o alargador do mandril. Por estas razões, a hélice direita só é usada no alargamento de furos cegos, nos quais o cavaco, jogado para frente, não encontraria lugar para se alojar (Stemmer, 1992). Pode se dizer que um alargador corta mais facilmente e requer menos força se ele é um alargador com hélice à direita (Gangopadhyay et alli, 1980, apud Soratgar, 1987). Segundo Miller (1986) apud Schroeter (1989), os alargadores de dentes retos, de menor custo, são os mais utilizados, e preferidos para trabalhos de precisão. Os alargadores de dentes helicoidais devem ser empregados no caso de alargamento de furos quando há maior exigência quanto ao acabamento.

Ohgo et alli (1979) observou que o uso de um alargador de hélice a esquerda com um chanfro de dois estágios e uma quantidade muito pequena de fluido de corte solúvel preveniram os efeitos adversos da APC e cavacos sobre a precisão do alargamento dos ferro-fundidos cinzentos.

O número de lâminas, que normalmente pode variar de 4 a 20, depende do diâmetro e do tipo de alargador. Não há uma regra fixa para definir isso; usa-se o critério de atribuir, à paridade de diâmetro, um maior número de lâminas para os alargadores manuais (Rossi, 1970). Porém, na prática, o número de lâminas, especificamente nos alargadores com lâminas soldadas de metal duro, depende do suporte de aço-rápido que fica após o metal duro. Para diminuir o problema de vibrações, que frequentemente ocorrem, marcando a superfície usinada, emprega-se uma divisão com passos diferentes entre os vários dentes, além de melhorar a circularidade dos furos usinados com comprimento a partir de 1,5 vezes o diâmetro. Os pares opostos tem divisão igual, para facilitar a execução e medição (Weinert et alli, 1998, Stemmer, 1992, e Metals Handbook - Volume 2, 1989). Um alargador pode produzir um acabamento superficial e uma precisão geométrica bons se seu número de dentes for o maior possível (Gangopadhyay et alli, 1980, apud Soratgar, 1987). Segundo Schmalz (1970) e von Poblitzki (1967), citados por Weinert et alli (1998), o desalinhamento da broca e do eixo da ferramenta, o desvio angular da superfície da peça com relação ao eixo da ferramenta, os erros de forma da pré-furação, as irregularidades das arestas de corte dos alargadores, os erros de concentricidade da ferramenta, a unidade de fixação e o fuso da máquina, além de irregularidades do material da peça, geralmente conduzem ao fato de que as arestas de corte não cortam simultaneamente e nem regularmente.

Alargadores com maiores diâmetros tendem a ter mais canais que os de menores. Se um alargador tem um número excessivo de canais, ele não proporcionará espaço suficiente para os cavacos. Se o mesmo tem poucos canais, pode ocorrer vibrações, especialmente se ele for um alargador de canal reto. Numa determinada aplicação (Metals Handbook - Volume 16, 1989), a mudança de 6 para 10 canais aumentou a vida da ferramenta em 35%; Noutra, entretanto, a substituição de um alargador de 8 canais por um de aresta única permitiu a obtenção de tolerâncias bem melhores. Os canais devem ser grandes o bastante para passar cavacos facilmente, e devem ter canais suficientes para proporcionar apoio adequado à ferramenta (Metals Handbook - Volume 2, 1989).

O guia cilíndrico do alargador tem como principais funções o de alisar a parede do furo e o de guiar o alargador durante a usinagem. Esta última função melhora a cilindridade do furo alargado. Para evitar um engripamento da aresta lateral de corte e para evitar que a parede do furo seja danificada ao retirar o alargador, há uma parte do alargador com um pequena conicidade, com redução do diâmetro em direção à haste (Ferraresi, 1972, e

Schroeter, 1989). Esta redução de diâmetro depende do material da peça, das dimensões do furo e do comprimento do alargador. O guia cilíndrico do alargador pode apresentar afiação circular ou chanfrada. A afiação chanfrada permite um acabamento melhor, porém apresenta a desvantagem de proporcionar menor tempo de vida à ferramenta, causada por um desgaste maior na superfície de folga, na passagem da aresta principal para a transversal de corte. Para alta solitação, a superfície deve ser temperada, retificada e lapidada (Ferraresi, 1972). Os guias cilíndricos dos alargadores devem ser tão estreitos quanto possível para reduzir a fricção entre a ferramenta e a peça (Metals Handbook - Volume 2, 1989).

Toda a usinagem é executada nos chanfros do alargador. Tem-se, então, dois gumes principais, um dos quais faz o trabalho de desbaste e outro de acabamento. Alargadores manuais distinguem-se dos alargadores de máquina pelo chanfro. O chanfro de 45° nos alargadores manuais não corta, servindo apenas como guia, para facilitar a entrada da ferramenta no furo. O chanfro secundário é bem comprido, abrangendo cerca de um quarto de comprimento de alargador (Stemmer, 1992).

Um acabamento refinado da aresta tem notável efeito sobre a vida da ferramenta; alargadores lapidados usinam 10 vezes mais furos que alargadores só retificados (Stemmer, 1992).

2.4.3. Fluido de Corte

As duas principais funções dos fluidos de corte são lubrificação a uma velocidade de corte relativamente baixa e refrigeração a uma velocidade de corte relativamente alta. A altas velocidades de corte não há tempo para o fluido penetrar na interface cavaco-ferramenta de modo a proporcionar uma lubrificação; e a baixas velocidades de corte a refrigeração não tem grande importância. Fluidos de corte a base de água são mais comuns no regime de refrigeração à alta velocidade, enquanto fluidos a base de óleo são adequados para o regime de lubrificação à baixa velocidade (Shaw, 1986). A importância do fluido a baixas velocidades de corte reside no seu potencial de lubrificação para reduzir o atrito e evitar a formação da APC. Enquanto nas altas velocidades de corte a refrigeração se torna mais importante (Machado e da Silva, 1997).

Os fluidos de corte melhoram a eficiência das operações de usinagem, aumentando a vida da ferramenta, melhorando o acabamento superficial e as tolerâncias, reduzindo as forças de corte e as vibrações. Os fluidos de corte melhoram o processo de corte de metal em parte pela refrigeração da ferramenta, peça de trabalho e cavacos, e em parte pela lubrificação da superfície de saída da ferramenta e outras superfícies as quais estão em contato com a peça de trabalho. O efeito do uso de um fluido de corte numa operação de usinagem depende não apenas das propriedades do fluido mas também, na maioria dos casos, das condições de usinagem, isto é, do tipo de material da ferramenta e da peça de trabalho, da geometria da ferramenta e das velocidades (De Chiffre et alli, 1994). Segundo Ohgo et alli (1979), o fluido refrigerante garante alta precisão, independente das condições de corte.

Existem dois grandes grupos de fluidos de corte: os puros e os fluidos de corte à base de água. Além destes dois grupos existem ainda os fluidos sintéticos, os semi-sintéticos e os fluidos químicos (Machado e da Silva, 1997).

Na operação de alargar, normalmente é enfatizado o acabamento; por isso, o fluido de corte é escolhido com o objetivo maior de lubrificar do que de refrigerar (SKF, 1987), pois evita os desgastes da parede do furo lubrificando os guias cilíndricos (Schroeter, 1989). Os fluidos de corte usados no alargamento servem para os mesmos propósitos que em outras operações de usinagem:

- previne a elevação da temperatura na peça de trabalho bem como na ferramenta. Elevação excessiva da temperatura pode afetar desfavoravelmente as dimensões de um furo alargado;
- melhora a ação de corte pela minimização da aderência da ferramenta sobre a superfície da peça de trabalho. Esta aderência ocorre mais frequentemente quando se alarga metais moles e dúcteis. Quando nenhum fluido de corte, ou um ineficiente, é utilizado, o acabamento obtido é frequentemente pior;
- remove cavacos para fora do furo. No acabamento do alargamento, se os cavacos não são continuamente conduzidos para fora do furo, eles podem ser apanhados pelas lâminas e poderá riscar ou goivar a superfície da peça (Metals Handbook - Volume 16, 1989).

Os fluidos de corte mais utilizados estão na Tabela 2.2. A quantidade de fluido usado pode ser mais importante que o tipo. Um fornecimento muito abundante mantém uma temperatura quase constante e cavacos dispersos (Metals Handbook - Volume 16, 1989).

Tabela 2.2 - Fluidos de corte utilizados no alargamento de vários metais (Metals Handbook - Volume 16, 1989).

METAL	óleo solúvel	óleo sulfurizado	querosene mais óleo animal	óleo neutro não viscoso	seco (*)
aço					
aço inoxidável					
ferro fundido cinzento					
ferro maleável ou nodular					
alumínio					
cobre					
latão					

(*) Quando nenhum fluido de corte é usado, um jato de ar é aconselhável para refrigeração ou para remoção de cavaco.

Embora os fluidos de corte são benéficos na maioria das operações de alargamento, algumas aplicações não requerem fluido. O ferro fundido cinzento é normalmente alargado a seco. O uso de um fluido de corte é algumas vezes impraticável por causa do projeto da peça de trabalho (Metals Handbook - Volume 16, 1989).

Quanto maior a velocidade de corte no alargamento maior a necessidade de um fluido de corte para reduzir a temperatura da peça de trabalho, para minimizar distorção e para prevenir sobremedida no alargamento. Com alargadores de metal duro, emulsões de óleo solúvel e água são os fluidos de corte mais largamente utilizados (Metals Handbook - Volume 2, 1989).

Para a usinagem do alumínio, Hatschek (1978) apud Schroeter (1989) recomenda o uso de emulsões de óleo em água em concentrações de 3 a 5%. As ligas de alumínio-silício requerem boa lubrificação. Se a precisão for importante, deve-se usar um bom refrigerante, devido ao alto valor do coeficiente térmico de expansão (Machado e da Silva, 1997).

2.5. VARIÁVEIS DEPENDENTES DO PROCESSO

As variáveis dependentes são determinadas pelo processo baseado na seleção prévia das variáveis de entrada ou independentes. Desta forma, o controle do engenheiro de fabricação sobre estas é normalmente indireto. As variáveis dependentes importantes são força

e potência de corte, dimensão e propriedades do produto acabado, acabamento superficial, desgaste da ferramenta e falha da ferramenta (Black, 1989). Destacaremos apenas a precisão dimensional, a integridade superficial e a potência efetiva de corte.

2.5.1. Precisão Dimensional

O objetivo da usinagem é obter uma superfície usinada na dimensão, geometria e propriedades mecânicas desejadas. Por ocorrer na usinagem um processo de deformação plástica, localizada, toda superfície usinada possuirá alguma deformação e tensões residuais. Estas tensões residuais são normalmente de tração e pode interagir com imperfeições superficiais para produzir início de fadiga ou causar corrosão. O engenheiro de fabricação deve tentar selecionar os níveis adequados de variáveis de entrada para produzir um produto que esteja dentro da tolerância especificada pelo projetista e que possua propriedades superficiais satisfatória (Black, 1989).

A produção de furos tem os erros de forma, circularidade e cilindridade, como os principais obstáculos quando se almeja alta precisão e, conseqüentemente, qualidade. As dimensões apenas em diâmetro não são suficientes para provar que um furo é totalmente cilíndrico.

O erro de circularidade pode ocorrer devido a uma fixação não correta da peça. Como por exemplo, a fixação de um tubo em uma placa de três castanhas, fixo por fora e torneado internamente, nos produzirá em decorrência da deformação elástica, após a soltura da peça da placa, uma forma diferente da forma inicial redonda (König, 1981). A medição de circularidade é realizada em aparelhos especiais tal como o *Talyround* (Agostinho et alli, 1977).

O erro de cilindridade pode ocorrer na furação de furos profundos com ferramentas espirais, em decorrência do desvio da ferramenta que ocorre devido a dois gumes não afiados no mesmo comprimento na broca. Em erros de cilindridade, geralmente se distinguem vários casos. Podemos ter um erro da linha evolvente desviando-se de uma reta. As superfícies de topo e a superfície evolvente de um cilindro, podem estar com um desvio fora dos 90°, ou a forma da seção pode ainda desviar da forma circular. No último caso citado, se

trata de um erro de circularidade, e ao invés de uma forma circular, pode-se ter a forma de uma elipse (König, 1981).

Soratgar (1987) observou uma melhora de 67% na precisão dimensional do furo de 12,7 mm no alargamento em relação à furação.

2.5.2. Integridade Superficial

A integridade de uma superfície usinada é frequentemente um dos resultados mais importantes. É um termo que envolve várias considerações: acabamento superficial, variação química, dano térmico (queimadura, transformação e revenido em excesso) e tensão residual (tração) desfavorável. O primeiro destes (acabamento superficial) é o mais importante para as operações de usinagem. Os outros são relativamente mais interessantes para superfícies polidas. Entretanto, onde o acabamento superficial é relativamente importante, uma operação final de acabamento é normalmente utilizada (Shaw, 1986). A integridade superficial é um resultado da combinação do processo de deformação plástica e propagação de trincas. Ela afeta as condições de funcionamento e a confiabilidade de componentes mecânicos. O controle desta variável, portanto, deve ser efetuado, principalmente quando vidas humanas estão em jogo (Machado e da Silva, 1997).

O acabamento superficial sofre influência de vários parâmetros de usinagem, incluindo: a geometria da ferramenta de corte, geometria da peça, rigidez da máquina-ferramenta, material da peça, condições de corte, material da ferramenta (Nakayama et alli, 1966, e Shouckry, 1982, apud Machado e da Silva, 1997), processo de usinagem e fluido de corte (Black, 1989).

Normalmente o acabamento superficial melhora com o aumento da velocidade de corte. A melhora é rápida até uma determinada velocidade crítica, devido à contínua redução das dimensões da aresta postiça. Depois que este ficou reduzido a um tamanho insignificante pouca melhora adicional do acabamento superficial se obtém com aumentos maiores da velocidade de corte. Um bom acabamento exige um avanço pequeno. O fluido de corte traz vantagens ao acabamento apenas na faixa de baixas e médias velocidades de corte, pois reduz a aresta postiça (Stemmer, 1987).

Na fabricação de peças, não é possível produzir superfícies ideais. A superfície de uma peça é, se observada ao microscópio, dotada de regiões com maior ou menor planicidade que é definida como sendo rugosidade da peça mesmo que essas peças, num aspecto macroscópico, sejam completamente lisas (König, 1981). A rugosidade superficial é um conjunto de irregularidades finas resultantes da ação inerente do processo de corte (marcas de avanço). A altura ou profundidade isolada das irregularidades é medida em um pequeno comprimento chamado de “cut off” (comprimento de rugosidade da amostra). A rugosidade média (Ra) é a média aritmética dos valores absolutos do perfil real ao perfil médio (König, 1981).

O acabamento de um furo alargado depende da dureza da peça de trabalho, da condição das arestas de corte, do avanço e da velocidade de corte (Metals Handbook - Volume 16, 1989). Soratgar (1987) observou que o alargamento melhorou o acabamento superficial em 43% em relação ao da furação de furos de 12,7 mm.

2.5.3. Potência Efetiva de Corte

Uma variação em algumas das variáveis do processo de usinagem altera a força e conseqüentemente a potência, mas a mudança é indireta de modo que o engenheiro não especifica as forças e nem as potências, apenas os parâmetros que influenciam estas. As forças são importantes pois elas geram as deflexões nas ferramentas, nas peças de trabalho e no sistema de fixação da peça, os quais por suas vezes afetam a dimensão final. Elas também influenciam os fenômenos de vibração, comum na usinagem. Obviamente, o engenheiro de fabricação gostaria de ser capaz de prever forças e potências, de modo que ele possa especificar com segurança o equipamento para uma operação de usinagem, incluindo a máquina-ferramenta, a ferramenta de corte e os dispositivos de fixação (Black, 1989).

A potência efetiva de corte é a potência disponível na ponta da ferramenta e consumida na operação de remoção de cavacos. Salvo raras exceções, a potência consumida é independente do material da ferramenta. Isto é válido tanto para a ferramenta de aço carbono, como aço rápido, ligas fundidas ou metal duro. Para ferramentas de diamante, entretanto, tem-se encontrado valores as vezes excepcionalmente menores. A potência consumida aumenta com a dureza da peça. O fluido de corte tem efeito desprezível sobre a força e potência de

corte em altas velocidades. Em velocidades pequenas e médias, um bom fluido de corte já pode provocar uma redução da potência e da força de corte, em virtude da redução do atrito entre cavaco e ferramenta (Stemmer, 1987).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios de alargamento e as medições de diâmetro, rugosidade e consumo de potência foram realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU-DEEME-UFU).

As medições de circularidade e cilíndricidade foram realizadas no Laboratório Metrológico EQ.42-41 da FIAT Automóveis S.A..

As análises metalográficas do material da peça de trabalho bem como a análise da superfície usinada dos furos utilizando-se microscopia eletrônica de varredura foram feitas no Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM-DECIF-UFU),

3.1. METODOLOGIA DOS ENSAIOS

Os parâmetros, ou variáveis independentes, estudados foram: sobremetal, velocidade de corte, avanço, ângulo de hélice, número de lâminas, guia cilíndrico, acabamento do plano de saída e fluido de corte. Em cada etapa variou-se o valor de um respectivo parâmetro, permanecendo constantes os demais, e para cada condição de usinagem, chamada de sub- etapa, foram realizados 32 furos, considerando a média desses resultados para análise. Para executar uma etapa seguinte, usou-se a melhor condição encontrada na etapa precedente. O critério, para isso, teve a precisão de diâmetro como prioridade, definindo assim a melhor condição. As etapas dos ensaios foram divididas conforme é mostrado na Tabela 3.1. Os valores das variáveis foram tomados de acordo com a experiência de engenheiros e técnicos da FIAT Automóveis S.A.. O furo alargado, sem o uso de bucha de guia para o alargador, teve diâmetro e profundidade de 12 mm, sendo o mesmo cego e sem chanfro. As variáveis dependentes a serem analisadas foram: diâmetro, rugosidade, circularidade, cilíndricidade e consumo de potência. A operação de furação precedente a todos os ensaios de alargamento teve avanço de 0,16 mm/rot e velocidade de corte de 30 m/min. A vazão do fluido de corte foi de aproximadamente 5,3 l/min. O objetivo deste trabalho é determinar a influência das variáveis do processo sobre a qualidade final dos furos alargados.

Tabela 3.1 - Etapas dos ensaios de alargamento.

etapa	variável	sub-etapa e valor da variável respectiva							
		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
1	sub-etapa	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
	a_p (mm)	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
2	sub-etapa	2.1		2.2		2.3		2.4	
	V_c (m/min)	25		45		60		80	
3	sub-etapa	3.1		3.2		3.3		3.4	
	f (mm/rot)	0,1		0,2		0,4		0,8	
4	sub-etapa	4.1		4.2		4.3		4.4	
	γ_f (°)	-10		-7		0		7	
5	sub-etapa	5.1			5.2			5.3	
	z	3			4			5	
6	sub-etapa	6.1			6.2			6.3	
	guia (mm)	0,2			0,4			0,7	
7	sub-etapa	7.1			7.2			7.3	
	acab.pl.saída	D7			D15			D45	
8	sub-etapa	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7	
	n° do fluido	1	2	3	4	5	6	7	

As demais condições de usinagem de cada sub-etapa se encontra no Anexo 8.1.

Os acabamentos das superfícies de saída (na indústria são denominados de planos de saída) das lâminas dos alargadores utilizados nos ensaios do presente trabalho foram obtidos com rebolos D7, D15 e D45. Esta simbologia designa a granulometria do rebolo diamantado usado no acabamento dos planos de saída. Segundo o fabricante dos superabrasivos, a granulação D7 é capaz de obter um R_a inferior a $0,05 \mu\text{m}$, enquanto que a granulação D15 pode conseguir um R_a em torno de $0,05 \mu\text{m}$ e, finalmente, a granulação D45 pode obter R_a na faixa acima de $0,05 \mu\text{m}$ até $0,15 \mu\text{m}$.

3.2. MATERIAL DA PEÇA DE TRABALHO

Para realização de todos os ensaios, foram utilizados como material da peça de trabalho barras fundidas da liga de alumínio-silício AlSi 62 (UNI) que corresponde às seguintes ligas: 322 SAE; 355.0 A.A.; SC 51 A ASTM; LM 16 B.S.; e G-Al Si. 5 Cu 1 DIN 1725. É uma liga fundida hipoeutética que foi submetida ao tratamento térmico de têmpera e

envelhecimento T6. A Tabela 3.2 apresenta a composição química nominal, e a Tabela 3.3 apresenta suas principais propriedades, todas fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3.2 - Composição química da liga de alumínio-silício utilizada.

LIGA	Si	Cu	Mg	Ti	Fe	Mn	Zn	Ni	Pb	Sn	Al
AlSi 62	6,00	2,06	0,38	0,15	1,00	0,50	1,00	0,20	0,15	0,10	balanço

Tabela 3.3 - Características físicas e elétricas da liga de alumínio-silício utilizada.

CARACTERÍSTICA		VALOR
massa volumétrica a 20 °C		2,71 kg/dm ³
calor específico a 100 °C		~ 0,23 cal/(g °C)
calor latente de fusão		~ 0,93 cal/g
condutividade térmica a 20 °C		1,38 W/(cm K)
resistividade a 20 °C		4,2 μΩ cm
módulo de elasticidade		7200 kg/mm ²
ponto de fusão	superior	627 °C
	inferior	554 °C

As barras foram usinadas com a fresadora CNC Romi Interact IV para uma medida final de 33 x 80 x 400 mm. A configuração do corpo de prova com os respectivos furos é mostrada na Figura 3.1.

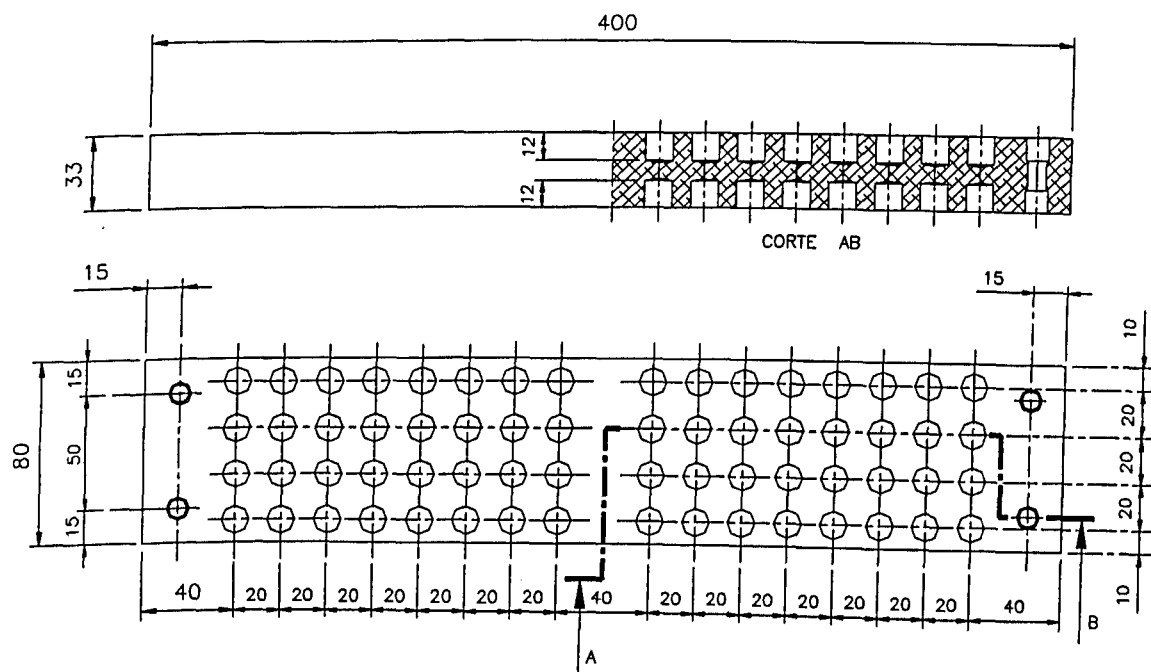


Figura 3.1 - Corpo de prova com dimensões em milímetros (sem escala).

Segundo Schroeter (1989), a distância mínima entre paredes de furos num corpo de prova é de 0,5 vezes o diâmetro do furo. Este distanciamento tem por objetivo evitar a influência de possíveis deformações, causadas pela usinagem de um furo, sobre furos já existentes. Salienta-se que este material apresentou um índice de porosidade elevado em todas as barras.

Uma amostra do material da barra foi seccionado, com serra mecânica alternativa, a fim de se obter a dureza e a micrografia. Para levantamento das medidas de dureza, utilizou-se o método Vickers (DIN 50133). Para isso, foi realizado lixamento das amostras com lixas d'água variando de 80 a 600. Após o lixamento foram feitas 25 medidas de dureza em diferentes regiões ao longo da seção transversal da barra, usando-se um durômetro universal Vickers da marca Wolpert, tendo este, um penetrador piramidal de base quadrada, com carga de 10 kg aplicada lentamente, durante 30 segundos. Foi mantida uma distância entre as impressões, para que cada impressão não fosse afetada pela outra. A média das durezas foi calculada e obteve-se um valor aproximado de 95 HV. Posteriormente aos ensaios de dureza, a amostra foi novamente lixada com lixa d'água 1000 e, em seguida, submetida ao polimento eletrolítico com pasta de diamante nas granulometrias de 3 μm e 0,25 μm . Depois de pronta, a amostra foi fotografada pelo microscópio ótico Neophot 21, com ampliação de 127 vezes, e pode ser vista na Figura 3.2.

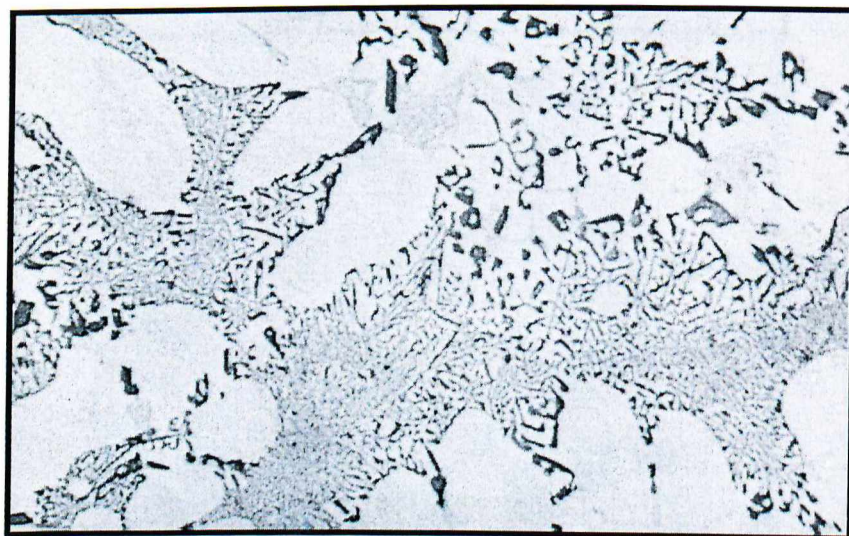


Figura 3.2 - Microestrutura na seção transversal da liga de alumínio-silício utilizada nos ensaios.

A micrografia apresenta regiões claras constituídas de dendritas de alumínio com elementos tais como silício e cobre em solução sólida. As regiões interdendríticas apresentam um eutético muito provavelmente do tipo alumínio-silício, encontrado nas ligas binárias de AlSi. Além disso, nota-se a presença de microconstituintes mais escuros, podendo ser estes constituídos de outros eutéticos (Metals Handbook, 1973).

3.3. MATERIAL DAS FERRAMENTAS

Por ser o processo de alargamento uma operação subsequente à furação, faz-se necessário o uso de brocas além dos alargadores.

3.3.1. Brocas

Todas as brocas utilizadas são de aço-rápido com a seguinte especificação: Broca DIN 345 “diâmetro da broca” HSS W ED.03/78. Para os ensaios relativos à variação do sobremetal foram necessários usar brocas, Figura 3.3, com os seguintes diâmetros: 10,4; 10,6; 10,8; 11,0; 11,2; 11,4; 11,6; e 11,8. As brocas foram fabricadas pela Twill.

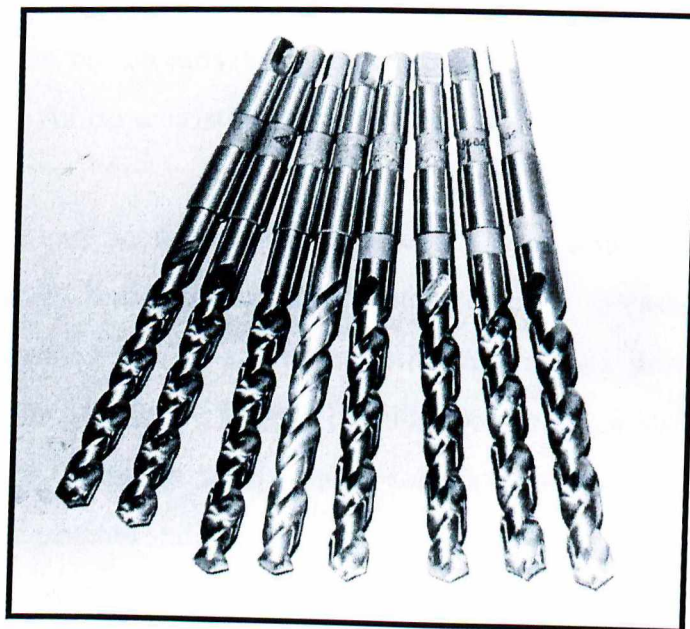


Figura 3.3 - Brocas utilizadas nos ensaios.

3.3.2. Alargadores

Os alargadores usados nos ensaios, Figura 3.4, possuem corpo de aço-rápido (VND) e lâminas soldadas de metal duro (K10). As características geométricas de cada alargador utilizado se encontra no Anexo 8.2. Os alargadores foram fabricados pela BMD.

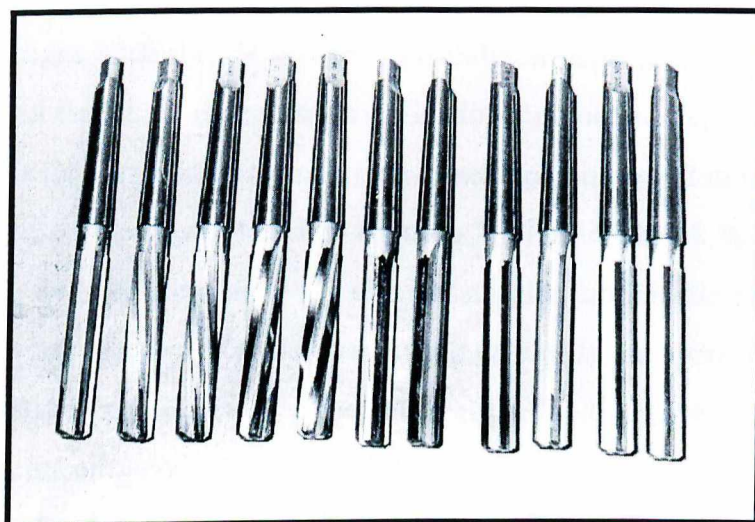


Figura 3.4 - Alargadores utilizados nos ensaios.

3.4. FLUIDOS DE CORTE

Foram utilizados, nos ensaios de alargamento, 7 diferentes tipos de fluido de corte de 3 fabricantes diferentes. As características físico-químicas de cada fluido são apresentadas no Anexo 8.3.

O fluido 1 é de base semi-sintética, miscível em água, contendo aditivos inibidores de corrosão, anti-oxidantes, anti-espuma, detergentes, extrema pressão (EP), propriedades lubrificantes e ação bactericida de amplo espectro. A presença de bactericidas elimina a proliferação de bactérias aeróbicas e fungos. É utilizado em retífica plana, centerless, etc., nas concentrações de 2 a 4 % em água, originando soluções translúcidas e transparentes muito estáveis. Ele é particularmente indicado no trabalho com rebolos finos e para operações de corte em geral, tais como torneamento, furação, alargamento, fresagem, rosqueamento, lapidação em metais ferrosos e naquelas consideradas de corte severo. Nos ensaios do presente trabalho, ele foi utilizado na concentração de 3 % em água.

O fluido 2 é um fluido de corte de alto rendimento, miscível em água, a base de óleo mineral, biostático e completamente isento de cloro e fósforo. Suas propriedades podem ser resumidas assim: contém inibidores de formação de nitrosamina; concentração de uso vantajoso; alta resistência a ataque de bactérias; não possui cloro, fósforo, metais pesados e biocidas; baixa tendência para formação de espuma; e ausência de resíduos viscosos no maquinário. É recomendado para todas as operações de corte, inclusive operações de estampagem em metais não-ferrosos, especialmente alumínio e suas ligas. Também é utilizado em operações com ligas amarelas, já que tem um inibidor específico usado no produto. Uma concentração mínima de 5,0 % é necessária podendo-se aumentar dependendo da severidade da operação. O fator de correção para leitura da concentração no refratômetro é de 1,46. Nos ensaios de alargamento do presente trabalho o fluido 2 foi utilizado a 8 % em água.

O fluido 3 é de base semi-sintética que possui alta lubricidade e extrema pressão. É isento de cloro, enxofre, nitratos e fenóis. É indicado para todas as operações de usinagem em geral, podendo substituir aos óleos de corte integrais ou solúveis de base mineral tipo EP. Pode ser usado em concentrações de 3 % a 15 %, dependendo do grau de severidade de cada operação e/ou tipo de metal trabalhado. Suas principais aplicações são: mandrilamento, torneamento, furação, alargamento, broqueamento profundo, rosqueamento, fresamento, brochamento, geração de engrenagens, serramento e corte, linhas transfer, retíficas e brunimentos. O fluido de corte 3 foi utilizado a 9 % em água nos ensaios de alargamento do presente trabalho.

O fluido 4 é um fluido de base semi-sintética, miscível em água, contendo aditivos inibidores de corrosão, anti-oxidantes, anti-espuma, detergentes, extrema pressão (EP), propriedades lubrificantes e ação bactericida de amplo espectro. A presença de bactericidas elimina a proliferação de bactérias aeróbicas e fungos. É usado em retíficas e outras operações de usinagem nas respectivas concentrações de 2 % e 4 % em água, originando soluções translúcidas e transparentes muito estáveis. É indicado para operações de corte em geral, tais como torneamento, furação, alargamento, fresagem, rosqueamento em metais ferrosos e naquelas consideradas de corte severo. Nos ensaios do presente trabalho, ele foi utilizado na concentração de 3 % em água.

O fluido 5 é um fluido de corte semi-sintético bioestável, recomendado para operações de usinagem em geral e retífica. Forma micro emulsão semi-translúcida e é adequado para metais ferrosos de média a alta tensão e metais não-ferrosos. Contém óleo lubrificante

mineral, agente anticorrosivo, antiespumante, base emulgadora bioestável e aditivo de extrema pressão. Este fluido propicia os seguintes benefícios: prolonga a vida da emulsão devido à sua bioestabilidade; suporta alto grau de contaminação por *tramp oil*; proporciona elevada proteção anticorrosiva; apresenta alta resistência à degradação microbiológica, evitando a ocorrência de odores desagradáveis; oferece maior segurança em relação à saúde e meio ambiente por ser isento de nitrito e fenóis; e garante maior vida útil da ferramenta e melhor acabamento das peças por conter agente de extrema pressão. A concentração recomendada para a usinagem em geral é de 3 a 5 %. Utilizou-se 5 % em água nos ensaios do presente trabalho.

O fluido 6 é um fluido de corte sintético bioestável solúvel em água. É utilizado em operações de usinagem em geral e retífica de metais ferrosos e não-ferrosos. Os benefícios proporcionados pelo uso deste fluido são: redução dos custos de produção, a bioestabilidade aumenta a vida útil da emulsão e garante um bom desempenho, mesmo com elevada contaminação por "*tramp oil*"; e proteção, onde o elevado poder anticorrosivo protege a peça usinada e a ferramenta contra a corrosão. A alta resistência à degradação microbiológica evita a ocorrência de odores desagradáveis. A isenção de nitritos e fenóis garantem maior segurança à saúde do operador e ao meio ambiente. A concentração recomendada pelo fabricante na usinagem em geral é na faixa de 3 a 5 %. A concentração utilizada nos ensaios de alargamento foi de 5%.

O fluido 7 é um fluido de corte solúvel bioestável, não espumante, semi-sintético do tipo EP, isento de cloro, nitritos e fenóis, para usinagem geral de ferro fundido, aços carbono, aços liga e inoxidáveis, alumínio e suas ligas e metais amarelos. É recomendado para uso em sistemas centralizados ou reservatórios individuais de máquinas operatrizes de comando numérico e convencionais, de todos os tipos de metais. Especialmente indicado para operações com água mole ou artificialmente abrandadas onde haja problemas de espuma. Ele proporciona os seguintes benefícios: devido a sua resistência à formação de espuma, pode ser usado em locais com água mole ou artificialmente abrandadas e não há problemas de entupimento e transbordamento; sua excelente propriedade EP garante o seu uso em ligas de aço e alumínio de difícil usinabilidade, além de garantir bom acabamento superficial e longa vida útil da ferramenta, mesmo em operações severas; graças a sua versatilidade, pode ser usado na maioria das operações de usinagem para todos os tipos de materiais; pode substituir fluidos de corte integrais e é compatível com todos os tipos de tintas e selos hidráulicos; a sua

resistência ao desenvolvimento de fungos e bactérias permite longa vida útil do fluido, isenção de odores desagradáveis, menores custos de descarte, maior produtividade e baixo consumo de biocidas; graças a sua boa proteção anticorrosiva, não há corrosão do equipamento ou da peça usinada; possui odor agradável e não irritante, emulsão facilmente descartável por técnicas convencionais. No presente trabalho, utilizou-se uma concentração de 3 %.

3.5. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.5.1. Máquina-Ferramenta

Para a realização dos ensaios, inicialmente com a furação e na sequência com o alargamento, foi utilizado como máquina-ferramenta a fresadora CNC Romi Interact IV (Figura 3.5), com 16 kW de potência, com variação contínua de rotação do eixo árvore (40 a 4000 rpm) e avanço rápido (0 a 4800 mm/min).

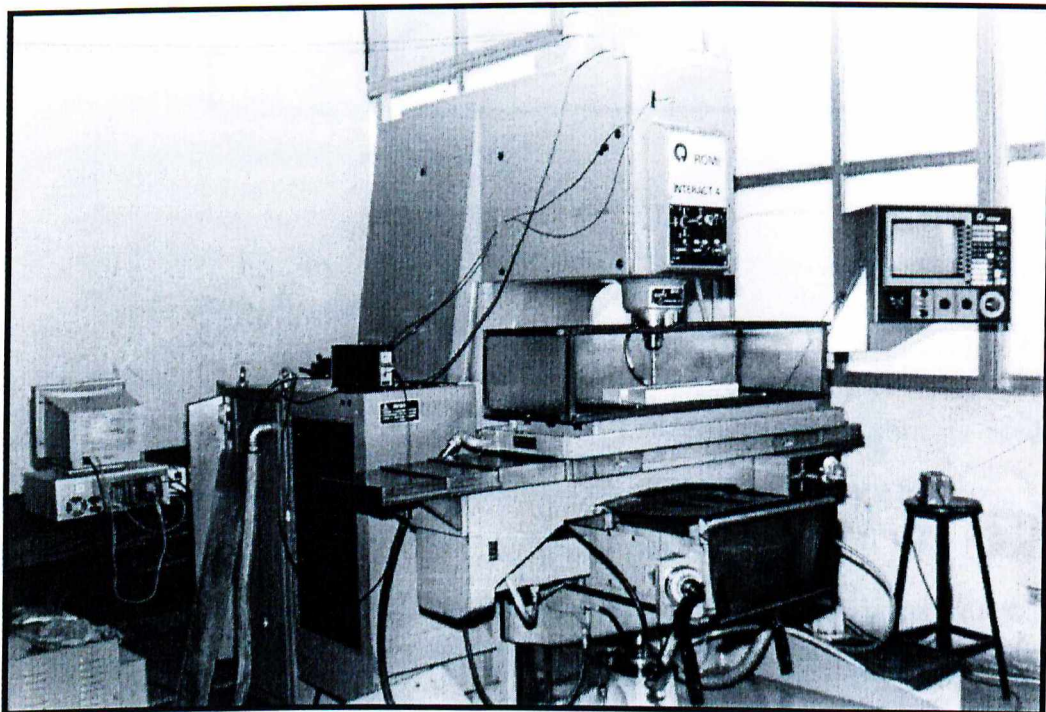


Figura 3.5 - Fresadora CNC utilizada nos ensaios.

3.5.2. Micrômetro Interno

Para as medições do diâmetro dos furos foi usado um Micrômetro Interno Tesa (Figura 3.6). A ajustagem do Micrômetro Interno Tesa foi realizada utilizando-se um Furo Padrão OR965 (Figura 3.6) com medida de 11,000 mm fornecido pelo fabricante. A leitura do micrômetro interno no furo padrão foi verificada de 4 em 4 furos.

Características do micrômetro:

Resolução: 0,001 mm;

Faixa de indicação da escala principal: 10-12 mm.

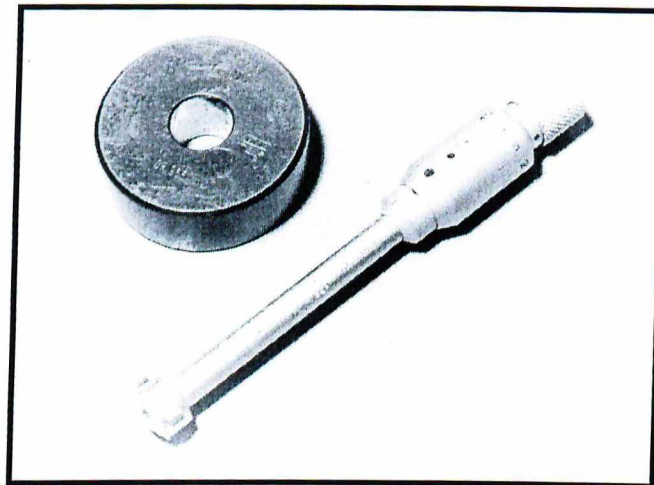


Figura 3.6 - Micrômetro interno e furo padrão.

3.5.3. Rugosímetro

Usou-se o Rugosímetro SurfTest 211 Série 178 da Mitutoyo para as medições de rugosidade. A sua ajustagem foi realizada utilizando-se um Padrão de Aferição n° 178-602 (mm/pol.), cujo $R_a = 2,95 \mu\text{m}$ (116 μin) e $R_{\text{max}} = 11,3 \mu\text{m}$ (445 μin).

A Figura 3.7 mostra a montagem para medição de rugosidade nos furos. Utilizou-se quatro blocos de apoio com medidas de altura diferentes e necessárias para a viabilização das medições das quatro fileiras de furos. Foram executadas quatro medições em posições diferentes em cada furo. Tomou-se o cuidado de evitar as porosidades presentes.

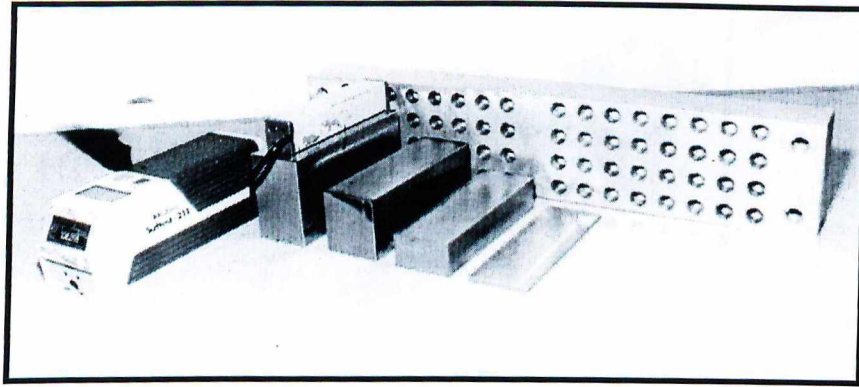


Figura 3.7 - Medição da rugosidade dos furos do corpo de prova utilizando blocos de apoio.

3.5.4. Medidor de Cilindricidade e Circularidade

Para as medições dos erros de forma, cilindridade e circularidade, usou-se o Talyrond 3 da marca Rank Taylor Hobson. O Talyrond é um instrumento de medição de precisão do tipo posicionador de rotação para tolerâncias de medição de circularidade, cilindridade, alinhamento, perpendicularismo, paralelismo, planaridade (colocado sobre um suporte circular), reticidade, concentricidade e coaxialidade. O perfil é gravado tanto como gráfico polar, para medições circulares, quanto para gráfico linear, para medições retilíneas, com certos padrões de circularidade colocados nos medidores de um computador de referência ou num dispositivo digital.

3.5.5. Refratômetro

Todos os fluidos de corte utilizados nos ensaios de alargamento tiveram suas concentrações controladas pelo refratômetro manual Atago do tipo N1 (Brix 0~32 %), mostrado na Figura 3.8. Os refratômetros manuais Atago são instrumentos óticos segundo os quais podem rapidamente medir a concentração de soluções aquosas usando o princípio do ângulo crítico de refração, que determina o índice refrativo do líquido ou material sob teste. Antes de usá-lo, fez-se uma calibração do refratômetro utilizando água destilada a uma temperatura de 20 °C.

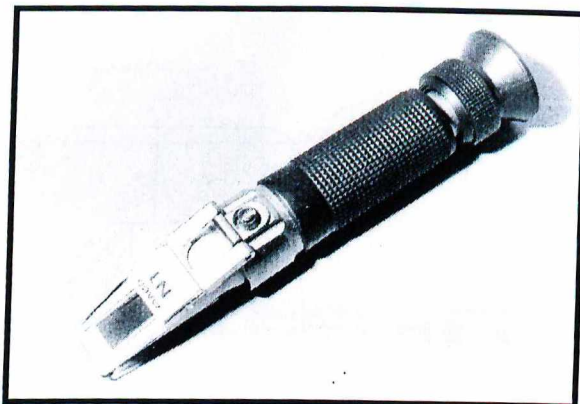


Figura 3.8 - Refratômetro manual.

3.5.6. Microscópio Eletrônico de Varredura

Para analisar as superfícies usinadas dos furos pelo processo de alargamento, utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura DSM 940 A da Zeiss. As amostras foram preparadas seccionando-se as barras no centro dos furos, de tal maneira que disponibilizava uma superfície semicircular para análise. As amostras eram fotografadas com uma ampliação de 7 vezes.

3.6. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE POTÊNCIA

A medida do consumo de potência dos ensaios de alargamento foi realizada através do sensor de corrente Hallsensor NW-SC-50, que mede a corrente de alimentação do motor da árvore responsável pela rotação do eixo Z. Além deste, usou-se uma fonte de 220 V, para alimentar o próprio sensor de corrente, e uma placa de aquisição de dados CYRDAS 1602, que recebia os sinais enviados pelo sensor de corrente em milivolts, acoplada num microcomputador AT 386, onde com um programa calculava-se as potências em vazio, total e efetiva de corte. A Figura 3.9 mostra esquematicamente o sistema de aquisição de potência. Um potenciômetro e uma bateria de 1,5 V foram usados para verificar a leitura da placa, e um watímetro Yew-Yokogawa Electric Works modelo 2433-02 para verificar a corrente que alimentava o motor referido acima.

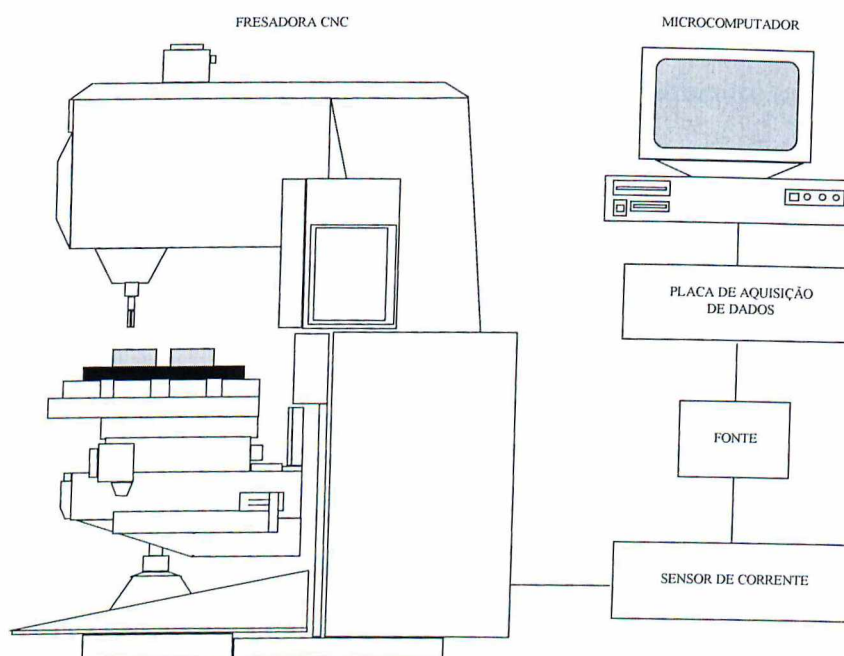


Figura 3.9 - Sistema de aquisição de potência.

3.7. SISTEMA DE FIXAÇÃO

Foi utilizado, para a fixação dos alargadores e das brocas, um mandril DIN 69871-B ISO 40 CONE MORSE 1. Os corpos de prova, em pares, foram fixados com parafusos numa placa de aço 1020, a qual era fixada na mesa da fresadora CNC. A montagem do sistema de fixação pode ser vista na Figura 3.10.

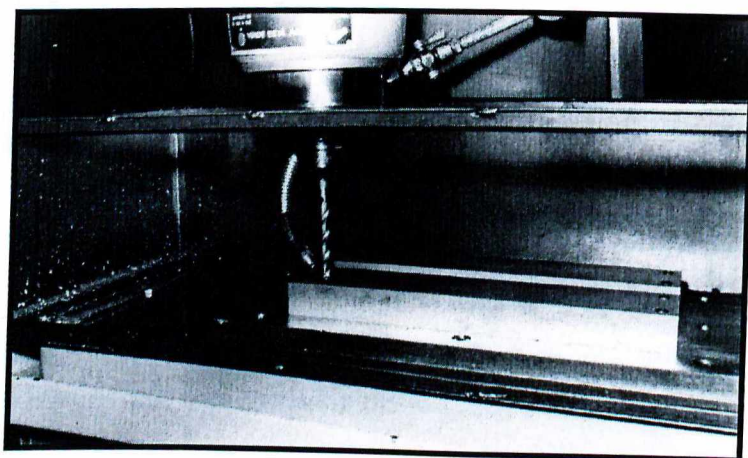


Figura 3.10 - Montagem do sistema de fixação para realização dos testes.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados obtidos em todos os ensaios de alargamento estão no Anexo 8.4. É importante salientar que os resultados que serão apresentados representam a média de 32 furos executados nas mesmas condições. As tabelas que são apresentadas a seguir mostram as médias e os desvios padrões das variáveis dependentes estudadas. Usou-se o critério de rejeição Chauvenet (Holman, 1978) na determinação das médias e dos desvios padrões. Nas tabelas aparecem as simbologias Cr e Cl, as quais representam circularidade e cilindricidade respectivamente.

O erro de circularidade é medido através da circunscrição do mesmo num círculo básico, onde a área interna formada pelas linhas do furo real e do círculo básico é igual a área externa formada pelas mesmas linhas. O seu valor é a máxima diferença de raio, ou seja, a diferença entre o maior raio (R) e o menor (r). É apresentado na Figura 4.1 um modelo simplificado do gráfico polar, onde se mede os erros de circularidade.

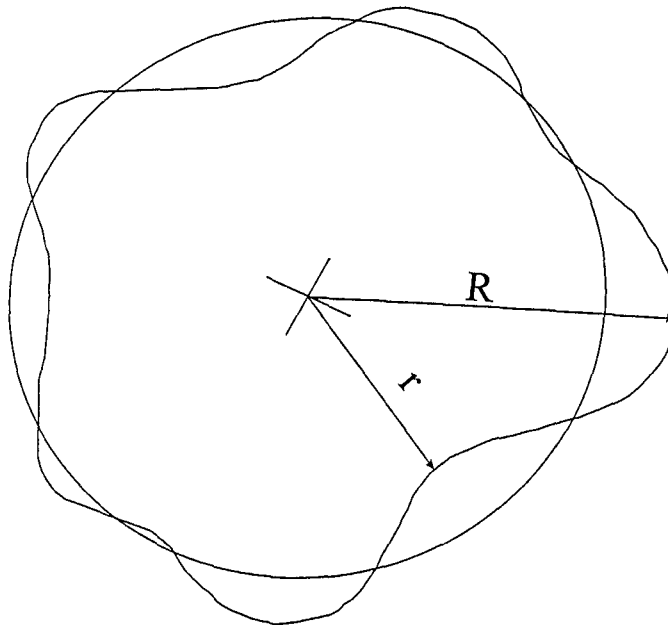


Figura 4.1 - Modelo simplificado do gráfico polar, onde se mede os erros de circularidade.

O erro de cilindricidade é medido num gráfico linear, que é mostrado simplificada na Figura 4.2. São traçadas neste gráfico duas retilidades a 180° , uma da outra. O valor é determinado pela diferença entre a distância máxima (D) e a distância mínima (d) entre as linhas traçadas divididas por dois.

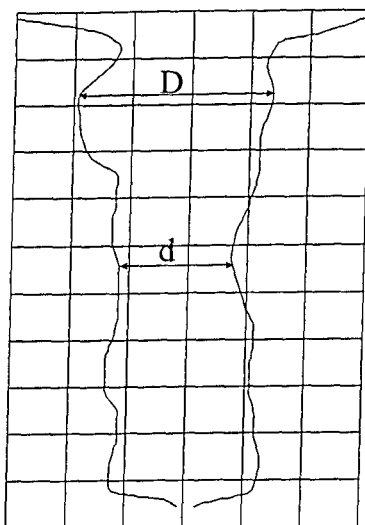


Figura 4.2 - Modelo simplificado do gráfico linear, onde se mede os erros de cilindridade.

Antes de apresentar os resultados, ressalta-se que as velocidades utilizadas nos ensaios (ver Anexo 8.1) são de 45 m/min para a 1ª etapa e 25 m/min para as demais, com exceção da etapa 2, onde este parâmetro foi variado de 25 a 80 m/min. Nesta faixa de velocidades de corte, relativamente baixas, haverá o desenvolvimento da Aresta Postiça de Corte (APC) na usinagem dessa liga de alumínio-silício, pois existe a presença de 2ª fase (eutético com 12% de silício) como mostra a Figura 3.2, requisito fundamental para o aparecimento da APC (Willians e Rollanson, 1970, apud Machado e da Silva, 1997). A presença da APC irá afetar sobremaneira as variáveis em estudo (diâmetro, acabamento, circularidade, cilindridade e potência consumida). A velocidade de corte é o parâmetro mais influente na APC, portanto, quando esta não for a variável em estudo, velocidade de corte constante, a APC afetará igualmente todos os resultados. O mesmo, entretanto, não pode ser dito quando a velocidade de corte for o parâmetro em estudo (etapa 2).

4.1. SOBREMETAL

Considerando que o sobremetal é o dobro da profundidade de corte, a_p , os resultados serão apresentados em função de a_p . A Tabela 4.1 apresenta os valores médios de cada variável dependente obtidos nos ensaios de alargamento da etapa 1, referente à variação do sobremetal.

Tabela 4.1 - Resumo dos resultados encontrados na etapa 1.

sub-etapa	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
a_p (mm)	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
\varnothing (mm)	12,0871	12,0939	12,0851	12,0867	12,0795	12,0703	12,0492	12,0689
desvio	0,0119	0,0073	0,0087	0,0101	0,0106	0,0154	0,0048	0,0350
Ra(μ m)	2,9716	3,0331	2,7673	3,0170	2,9245	2,5239	2,9932	4,4525
desvio	0,7237	0,6072	0,4482	0,4567	0,5186	0,6066	0,6162	0,7687
Cr(μ m)	0,0456	0,0386	0,0343	0,0376	0,0265	0,0228	0,0243	0,0554
desvio	0,0229	0,0183	0,0122	0,0137	0,0113	0,0075	0,0304	0,0180
CI(μ m)	0,0449	0,0463	0,0608	0,0530	0,0544	0,0450	0,0119	0,0337
desvio	0,0084	0,0056	0,0151	0,0079	0,0109	0,0112	0,0066	0,0136

A Figura 4.3 mostra a influência do sobremetal sobre o diâmetro dos furos alargados.

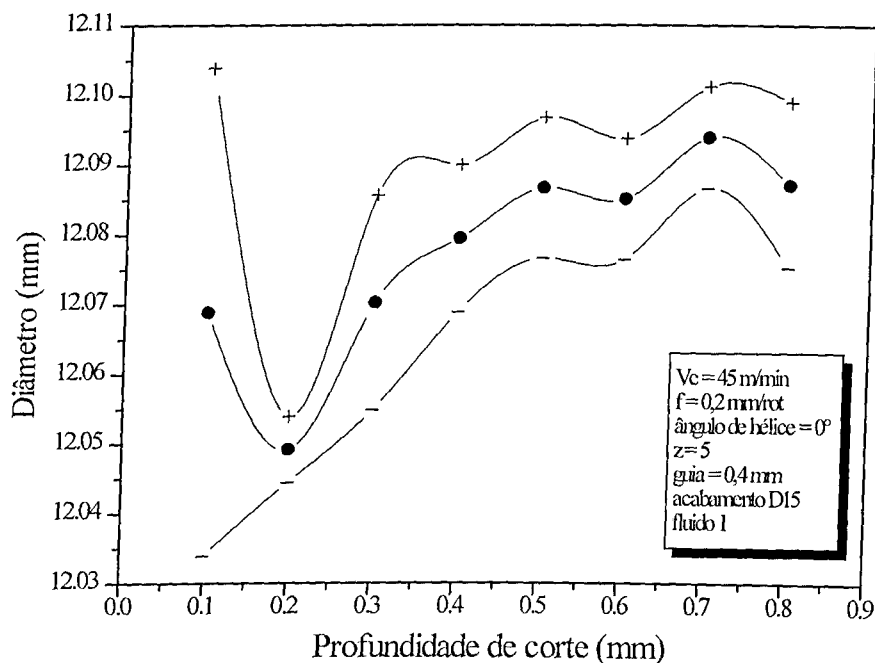


Figura 4.3 - Influência do sobremetal sobre o diâmetro.

Nota-se que todos os sobremetais geraram diâmetros maiores que o nominal. A profundidade de corte de 0,2 mm (sobremetal de 0,4 mm) apresentou o menor valor de variação de diâmetro (12,0492 mm), e valores de profundidade de corte maiores que 0,2 mm resultaram num comportamento crescente do diâmetro. Ohgo et alli (1979), alargando ferrofundido cinzento com 3,1 % de carbono sem refrigerante, observaram que um sobremetal de 0,5 mm tinha produzido uma precisão muito maior que outro de 0,9 mm.

A Figura 4.4 apresenta o comportamento da rugosidade com o sobremetal.

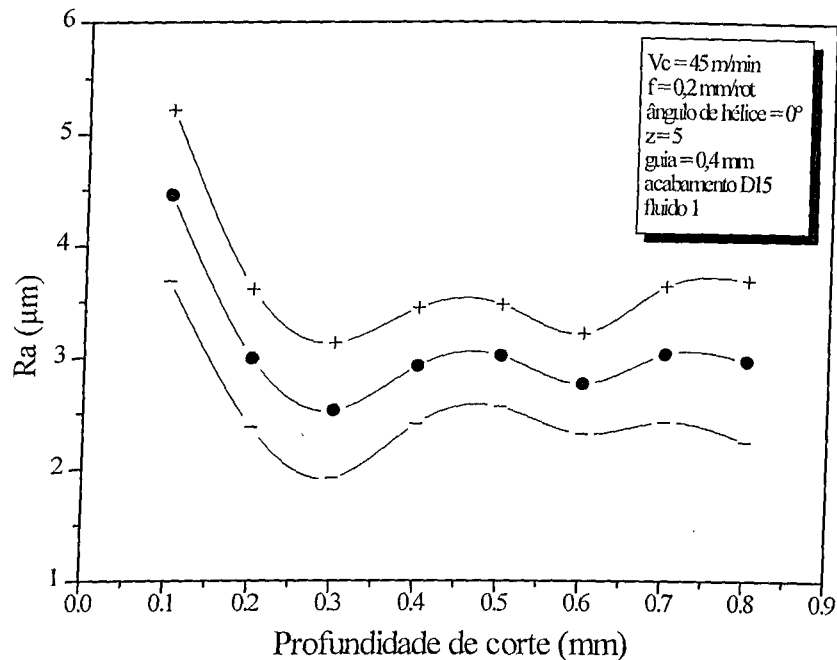


Figura 4.4 - Influência do sobremetal sobre a rugosidade.

O melhor acabamento foi obtido com profundidade de corte de 0,3 mm. Verificou-se que grandes valores de sobremetal tenderia a piorar ligeiramente o acabamento, enquanto valores bem pequenos resultou num péssimo acabamento. Observou-se que para pequenos valores de sobremetal havia o problema de se ter uma pequena quantidade de material a remover, resultando em alguns pontos da superfície com apenas um esmagamento do material, sem que houvesse um corte efetivo, sendo possível observar a existência de marcas da usinagem anterior. Para valores maiores ocorreu um aumento de forças de usinagem e de vibrações audíveis. O mesmo ocorreu nos experimentos de Schroeter (1989), alargando furos de 12 mm de diâmetro na liga de alumínio 7075-T651 utilizando alargadores de aresta única regulável,

A Figura 4.5 mostra fotos das superfícies usinadas dos furos alargados de cada condição de usinagem realizada nesta etapa.

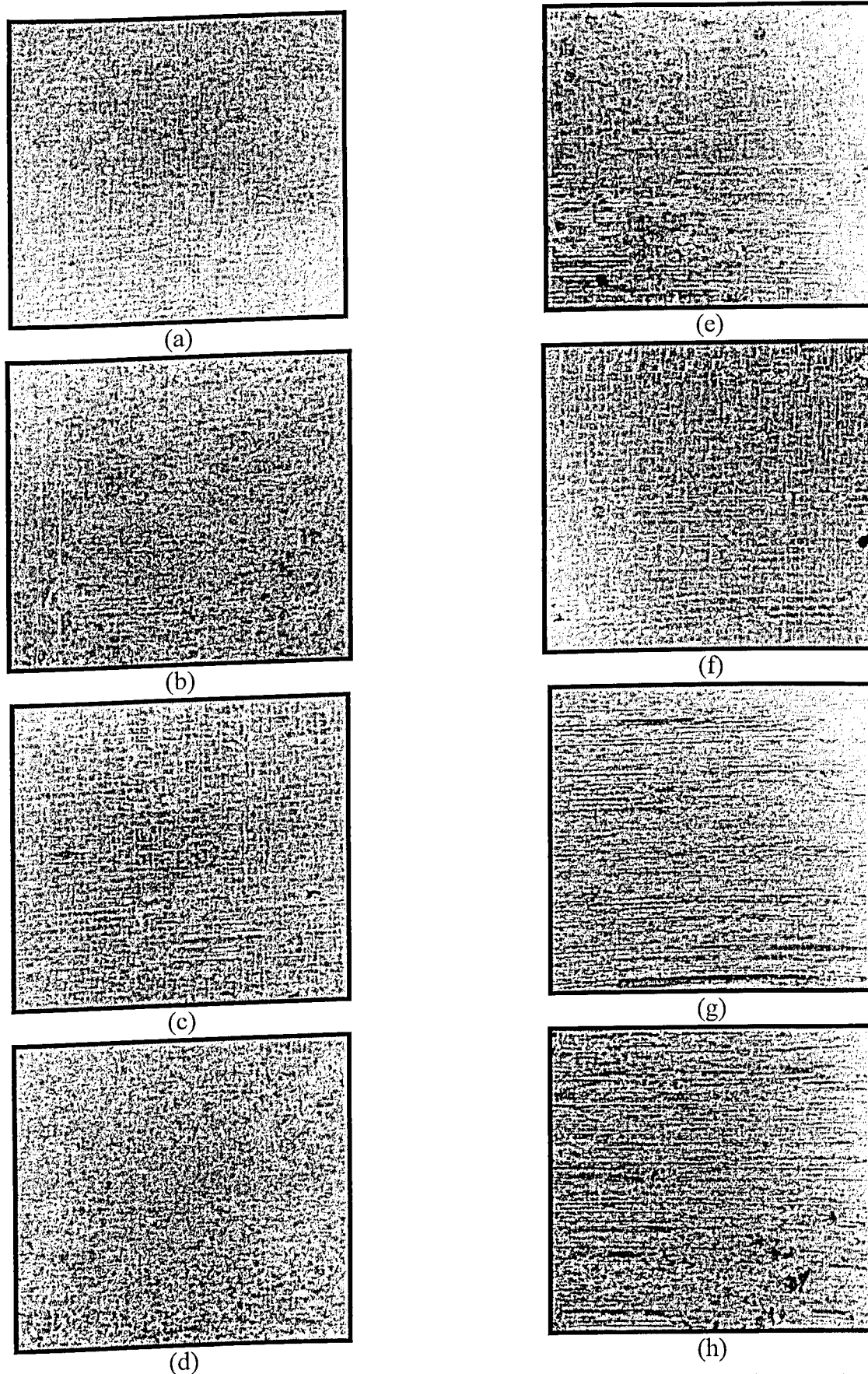


Figura 4.5 - Superfícies dos furos alargados com variação da profundidade de corte (mm): (a) 0,8; (b) 0,7; (c) 0,6; (d) 0,5; (e) 0,4; (f) 0,3; (g) 0,2; (h) 0,1. Ampliação de 7 vezes.

Nota-se a porosidade presente no material em praticamente todas as fotos. Observa-se em todas as fotos regiões mais ásperas que podem ser relacionadas com rebarbas de APC deixadas periodicamente na peça. Nas fotos (g) e (h), para profundidades de corte de 0,2 e 0,1 mm respectivamente, as superfícies geradas apresentam marcas de deformações plásticas na direção de corte mais nítidas, principalmente na foto (h), confirmando os resultados de Schroeter (1989), onde o esmagamento do material se apresenta para pequenos valores de sobremetais. Observa-se nas demais fotos marcas de vibrações nas superfícies geradas, sendo mais nítidas nas fotos (c) e (f), profundidades de corte de 0,6 e 0,3 mm respectivamente. Estas marcas, entretanto, não comprometeram a rugosidade superficial diretamente, pois a superfície de furos com profundidades de corte de 0,3 mm, foto (f), apresentou o menor valor médio de Ra ($2,5239 \mu\text{m}$).

A Figura 4.6 apresenta a circularidade sob influência do sobremetal.

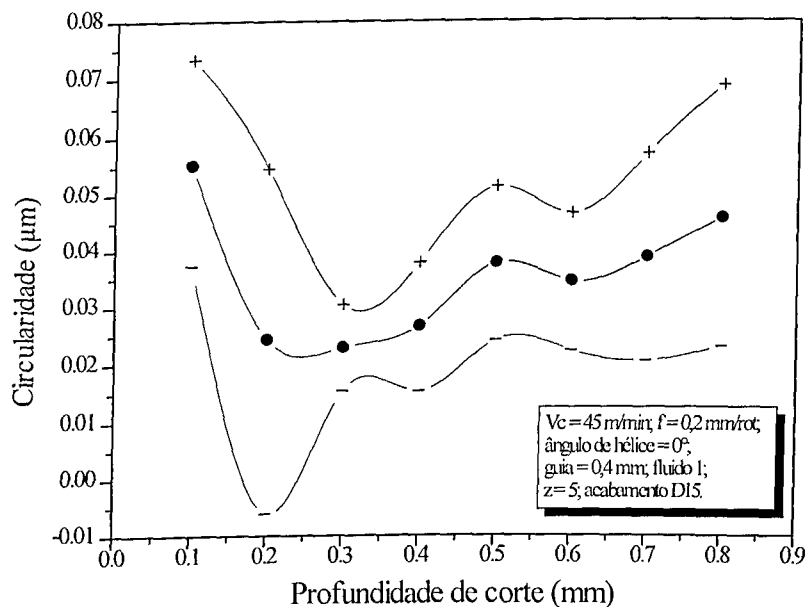


Figura 4.6 - Influência do sobremetal sobre a circularidade.

Verifica-se que os melhores resultados foram obtidos entre as profundidades de corte de 0,2 e 0,3 mm. Isto pode ser explicado da mesma forma como na rugosidade, onde valores muito pequenos de sobremetal acarretaria em esmagamento de material em algumas áreas da superfície do furo, enquanto valores maiores de sobremetal tenderia a piorar os resultados de circularidade, de acordo também com a SKF (1987).

Quanto à cilindridade, podemos fazer a mesma análise realizada nas variáveis dependentes anteriores, afirmando que quando o sobremetal é muito pequeno existe a possibilidade de haver regiões do furo onde não há um corte e sim um esmagamento de material, enquanto para sobremetais com dimensões maiores é de se esperar resultados piores. A profundidade de corte de 0,2 mm apresentou a melhor cilindridade (Figura 4.7).

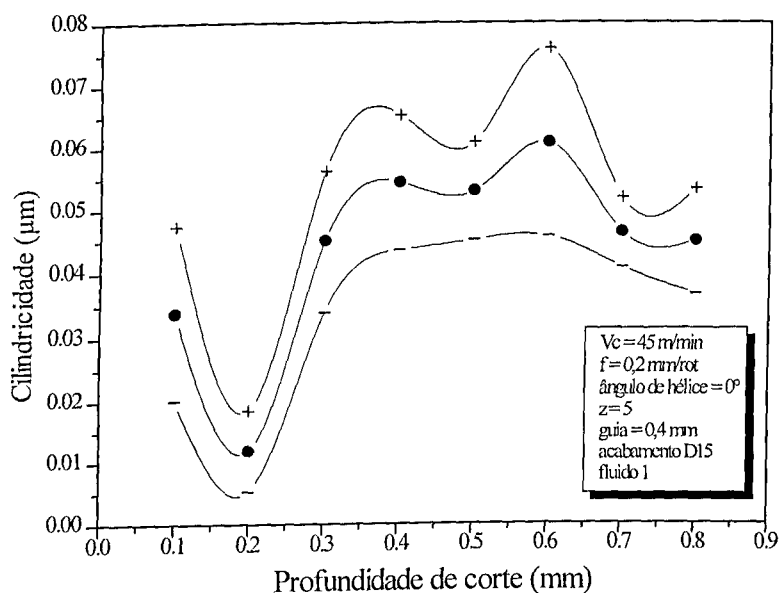


Figura 4.7 - Influência do sobremetal sobre a cilindridade.

No alargamento de furos de 20 mm de diâmetro em aço doce, Shunmugam e Somasundaram (1990) concluíram que com uma redução do sobremetal conseguia-se uma menor variação dimensional e um melhor acabamento superficial. Com relação a vibração, Baker (1975) sugere uma redução na rotação ou na dimensão do pré-furo fazendo com que o alargador tenha mais material para ser removido. Isto frequentemente reduz a vibração. Alargadores com haste comprida fica mais propenso a problemas de vibração.

4.2. VELOCIDADE DE CORTE

A Tabela 4.2 apresenta os valores médios das variáveis dependentes (diâmetro, rugosidade média, circularidade, cilindridade e consumo de potência) obtidas nos ensaios de alargamento com diferentes velocidades de corte.

Tabela 4.2 - Resumo dos resultados encontrados na etapa 2.

sub-etapa	2.1	2.2	2.3	2.4
V_c (m/min)	25	45	60	80
\varnothing (mm)	12,0336	12,0492	12,0941	12,2863
desvio	0,0033	0,0048	0,0327	0,0098
Ra(μ m)	3,0303	2,9932	3,9653	7,4477
desvio	0,3136	0,6162	1,1422	0,5284
Cr(μ m)	0,0102	0,0243	0,0520	0,0391
desvio	0,0007	0,0304	0,0173	0,0050
Cl(μ m)	0,0064	0,0119	0,0541	0,0884
desvio	0,0030	0,0066	0,0315	0,0121
potência(W)	31,2432	-	141,5456	302,7005
desvio	5,7814	-	82,0884	50,2356

A Figura 4.8 mostra a influência da velocidade de corte sobre o diâmetro médio dos furos alargados. Verifica-se que os melhores resultados foram obtidos à baixas velocidades.

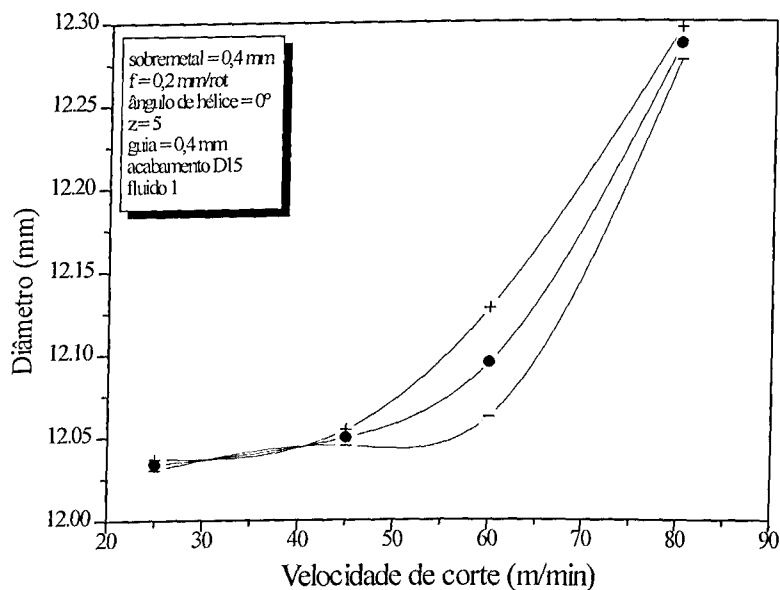


Figura 4.8 - Influência da velocidade de corte sobre o diâmetro.

A APC está presente nesta faixa de velocidade, tendendo a desaparecer ou diminuir de tamanho nas velocidades mais altas, próximo de 80 m/min, o que levaria a melhorar os resultados, mas a curva não mostra isto. Acredita-se que o péssimo resultado a altas velocidades de corte seja devido a vibrações inerentes ao sistema peça-ferramenta. De forma

semelhante, Soratgar (1987) concluiu em seu trabalho, alargando furos de 12,7 mm de diâmetro na liga de alumínio 2024 utilizando alargadores de haste reta de aço-rápido, que quando a velocidade aumentava ocorria uma diminuição da precisão dimensional. Enquanto que nos experimentos de Ohgo et alli (1979), alargamento de ferro-fundido cinzento com 3,1 % de carbono, a variação da velocidade de corte de 8 para 40 m/min não afetou a precisão quando se utilizou alargador de metal duro.

A Figura 4.9 apresenta o comportamento da rugosidade média com a velocidade de corte.

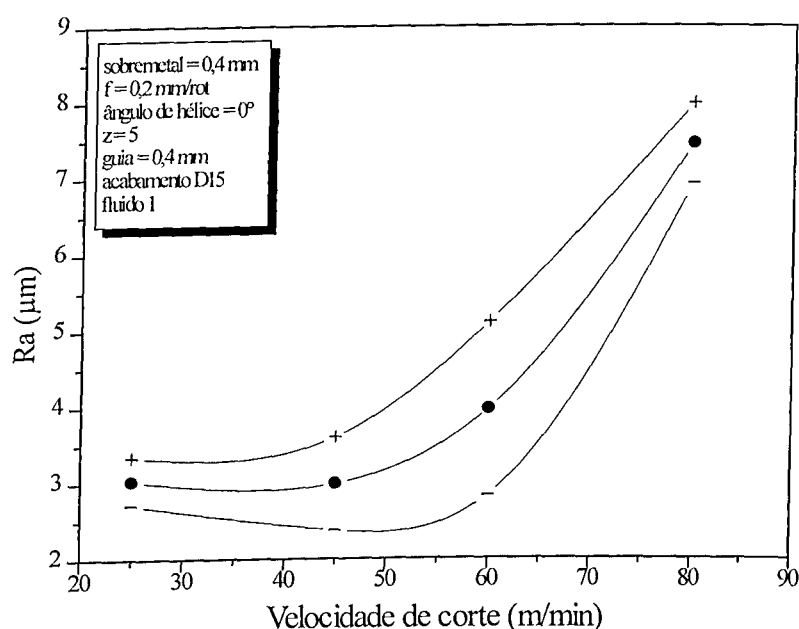


Figura 4.9 - Influência da velocidade de corte sobre a rugosidade.

Podemos observar menores valores de rugosidade para baixas velocidades de corte. A explicação para isto é similar ao do diâmetro. Entretanto, Chengzhou (1983) apud Schroeter (1989) e Soratgar (1987) destacaram que não houve uma variação significativa da rugosidade com o aumento da velocidade de corte. Porém, Soratgar (1987) acredita que a altas velocidades de corte o acabamento superficial é ruim. Além do mais, segundo Erdel (1989), as forças de corte são transferidas para a árvore da máquina, tendendo a dobrar a haste e causar vibração, devido principalmente ao aumento da velocidade de corte. Weinert et alli (1998) alargando o aço tratável termicamente 42 CrMo4, com alargadores de corte único com lâminas e guias de cermet, na faixa de velocidades de corte entre 50 e 180 m/min, avanço de

0,1 mm/rot, profundidade de corte de 0,25 mm, comprimento do furo de 42 mm, diâmetro do furo de 10 mm e com fluido solúvel em água 5%, percebeu uma melhora no acabamento com o aumento das velocidades de corte. A rugosidade relativamente alta à velocidade de corte de 50 m/min foi atribuída ao aparecimento de arestas postiças de corte. A melhora do acabamento para velocidades de corte maiores foi atribuída ao desaparecimento da APC. Nestes experimentos, a rigidez do sistema deve ter sido suficiente para evitar que a vibração comprometesse o acabamento, como ocorreu nos resultados da presente investigação.

A Figura 4.10 apresenta as superfícies dos furos alargados com diferentes velocidades de corte. Pode-se constatar a deterioração das superfícies geradas com o aumento da velocidade de corte. Embora marcas de rebarbas de APC diminuam, marcas causadas por vibrações são nitidamente observadas à velocidades de corte mais elevadas, principalmente à 60 e 80 m/min, fotos (c) e (d) respectivamente.

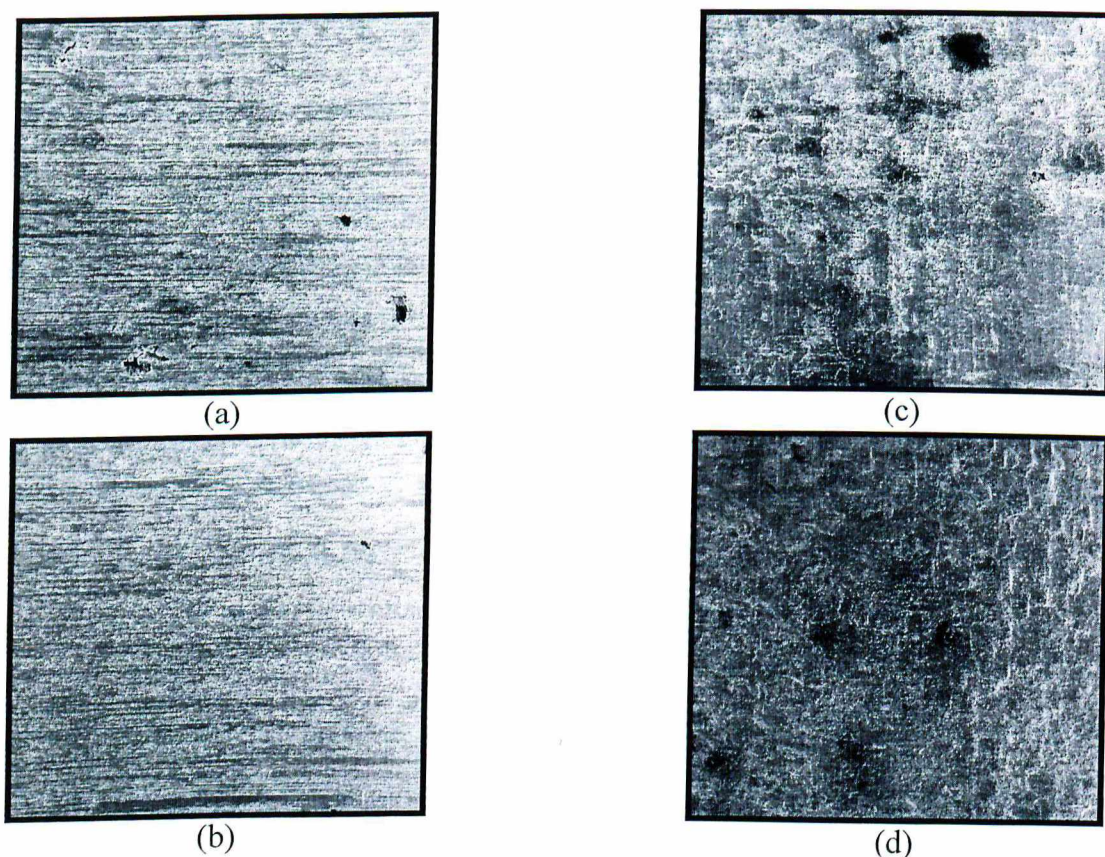


Figura 4.10 - Superfícies dos furos alargados com variação da velocidade de corte (m/min): (a) 25; (b) 45; (c) 60; (d) 80. Ampliação de 7 vezes.

A Figura 4.11 mostra influência da velocidade de corte sobre o comportamento da circularidade dos furos alargados.

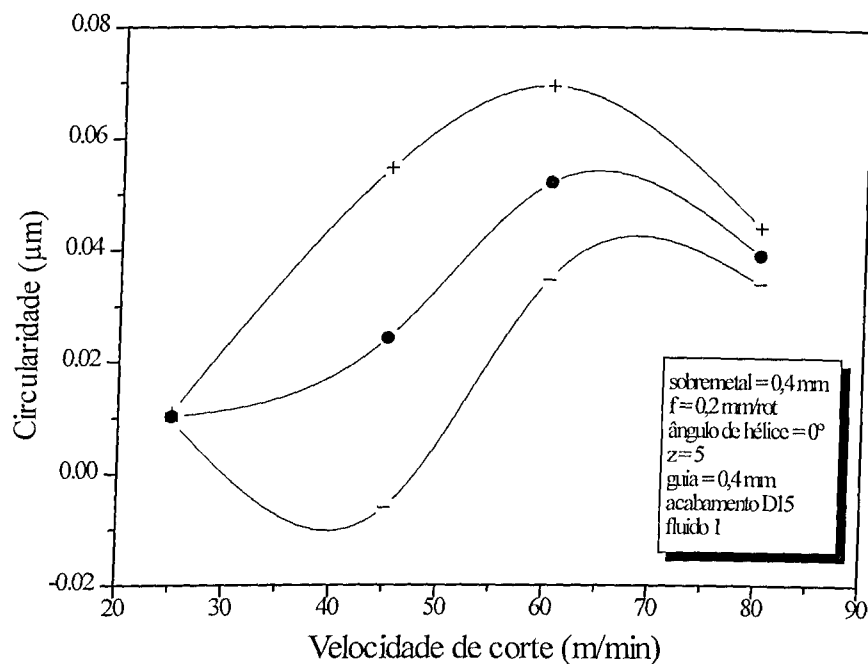


Figura 4.11 - Influência da velocidade de corte sobre a circularidade.

Verifica-se uma tendência de melhores resultados quanto à circularidade a baixas velocidades de corte. Acredita-se que as vibrações provocadas pelo aumento da velocidade de corte são responsáveis por estes resultados. O possível aumento da pressão lateral de corte sobre a parede dos furos com o aumento da velocidade de corte pode também ser responsável por estes resultados. O resultado melhor para velocidade de corte de 80 m/min comparado com aquele apresentado pela velocidade de corte de 60 m/min pode estar relacionado com as menores dimensões ou mesmo a eliminação da APC para a maior velocidade de corte.

A Figura 4.12 apresenta o comportamento da cilindridade dos furos alargados com a variação da velocidade de corte. Nota-se claramente que a baixas velocidades de corte consegue-se os melhores resultados. Da mesma forma como na circularidade, relacionam-se os piores resultados ao fato de se ter maior vibração quando se aumenta a velocidade de corte.

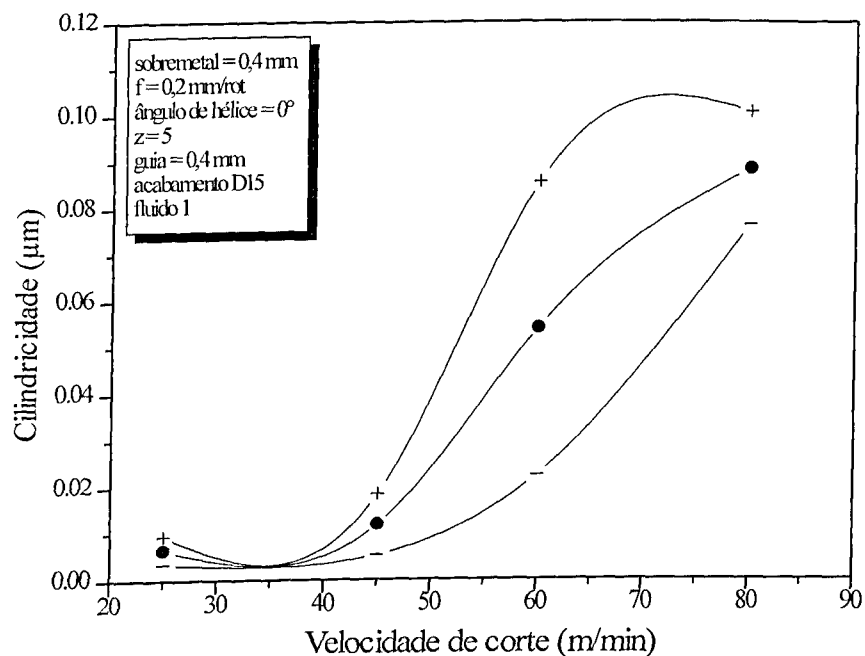


Figura 4.12 - Influência da velocidade de corte sobre a cilindridade.

A Figura 4.13 demonstra a relação da velocidade de corte com a potência consumida.

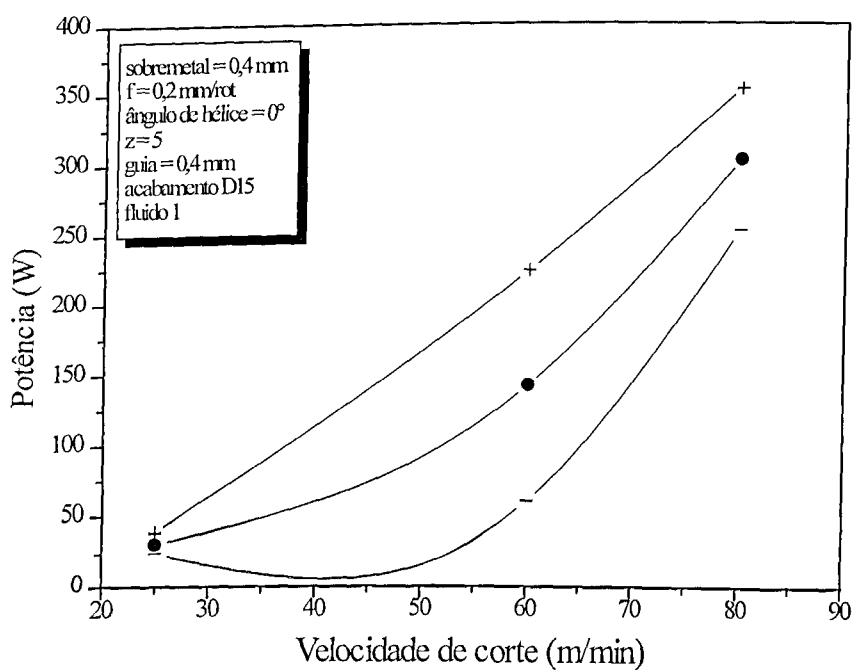


Figura 4.13 - Influência da velocidade de corte sobre a potência.

Observa-se a confirmação da relação direta existente entre a potência e a velocidade de corte, isto é, a potência de corte é igual ao produto da força de corte F_c , e a velocidade de corte V_c . Apesar de um aumento da velocidade de corte tender a diminuir a força de corte, esta redução não chega a alterar a crescente subida da potência consumida com o aumento da velocidade de corte.

Shunmugam e Somasundaram (1990), alargando aço doce, encontraram melhores resultados quanto a precisão de forma e acabamento superficial a baixas velocidades de corte. É geralmente reconhecido, de acordo com Cassin e Boothroyd (1965) e Morton (1967) apud Turley (1975), que o corte a baixas velocidades com um óleo mineral previne a formação ou reduz a dimensão de uma APC, assim resultando num melhor acabamento superficial. Em baixas velocidades de corte o desgaste da ferramenta é reduzido (Il'in, 1975). Para as operações de alargamento, a maioria dos artigos publicados recomenda velocidades mais baixas que nas operações de furação para um diâmetro correspondente e se obter melhores acabamento superficial e precisão (Soratgar, 1987).

4.3. AVANÇO

Os resultados médios das variáveis dependentes, e os seus desvios padrões respectivos, obtidos nos furos alargados com os diferentes valores de avanço podem ser vistos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Resumo dos resultados encontrados na etapa 3.

sub-etapa	3.1	3.2	3.3	3.4
f(mm/rot)	0,1	0,2	0,4	0,8
\varnothing (mm)	12,0310	12,0336	12,0300	12,0193
desvio	0,0072	0,0033	0,0017	0,0055
Ra(μm)	2,7810	3,0303	3,2803	3,1406
desvio	0,5394	0,3136	0,3540	0,7923
Cr(μm)	0,0154	0,0102	0,0077	0,0119
desvio	0,0038	0,0007	0,0012	0,0049
Cl(μm)	0,0145	0,0064	0,0103	0,0156
desvio	0,0085	0,0030	0,0046	0,0094
potência(W)	26,0201	31,2432	46,7032	73,5297
desvio	5,3886	5,7814	7,7470	16,3431

O gráfico da Figura 4.14 mostra a influência do avanço sobre a precisão de diâmetro dos furos alargados.

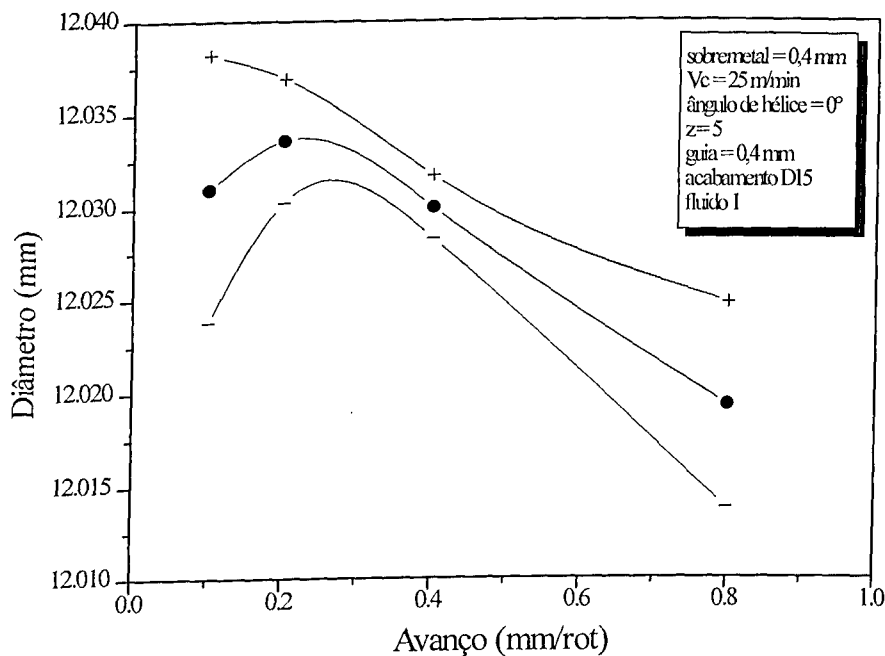


Figura 4.14 - Influência da avanço sobre o diâmetro.

Verifica-se uma tendência de melhor precisão de diâmetro com o aumento do avanço. Soratgar (1987) afirma que, para as operações de alargamento, a maioria dos artigos publicados recomenda avanços maiores que nas operações de furação para um diâmetro correspondente e para se obter melhor precisão dimensional. Recomenda-se um avanço para o processo de alargamento de 2,5 a 3 vezes o da furação para um furo de mesma dimensão e um mesmo material (SKF, 1987). Neste caso, onde utilizamos um avanço na furação de 0,16 mm/rot, acreditamos que os resultados obtidos estão coerentes com a literatura, já que o avanço de 0,8 mm/rot apresentou menor variação dimensional. Acredita-se que isto ocorre devido ao fato de que para pequenos avanços existe maior tempo de contato do alargador com o furo, acarretando numa pior precisão dimensional. Entretanto, estudos mais aprofundados a este respeito são necessários.

A Figura 4.15 apresenta o comportamento da rugosidade dos furos alargados em função da variação do avanço. Nota-se uma tendência de melhor acabamento com a diminuição do avanço. Segundo Chengzhou (1983), citado por Schroeter (1989), em seus

experimentos com alargadores convencionais, quanto maior o avanço maior a rugosidade. Lai e Koh (1994) observaram também que, em geral, a rugosidade superficial dos furos aumentava com a taxa de avanço para uma velocidade de usinagem fixa nas operações de furação e alargamento. Alargando ferro-fundido cinzento com refrigerante, Ohgo et alli (1979) verificaram que um avanço de 0,065 mm/rot tinha obtido menor rugosidade que um avanço de 0,25 mm/rot. Nos ensaios de Shunmugam e Somasundaram (1990), alargando aço doce para diâmetro nominal de 20 mm, altas taxas de avanço resultaram em acabamento superficial ruins.

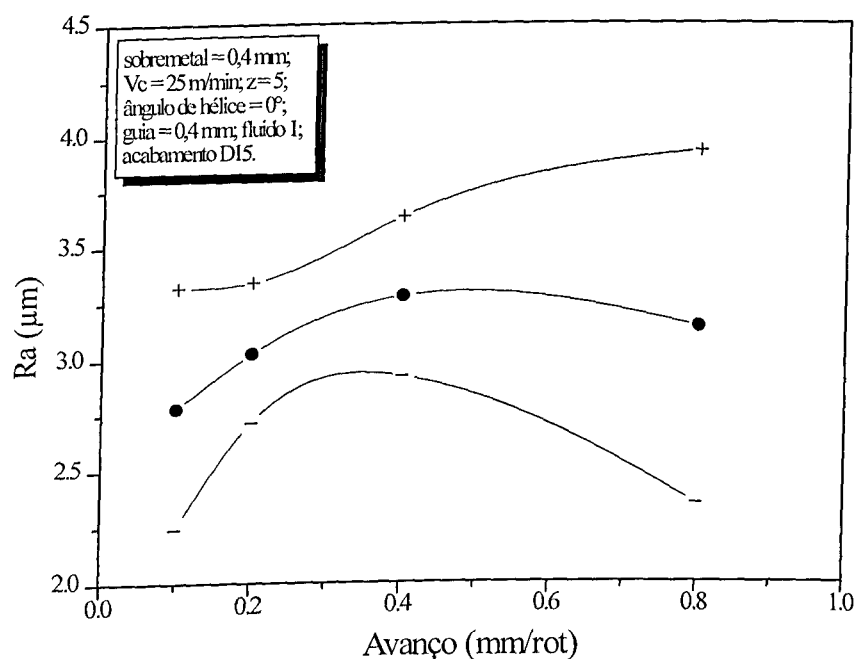


Figura 4.15 - Influência da avanço sobre a rugosidade.

A Figura 4.16 mostra as fotos de furos de cada condição de usinagem realizada nesta etapa. Observa-se nestas fotos as marcas de avanço aumentadas para maiores valores de avanço. Estas marcas são responsáveis diretas pelos valores de Ra.

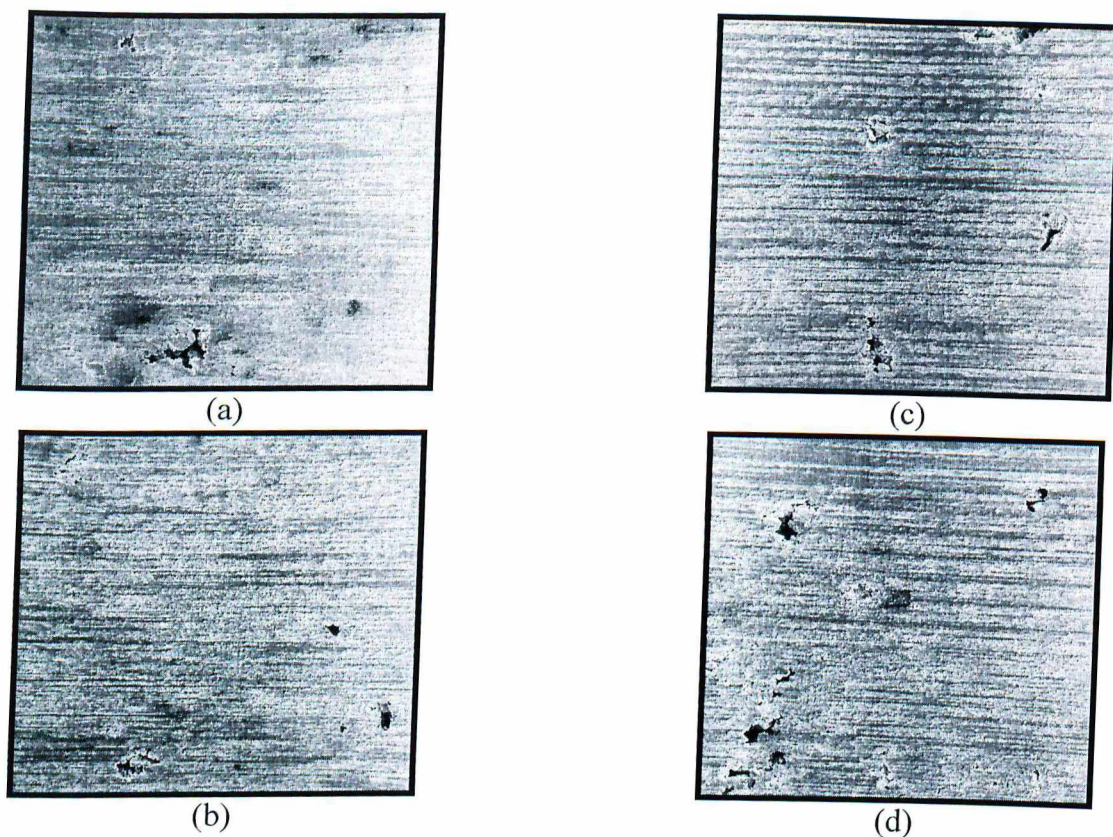


Figura 4.16 - Superfícies dos furos alargados com variação do avanço (mm/rot): (a) 0,1; (b) 0,2; (c) 0,4; (d) 0,8. Ampliação de 7 vezes.

A Figura 4.17 apresenta a influência do avanço sobre a circularidade dos furos alargados. O pior resultado apresentado pelo avanço de 0,1 mm/rot pode ser devido ao esmagamento da parede do furo, provocando com isto elevação da pressão sobre a mesma e influenciando de forma desfavorável no erro de circularidade. Nos experimentos de Shunmugam e Somasundaram (1990), alargando aço doce, altas taxas de avanço resultaram em erros de forma elevados. Nestes experimentos, a furação foi realizada com um avanço de 0,18 mm/rot e o diâmetro final do furo de 20 mm. Observaram que, considerando o erro de circularidade, o avanço no alargamento de cerca de duas vezes o avanço de furação, cerca de 0,36 mm/rot, parece ser satisfatório. Como mostra a Figura 4.17, nesta investigação, os melhores resultados, quanto a circularidade, foram para valores de avanços similares (0,4 mm/rot).

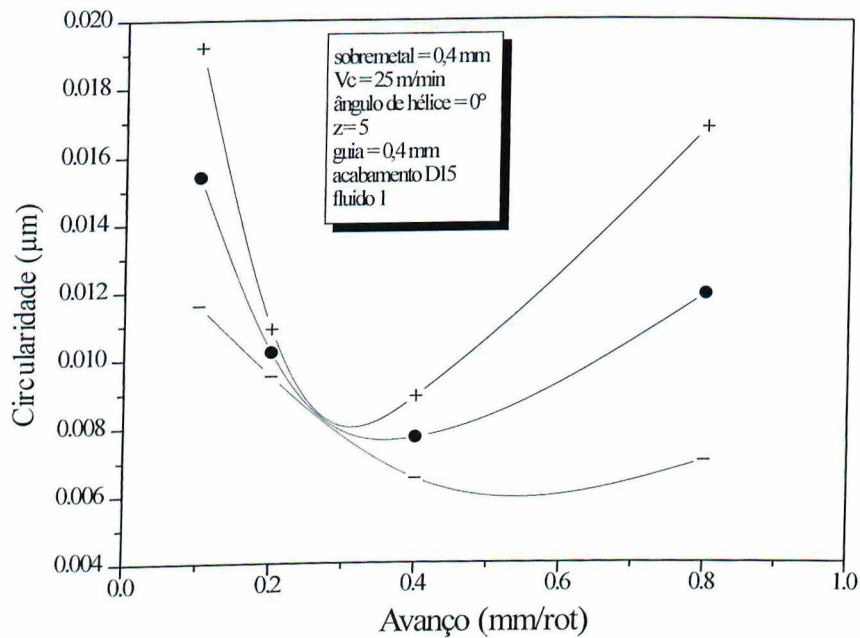


Figura 4.17 - Influência da avanço sobre a circularidade.

A influência do avanço sobre a cilindridade dos furos alargados é apresentado na Figura 4.18.

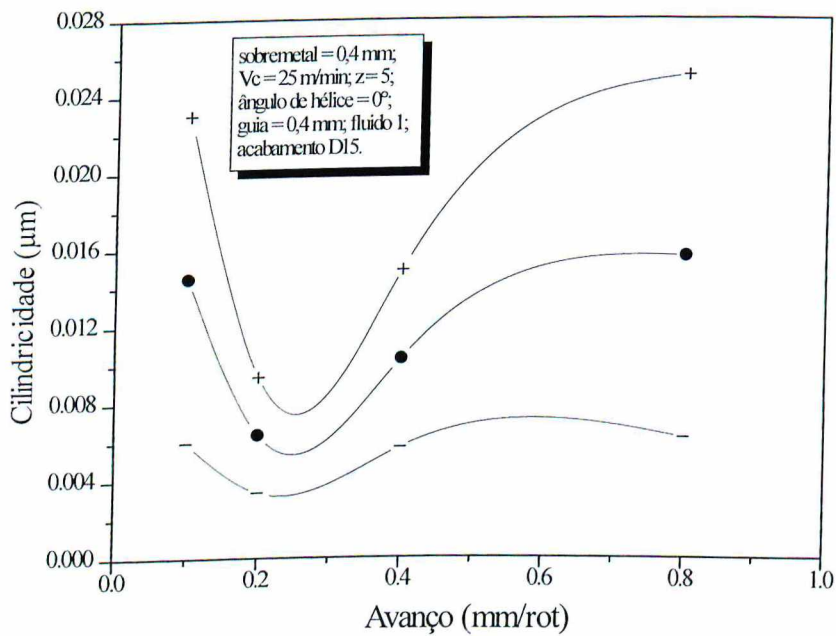


Figura 4.18 - Influência do avanço sobre a cilindridade.

Observa-se que o melhor resultado foi obtido no avanço de 0,2 mm/rot, tendendo a piorar tanto para valores menores quanto maiores que este. O tempo de contato do alargador com as paredes do furo e as forças de usinagem devem ser consideradas simultaneamente para explicar estes resultados.

O gráfico da Figura 4.19 mostra o comportamento do consumo de potência de corte dos furos alargados com a variação do avanço.

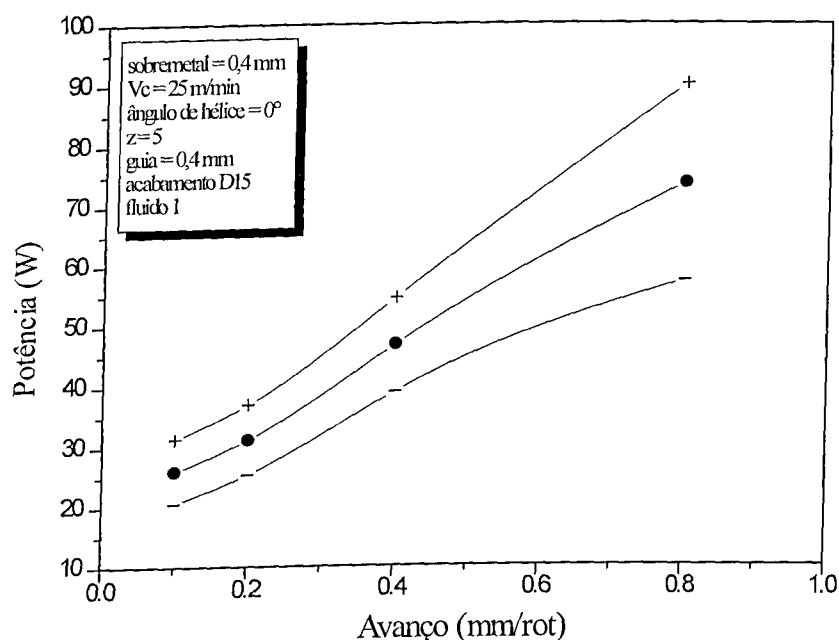


Figura 4.19 - Influência do avanço sobre a potência.

É evidente a relação direta apresentada nesta figura, visto que com o aumento do avanço há, como consequência, um aumento da área de contato entre a ferramenta e a peça, resultando no aumento da potência consumida.

4.4. ÂNGULO DE HÉLICE

A Tabela 4.4 mostra um resumo dos resultados médios e desvios padrões das variáveis dependentes nos furos alargados obtidos com a mudança do valor do ângulo de hélice.

Tabela 4.4 - Resumo dos resultados encontrados na etapa 4.

sub-etapa	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5
$\gamma_f(^{\circ})$	-10	-7	0	7	10
$\varnothing(\text{mm})$	12,0401	12,0316	12,0193	12,0308	12,0291
desvio	0,0076	0,0062	0,0055	0,0081	0,0067
Ra(μm)	2,5258	2,6753	3,1406	2,6119	2,1259
desvio	0,8828	0,9624	0,7923	0,7737	0,6431
Cr(μm)	0,0352	0,0374	0,0119	0,0096	0,0467
desvio	0,0121	0,0119	0,0049	0,0037	0,0194
Cl(μm)	0,0315	0,0296	0,0156	0,0142	0,0338
desvio	0,0133	0,0113	0,0094	0,0064	0,0126
potência(W)	84,4198	91,6592	73,5297	72,5098	87,0993
desvio	21,0090	22,5739	16,3431	18,8090	22,7899

As Figura 4.20 apresenta a precisão de diâmetro dos furos alargados em função do ângulo de hélice. Os ângulos negativos são dos alargadores de canais helicoidais à esquerda, enquanto os positivos são dos alargadores de canais helicoidais à direita e, finalmente, o de 0° corresponde ao alargador de canais retos.

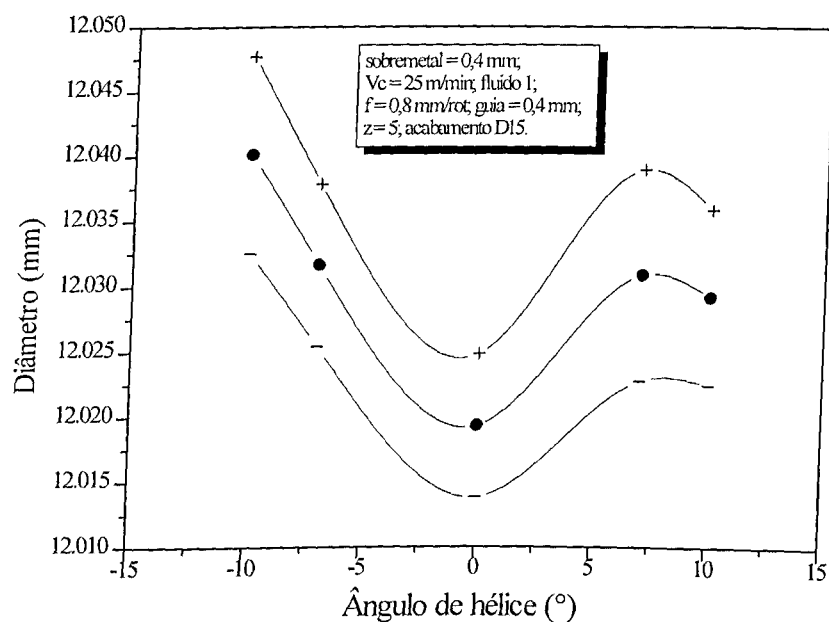


Figura 4.20 - Influência do ângulo de hélice sobre o diâmetro.

O ângulo de hélice de 0° apresentou melhor precisão dimensional. Este resultado pode estar relacionado com a maior facilidade de garantir-se a qualidade de precisão do alargador com este tipo de canal. Nos ensaios de Ohgo et alli (1979), onde se alargou ferro-fundido

cinzento sem o uso de refrigerante, o alargador de chanfro de um estágio com hélice à direita obteve maior precisão que outro com hélice à esquerda. Enquanto para os alargadores de chanfro de dois estágios, o alargador com hélice à esquerda obteve maior precisão que o de hélice à direita, na ausência de refrigerante. Os alargadores de hélice à direita com chanfros de um ou dois estágios tem APC muito menores que os de hélice à esquerda na ausência de refrigerante. Isto explica porque o alargador com hélice à direita com um chanfro de um estágio é mais preciso que o de hélice à esquerda. Entretanto, isso não pode explicar porque o alargador de hélice à direita com um chanfro de dois estágios é menos preciso que o mesmo alargador de hélice à esquerda. É assumido que este fenômeno foi causado por abrasão da superfície acabada pelo cavaco durante o alargamento. O alargador de hélice à esquerda ejeta os cavacos na direção do avanço e o de hélice à direita ejeta-os na direção oposta ao avanço. Destas observações, é assumido que o alargador de hélice à direita com um chanfro de dois estágios causa abrasão da superfície acabada pelos cavacos e portanto é menos preciso que o alargador de hélice à esquerda com um chanfro de dois estágios. Segundo Stemmer (1992), os alargadores de dentes retos são perfeitos para trabalhos de precisão.

O gráfico da Figura 4.21 mostra a influência da variação do ângulo de hélice sobre a rugosidade média dos furos alargados.

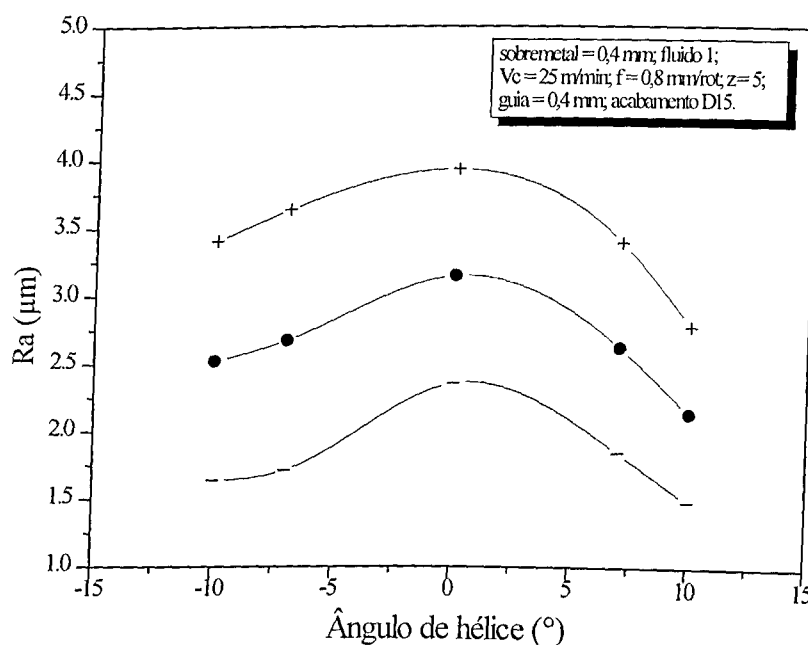


Figura 4.21 - Influência do ângulo de hélice sobre a rugosidade.

A Figura 4.22 mostra as superfícies dos furos alargados em função da variação do ângulo de hélice dos alargadores.

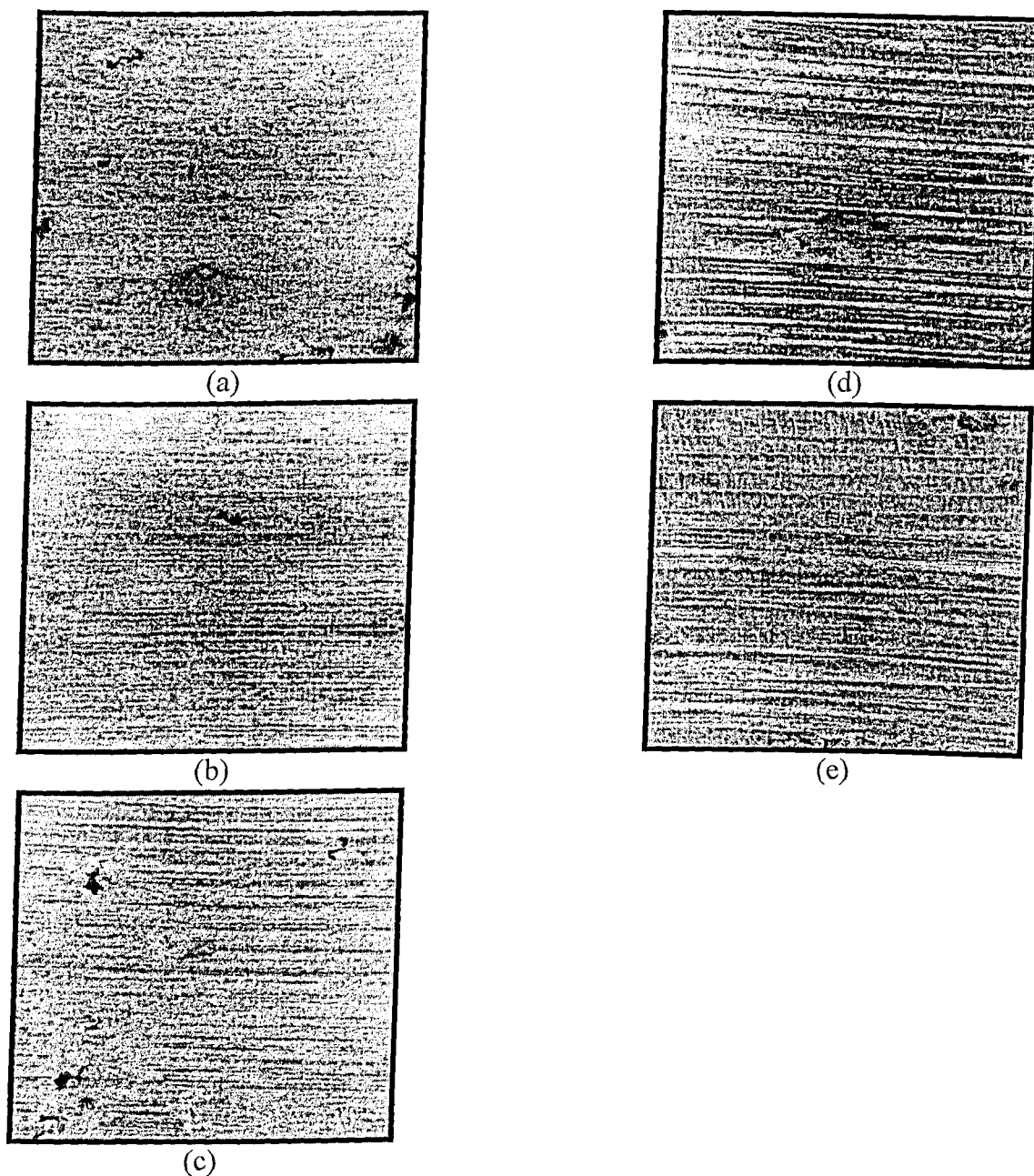


Figura 4.22 - Superfícies dos furos alargados com variação do ângulo de hélice ($^{\circ}$): (a) -10; (b) -7; (c) 0; (d) 7; (e) 10. Ampliação de 7 vezes.

A foto (c) apresenta a pior superfície (maior valor de Ra com $3,1406 \mu\text{m}$), enquanto a foto (e) apresenta o melhor acabamento (menor Ra com $2,1259 \mu\text{m}$). Nota-se que existe menos rebarbas de APC nesta figura.

Os dentes helicoidais favorecem o acabamento, entretanto para explicar isto é necessário falar sobre o guia cilíndrico. O guia cilíndrico tem como principal função o de

alisar a parede do furo (Ferraresi, 1972, e Schroeter, 1989), ou seja, quanto maior for o guia maior será sua capacidade de proporcionar bom acabamento no furo, por outro lado, maior será a área de contato entre o alargador e a parede do furo, aumentando desta forma as forças de atrito e, conseqüentemente, a potência e as vibrações, o que pode ser um fator desfavorável na obtenção de um furo com boa qualidade dimensional e superficial. Portanto, nos alargadores com dentes helicoidais, onde a área de contato é maior, acredita-se que a capacidade de alisar do guia cilíndrico foi preponderante comparado ao aumento das forças de atrito no resultado final do acabamento. Da mesma forma, nos experimentos de Schroeter (1989) verificou-se um aumento da rugosidade com a diminuição do ângulo de hélice.

É mostrado na Figura 4.23 o comportamento da circularidade dos furos alargados em função do ângulo de hélice.

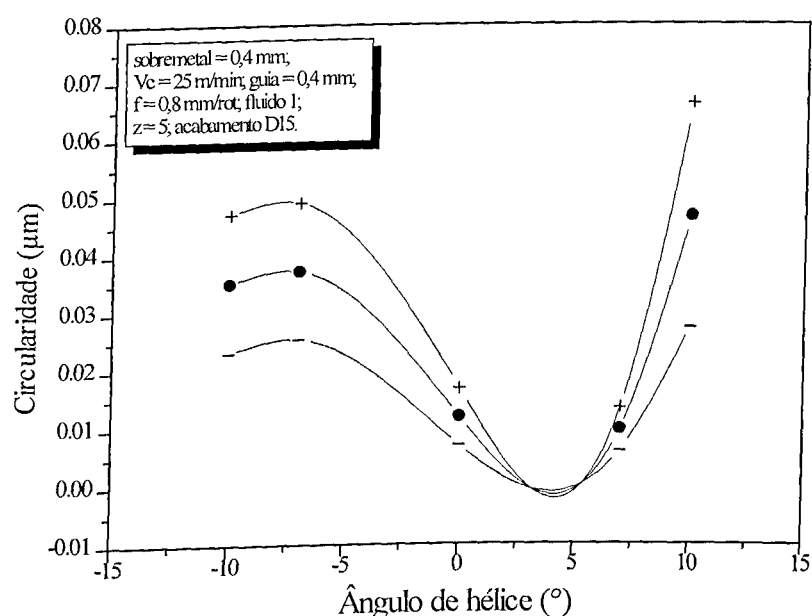


Figura 4.23 - Influência do ângulo de hélice sobre a circularidade.

Encontrou-se menores variações dimensionais quanto à circularidade para os ângulos de hélice de 0° e 7°. Conclui-se, portanto, que os melhores resultados de circularidade são obtidos com alargadores com pequenos ângulos de hélice positivos, ou seja, à direita.

Na Figura 4.24, onde temos o comportamento da cilindricidade dos furos alargados em função da variação do ângulo de hélice, nota-se a mesma tendência encontrada com a circularidade.

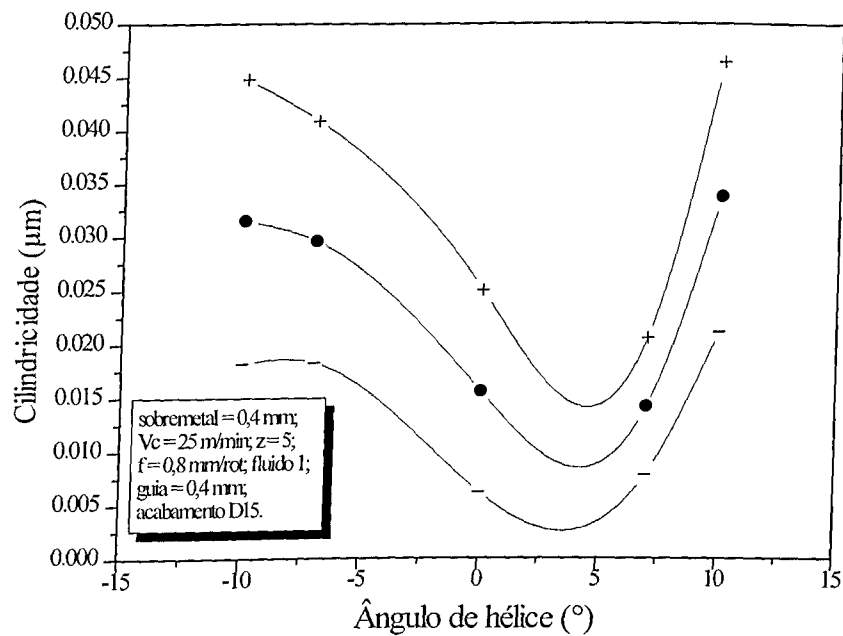


Figura 4.24 - Influência do ângulo de hélice sobre a cilindridade.

O gráfico da Figura 4.25 destaca a influência do ângulo de hélice dos alargadores sobre a potência efetiva de corte consumida na confecção dos furos alargados.

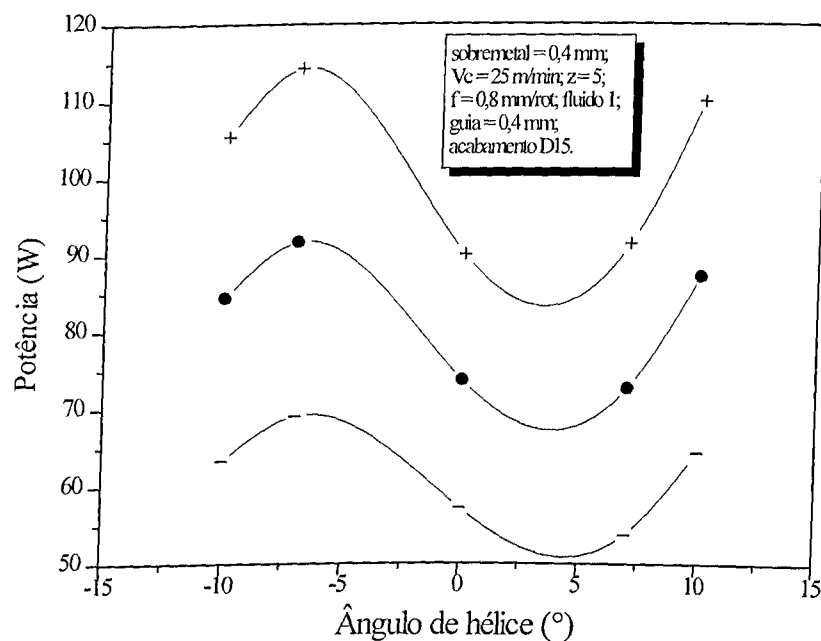


Figura 4.25 - Influência do ângulo de hélice sobre a potência.

Pode-se verificar uma certa semelhança entre este gráfico e os dois anteriores, relativos à influência do ângulo de hélice sobre o comportamento da circularidade e cilindridade. Com isso, acredita-se haver uma relação direta entre o consumo de potência e os erros de forma, ou seja, quanto menor a potência consumida menor será os erros de forma dos furos alargados.

A SKF (1987) recomenda alargadores para máquinas com canais retos com forma de entrada A (Figura 2.6) para furos cegos com até três vezes o diâmetro. E Baker (1975) afirma que para furos cegos o uso do alargador de espiral direita e corte direito não é recomendado.

4.5. NÚMERO DE LÂMINAS

A Tabela 4.5 apresenta os resultados médios, e os respectivos desvios padrões, das variáveis dependentes (diâmetro, rugosidade, circularidade, cilindridade e potência) obtidos dos furos alargados quando se variou o número de lâminas dos alargadores.

Tabela 4.5 - Resumo dos resultados encontrados na etapa 5.

sub-etapa	5.1	5.2	5.3
número de lâminas	3	4	5
\varnothing (mm)	12,0346	12,0274	12,0193
desvio	0,0173	0,0205	0,0055
Ra(μ m)	4,8184	3,5006	3,1406
desvio	0,6024	0,8565	0,7923
Cr(μ m)	0,0235	0,0347	0,0119
desvio	0,0059	0,0197	0,0049
CI(μ m)	0,0111	0,0144	0,0156
desvio	0,0036	0,0081	0,0094
potência(W)	70,9682	72,2485	73,5297
desvio	15,7375	13,0983	16,3431

É apresentada na Figura 4.26 a influência do número de lâminas do alargador sobre a precisão de diâmetro obtida nos furos alargados. Podemos dizer que quanto maior o número de lâminas menor é o avanço por dente, para um mesmo avanço. Isto pode resultar em melhor qualidade dimensional.

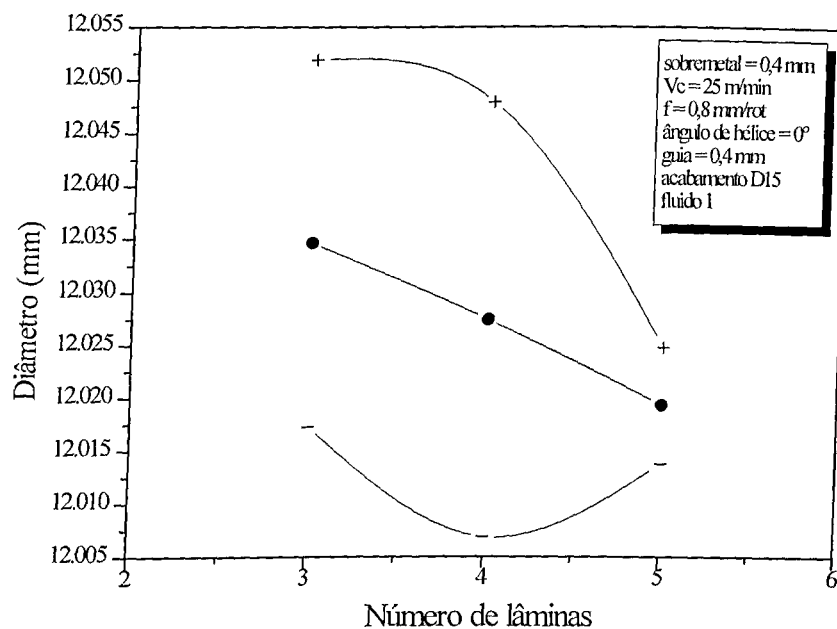


Figura 4.26 - Influência do número de lâminas sobre o diâmetro.

O comportamento da rugosidade dos furos alargados com a mudança do número de lâminas é mostrado na Figura 4.27.

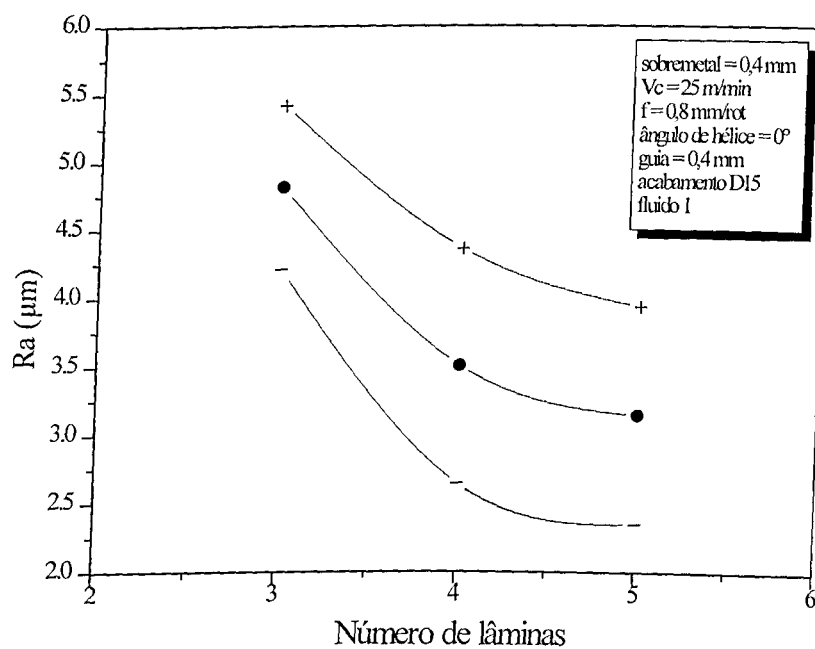


Figura 4.27 - Influência do número de lâminas sobre a rugosidade.

Nota-se, da mesma forma como na influência sobre o diâmetro, uma menor rugosidade para um número de lâminas maior. Quando se tem um maior número de lâminas, para um mesmo guia cilíndrico, a área de contato entre o alargador e a parede do furo é maior, aumentando sua capacidade de acabamento e, de forma desfavorável, as forças de atrito. A capacidade de acabamento do alargador, nestes ensaios, mostrou ser mais significativa que as prejudiciais forças de atrito.

A Figura 4.28 apresenta as superfícies dos furos alargados sob influência da variação do número de lâminas do alargador.

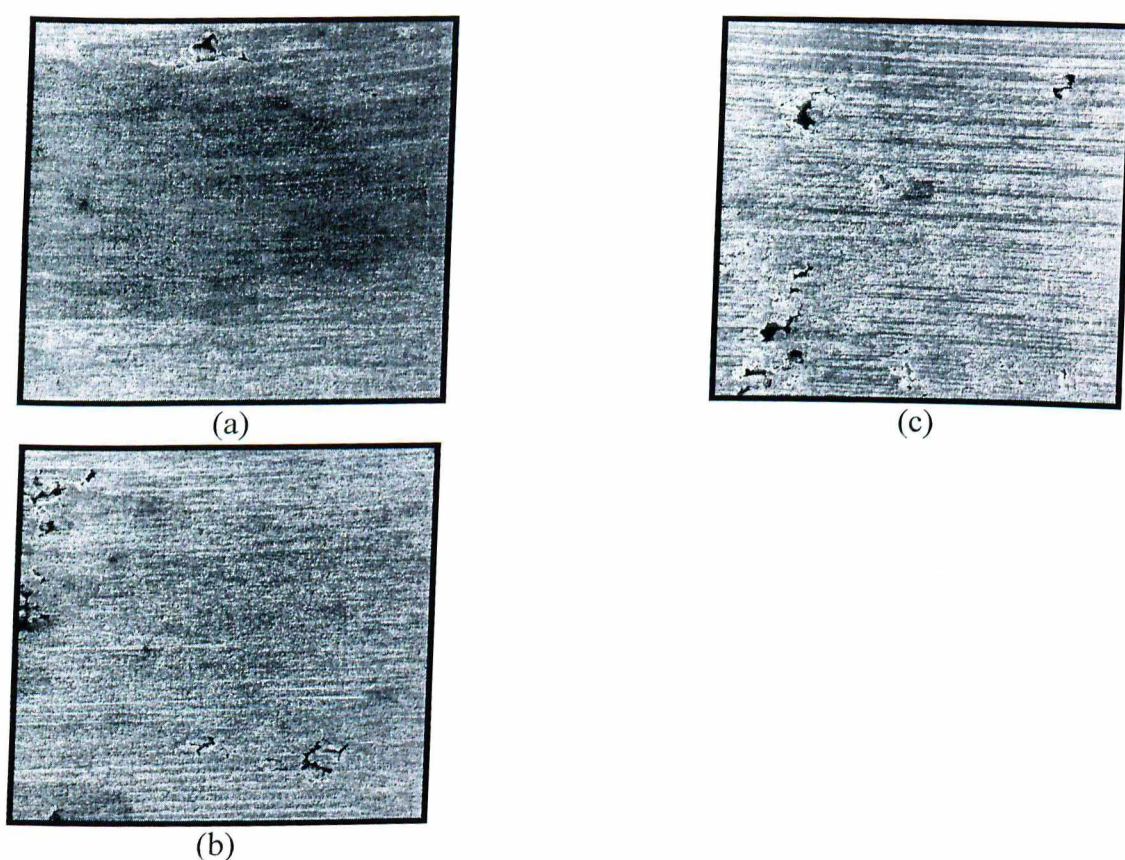


Figura 4.28 - Superfícies dos furos alargados com variação do número de lâminas: (a) 3; (b) 4; (c) 5. Ampliação de 7 vezes.

Apesar da figura (c) mostrar maiores áreas ásperas (possíveis rebarbas de APC), o menor avanço por dente do alargador com 5 lâminas gerou menor valor do parâmetro Ra ($3,1406 \mu\text{m}$), e, portanto, melhor acabamento que as fotos (a) ($Ra = 4,8184 \mu\text{m}$) e (b) ($Ra = 3,5006 \mu\text{m}$).

A Figura 4.29 mostra a influência do número de lâminas dos alargadores sobre a circularidade dos furos alargados.

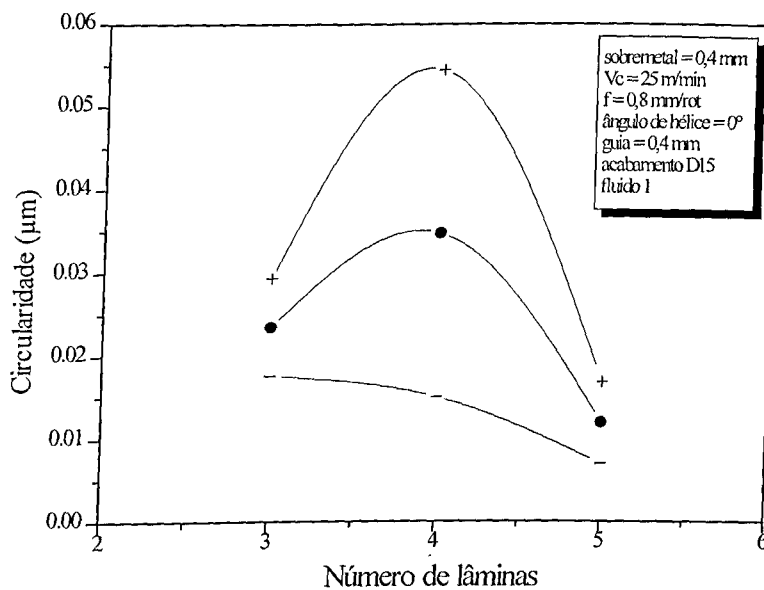


Figura 4.29 - Influência do número de lâminas sobre a circularidade.

O alargador com o número de lâminas igual a 5 apresentou a menor variação dimensional quanto à circularidade, e o alargador de 4 lâminas a maior.

O comportamento da cilindricidade dos furos alargados com o número de lâminas dos alargadores é apresentado na Figura 4.30.

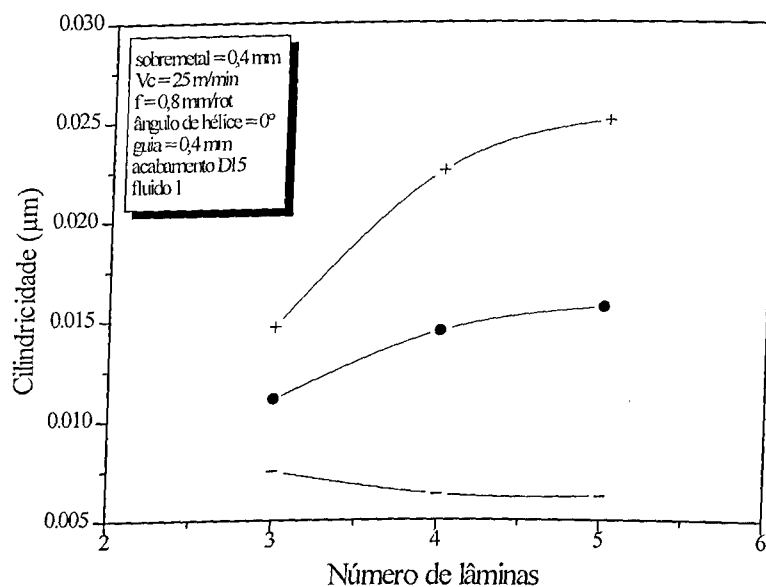


Figura 4.30 - Influência do número de lâminas sobre a cilindricidade.

Observa-se melhores resultados quando há uma redução do número de lâminas. É possível que isto seja devido ao fato de que o efeito das forças de atrito ter sido preponderante em relação à capacidade de acabamento do guia cilíndrico, já que aumentando o número de lâminas teremos um aumento da área de contato entre o alargador e a parede do furo.

A Figura 4.31 apresenta a influência do número de lâminas dos alargadores sobre o consumo de potência dos furos alargados.

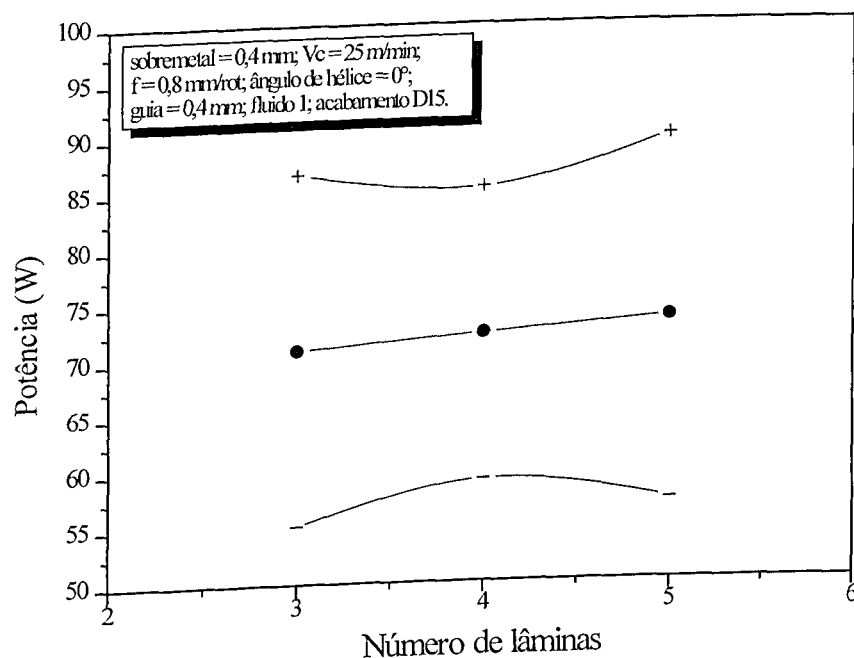


Figura 4.31 - Influência do número de lâminas sobre a potência.

Da mesma forma como explicado em relação à cilíndricidade, acredita-se que com o aumento do número de lâminas teríamos uma maior área de contato do alargador com o furo através do guia cilíndrico e, conseqüentemente, um aumento das forças de atrito que resultaria numa maior potência consumida na confecção de tais furos. Observa-se também que a faixa de variação dos valores médios de potência é relativamente pequena, mostrando desta forma que a influência do número de lâminas, neste caso, não é significativa.

4.6. GUIA CILÍNDRICO

A Tabela 4.6 apresenta os resultados médios e os desvios padrões das variáveis dependentes obtidos nos ensaios de alargamento com as diferentes medidas do guia cilíndrico.

Tabela 4.6 - Resumo dos resultados encontrados na etapa 6.

sub-etapa	6.1	6.2	6.3
guia cilíndrico(mm)	0,2	0,4	0,7
\varnothing (mm)	12,0075	12,0193	12,0167
desvio	0,0022	0,0055	0,0037
Ra(μ m)	2,4953	3,1406	3,5832
desvio	0,3127	0,7923	0,5693
Cr(μ m)	0,0170	0,0119	0,0273
desvio	0,0055	0,0049	0,0255
Cl(μ m)	0,0072	0,0156	0,0276
desvio	0,0032	0,0094	0,0191
potência(W)	78,4015	73,5297	81,0199
desvio	25,3758	16,3431	25,3024

A Figura 4.32 mostra a influência da dimensão do guia cilíndrico sobre a precisão de diâmetro dos furos alargados.

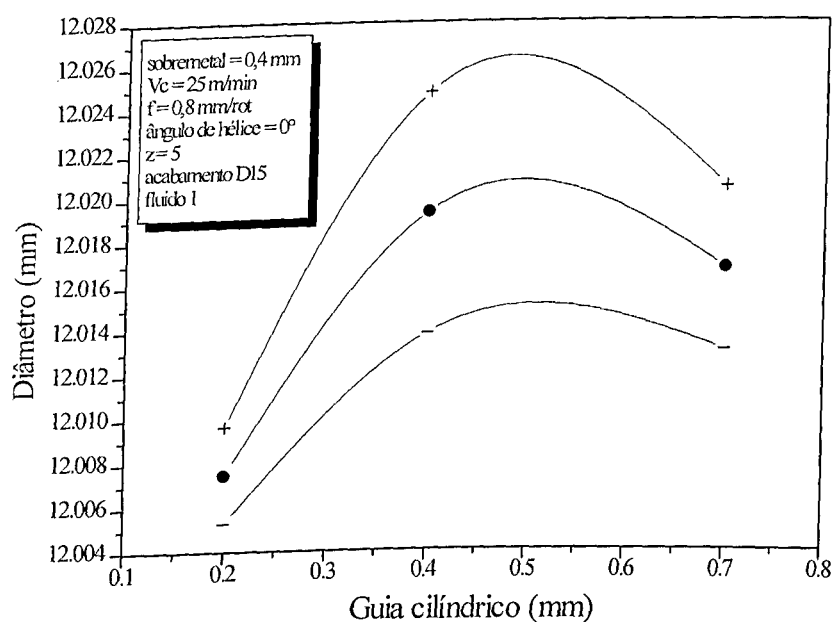


Figura 4.32 - Influência do guia cilíndrico sobre o diâmetro.

Verifica-se uma tendência de melhor precisão de diâmetro para pequenos valores de guia cilíndrico. Uma análise coerente pode ser feita se considerarmos os dois principais efeitos associados com a dimensão do guia cilíndrico: capacidade de acabamento, que aumenta com o aumento desta dimensão; e aumento das forças de atrito, que também aumenta com o aumento da dimensão do guia cilíndrico, já que aumentaria a área de contato. O primeiro efeito, capacidade de acabamento, é benéfico quando se necessita de um bom acabamento superficial. O segundo, forças de atrito, é maléfico por aumentar o consumo de potência e prejudicar a qualidade final do furo, tanto dimensional quanto superficial. Neste caso, acredita-se que o fator forças de atrito foi preponderante para resultar maiores variações de precisão de diâmetro para maiores dimensões do guia cilíndrico. Belous (1976), alargando aço, verificou que um alargador convencional de 4 lâminas com guia cilíndrico variando de 0,1 mm na extremidade a 0,5 mm no final da seção de 25 mm de comprimento proporcionou furos com menores erros que outro com guia de 0,3 mm em todo o comprimento após a reafiação dos alargadores. Antes da reafiação, os dois tipos de alargadores apresentam precisão de usinagem iguais.

A Figura 4.33 destaca o comportamento da rugosidade dos furos alargados com a variação da dimensão do guia cilíndrico dos alargadores.

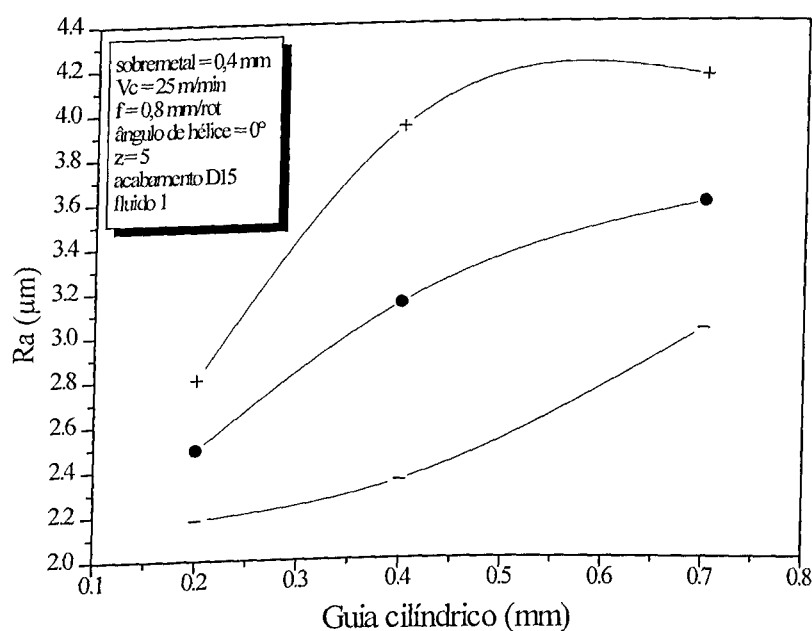


Figura 4.33 - Influência do guia cilíndrico sobre a rugosidade.

Da mesma forma como explicado para o caso da influência da dimensão do guia cilíndrico sobre o diâmetro, acredita-se que a maior área de contato proporcionada pela maior dimensão do guia proporcionou maiores forças de atrito, resultando em pior acabamento. Lai e Koh (1994) acreditam que o alargamento concede tensão residual de compressão adicional para a superfície do furo devido a maior ação de brunimento pelo guia do alargador.

A Figura 4.34 apresenta as superfícies dos furos alargados com diferentes dimensões do guia cilíndrico.

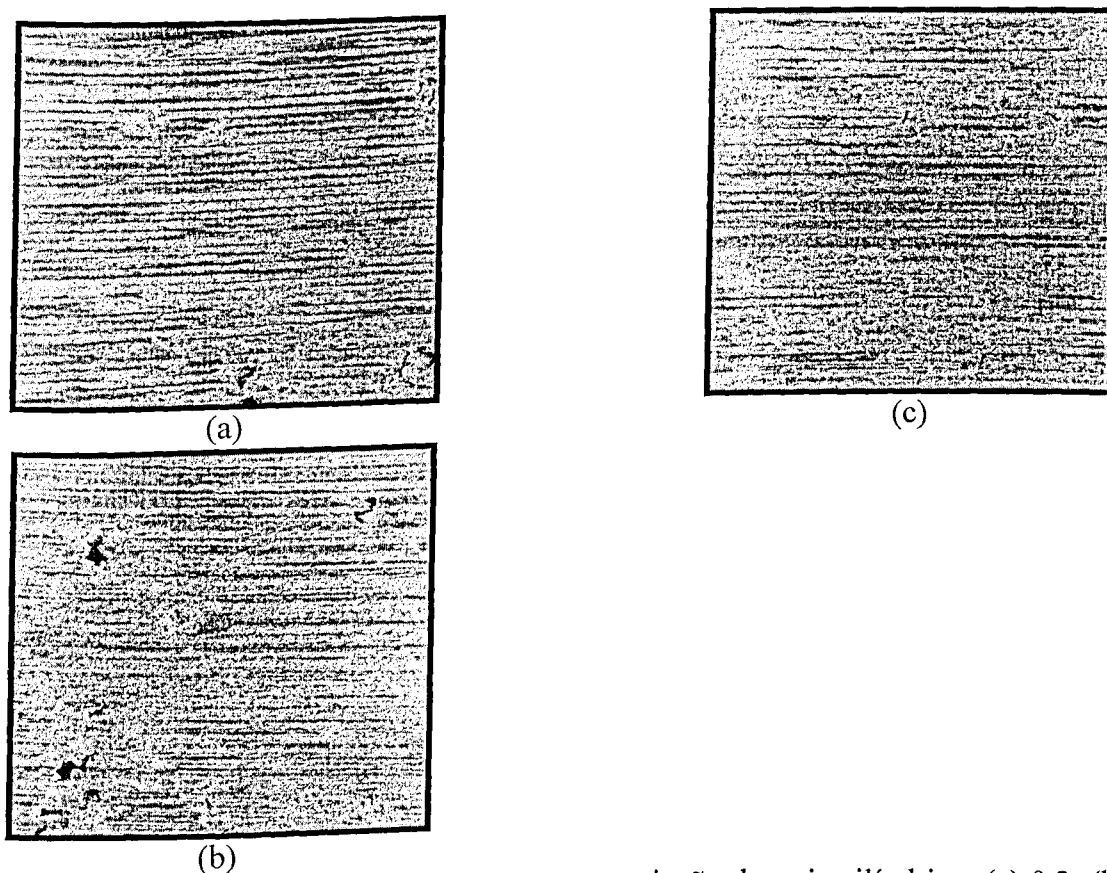


Figura 4.34 - Superfícies dos furos alargados com variação do guia cilíndrico: (a) 0,2; (b) 0,4; (c) 0,7. Ampliação de 7 vezes.

A foto (a) da figura acima representa a superfície de menor valor de parâmetro Ra entre as três, isto é, para o guia cilíndrico de 0,2 mm. A comparação desta foto com (b) e (c) confirma este resultado.

O gráfico da Figura 4.35 mostra a influência do guia cilíndrico sobre a circularidade.

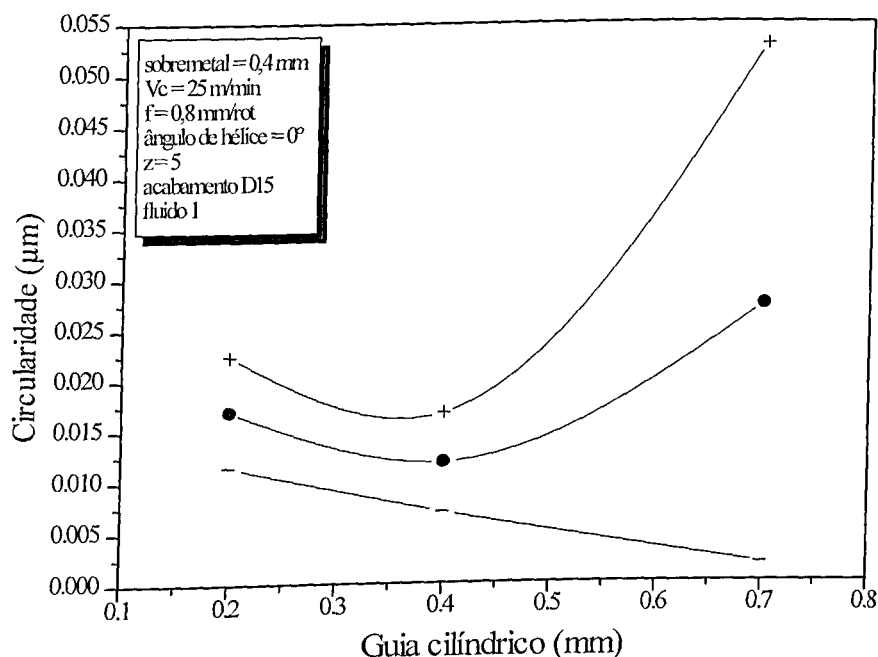


Figura 4.35 - Influência do guia cilíndrico sobre a circularidade.

Nota-se, apesar do guia cilíndrico de 0,4 mm apresentar menor variação dimensional quanto à circularidade, que há uma tendência de menores valores de circularidade para menores dimensões do guia cilíndrico. Acredita-se que a maior área de contato, provocado pela maior dimensão do guia cilíndrico de 0,7 mm, tenha provocado maiores forças de atrito, resultando em maiores dificuldades quanto à estabilidade dimensional. Na indústria automobilística observa-se, em alguns casos, que valores de guia cilíndrico muito baixo no alargamento cria aresta cortante lateral provocando erro de circularidade.

A influência do guia cilíndrico sobre a cilindridade dos furos alargados é apresentada na Figura 4.36. Observa-se nitidamente, nas condições dos ensaios do presente trabalho, a relação direta entre a cilindridade e o guia cilíndrico. A explicação para isso é a mesma relatada no caso da influência do guia cilíndrico sobre a circularidade.

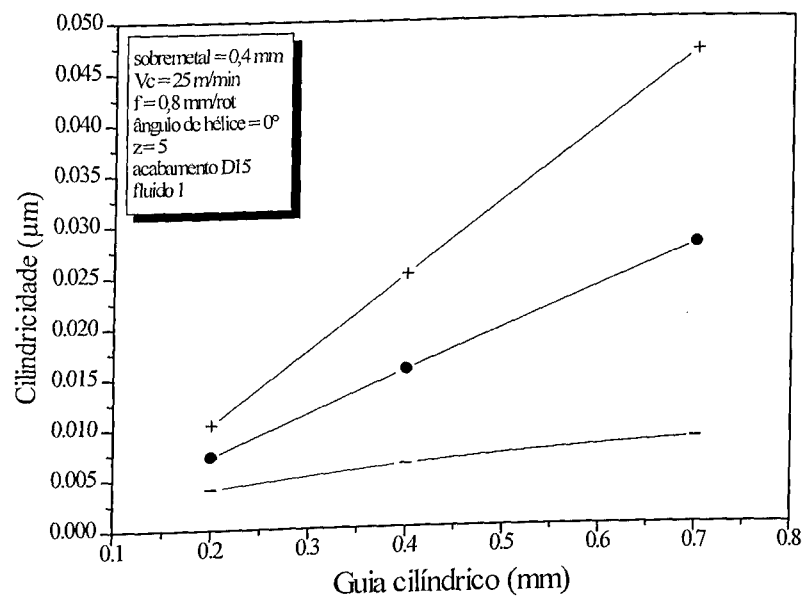


Figura 4.36 - Influência do guia cilíndrico sobre a cilindridade.

A Figura 4.37 mostra o comportamento do consumo da potência de corte efetiva, na confecção dos furos alargados, com a variação da dimensão do guia cilíndrico dos dentes dos alargadores.

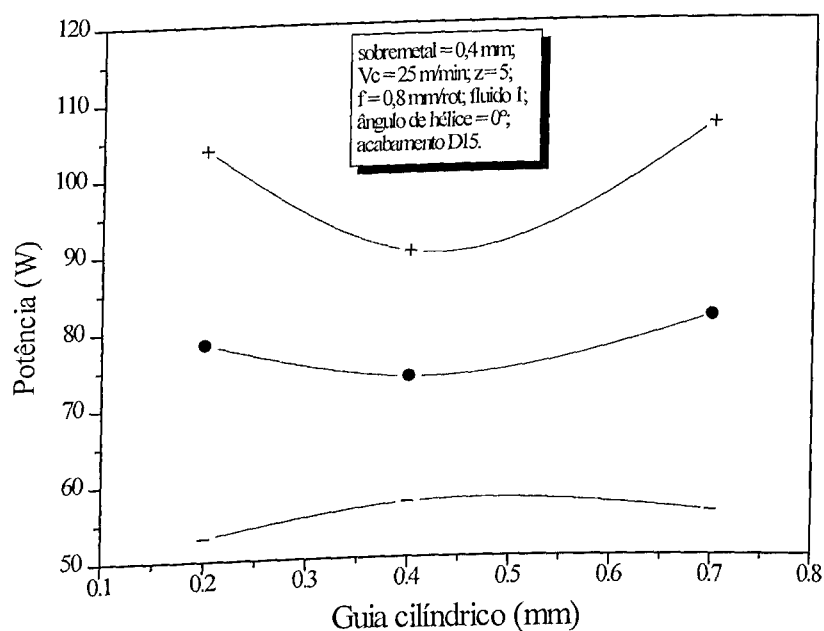


Figura 4.37 - Influência do guia cilíndrico sobre a potência.

Observa-se a maior potência consumida para o guia cilíndrico de 0,7 mm, pois este tem uma área de contato maior, gerando maiores forças e potências. Nas guias de 0,2 e 0,4 mm houve uma inversão nos resultados, pois esperava-se, pelo mesmo motivo, um maior consumo de potência do guia cilíndrico de 0,4 mm. Observa-se, entretanto, que a diferença é de apenas 5 W (78,4 contra 73,5 W), o que pode ser inferior a precisão do equipamento utilizado.

4.7. ACABAMENTO DO PLANO DE SAÍDA

A Tabela 4.6 apresenta os valores médios, e os respectivos desvios padrões, das variáveis dependentes obtidos na confecção dos furos alargados com a variação do acabamento do plano de saída.

Tabela 4.7 - Resumo dos resultados encontrados na etapa 7.

sub-etapa	7.1	7.2	7.3
acabamento do plano de saída	D7	D15	D45
\varnothing (mm)	12,0115	12,0075	12,0122
desvio	0,0057	0,0022	0,0071
Ra(μ m)	1,7835	2,4953	2,0462
desvio	0,8873	0,3127	0,9151
Cr(μ m)	0,0194	0,0170	0,0306
desvio	0,0092	0,0055	0,0157
Cl(μ m)	0,0151	0,0072	0,0304
desvio	0,0147	0,0032	0,0204
potência(W)	79,2109	78,4015	75,3547
desvio	12,3383	25,3758	17,1283

A Figura 4.38 mostra a influência do acabamento do plano de saída sobre o diâmetro médio dos furos alargados.

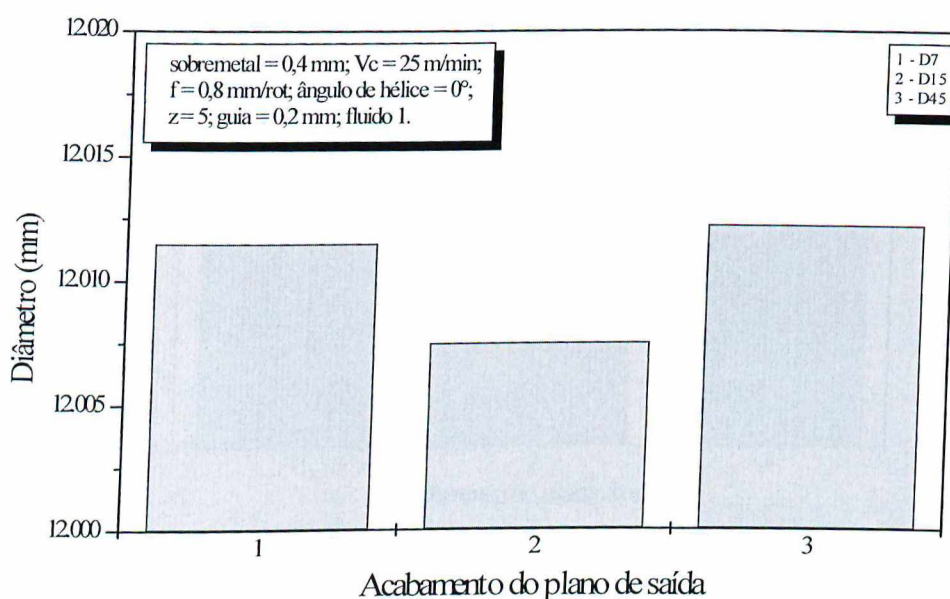


Figura 4.38 - Influência do acabamento do plano de saída sobre o diâmetro.

O melhor acabamento da superfície de saída dos alargadores tendem imprimir menor restrição ao escorregamento do cavaco, mas pode proporcionar maior tendência de adesão e maiores zonas de aderência. Os resultados, portanto, vão depender se o acabamento da superfície de saída aumentou ou diminuiu a força tangencial que atua nestas superfícies durante a movimentação do cavaco. Se a tendência for aumentar esta força, os efeitos são negativos nas variáveis dependentes em estudo e vice-versa. O melhor resultado em termos de precisão de diâmetro foi obtido com um acabamento de plano de saída de D15.

A Figura 4.39 apresenta o comportamento da rugosidade média dos furos alargados nos ensaios do presente trabalho em função dos três tipos de acabamento do plano de saída das lâminas dos alargadores utilizados. Em relação a rugosidade, o menor valor de R_a foi obtido por D7, seguido por D45 e D15, respectivamente.

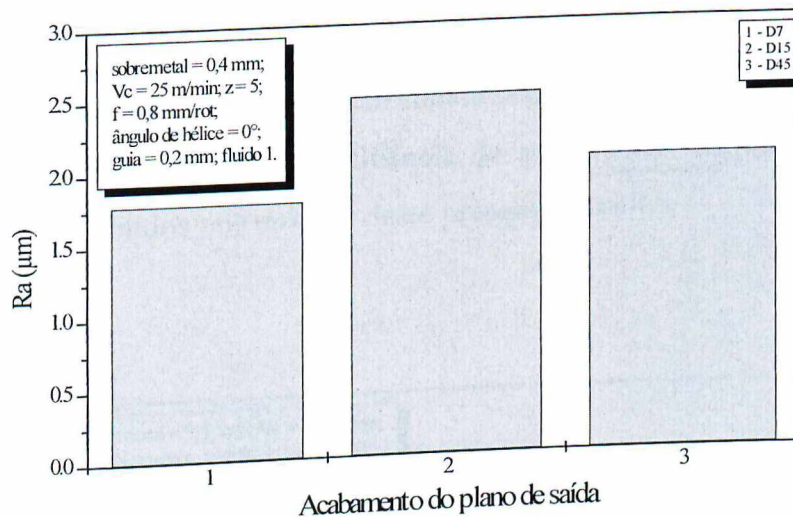


Figura 4.39 - Influência do acabamento do plano de saída sobre a rugosidade.

A Figura 4.40 mostra as fotos das superfícies dos furos alargados com variação do acabamento do plano de saída das lâminas dos alargadores.

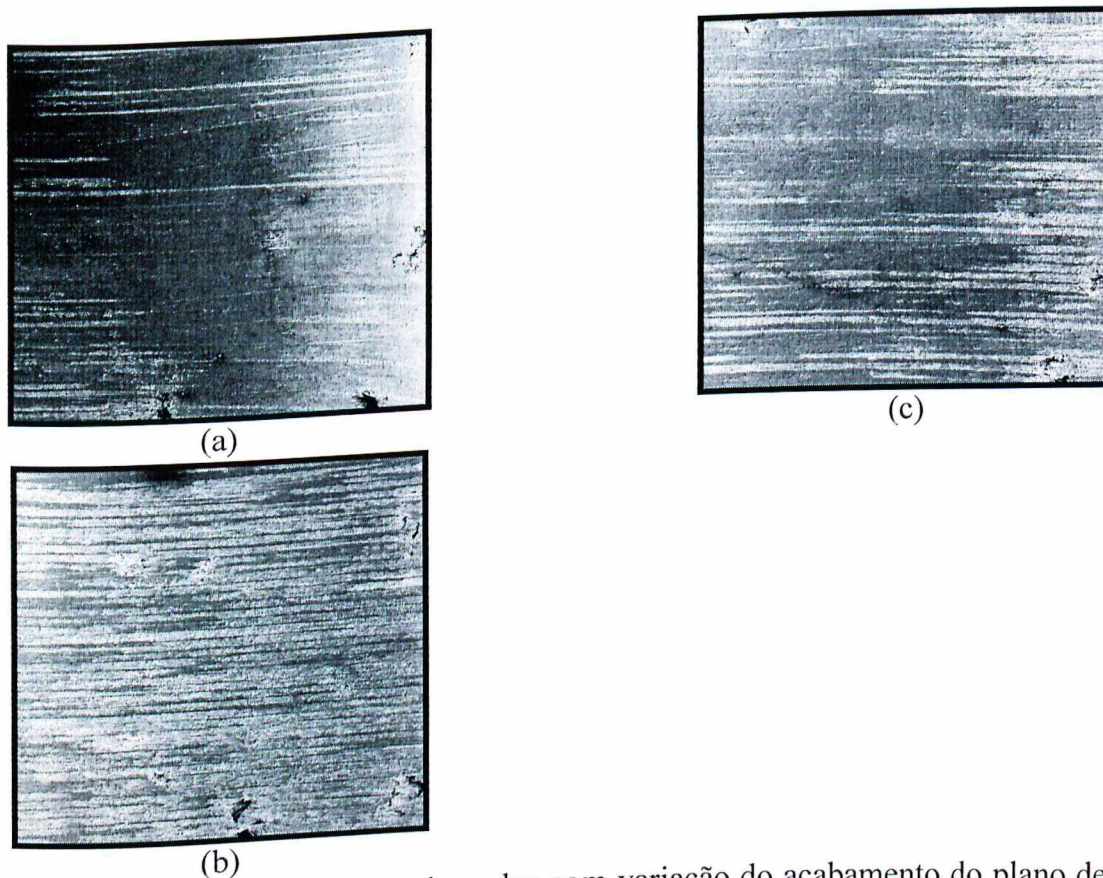


Figura 4.40 - Superfícies dos furos alargados com variação do acabamento do plano de saída: (a) D7; (b) D15; (c) D45. Ampliação de 7 vezes.

Pode-se notar de forma nítida na foto (a) que o menor valor de Ra foi obtido para um acabamento do plano de saída D7 ($1,7835 \mu\text{m}$). Observa-se também, nas outras fotos, que os acabamentos superficiais obtidos são também satisfatórios.

É apresentada na Figura 4.41 a influência do acabamento do plano de saída sobre a circularidade dos furos obtidos nos ensaios deste presente trabalho.

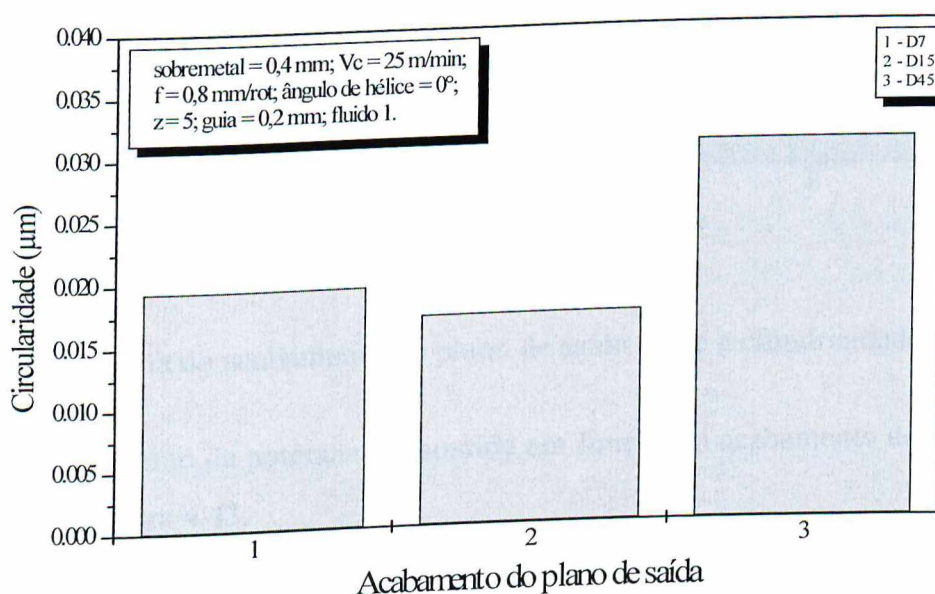


Figura 4.41 - Influência do acabamento do plano de saída sobre a circularidade.

O gráfico desta figura mostra uma certa tendência de menor variação dimensional quanto à circularidade quando o acabamento superficial do plano de saída for submetido a um rebolo diamantado de menor granulometria, apesar de D15 ter obtido melhores resultados.

A Figura 4.42 mostra o comportamento da cilindricidade dos furos alargados com a variação do acabamento do plano de saída das lâminas dos alargadores. O acabamento D15 foi superior aos outros dois, mas nota-se também uma tendência deste parâmetro crescer com o aumento da rugosidade da superfície de saída do alargador.

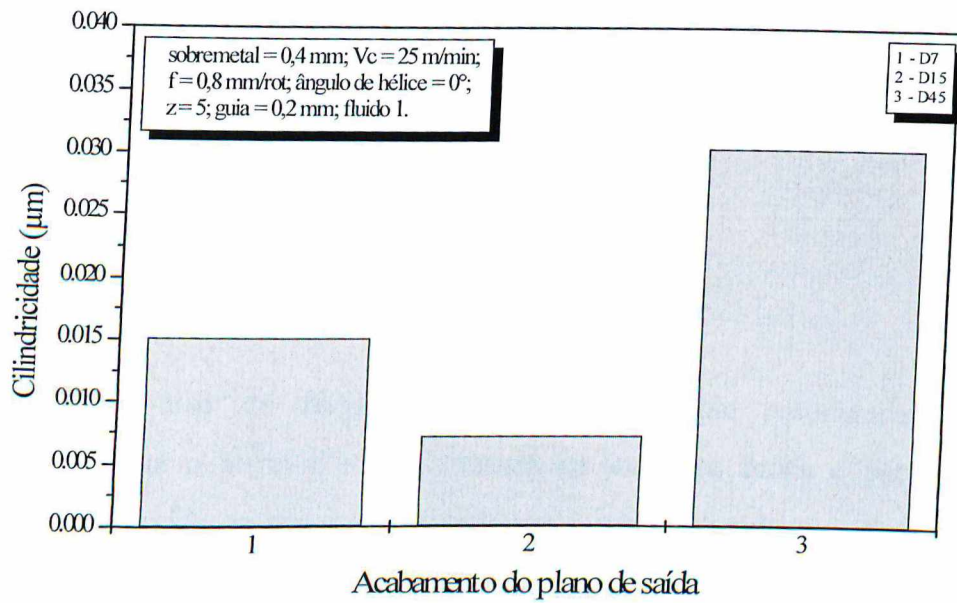


Figura 4.42 - Influência do acabamento do plano de saída sobre a cilindridade.

O comportamento da potência consumida em função do acabamento do plano de saída pode ser visto na Figura 4.43.

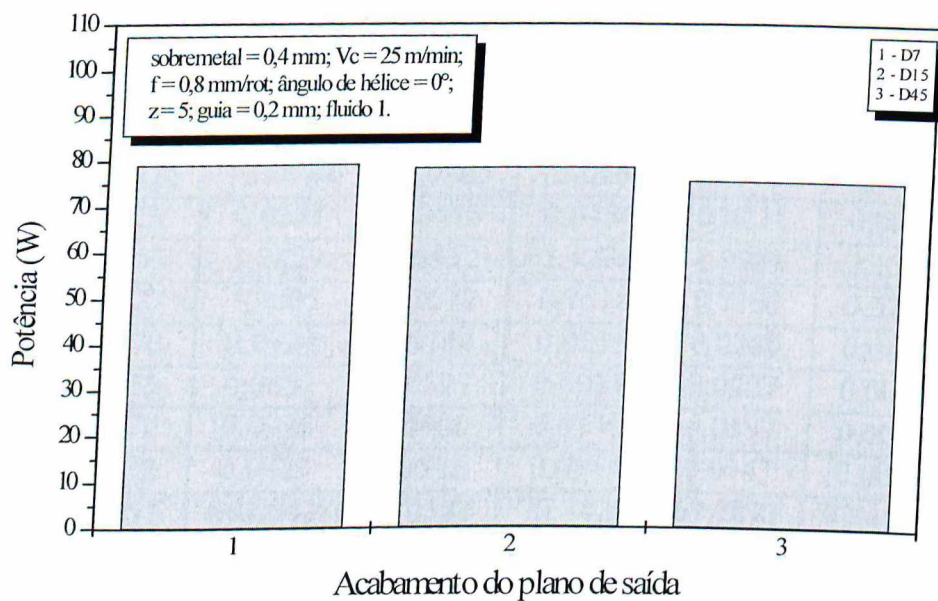


Figura 4.43 - Influência do acabamento do plano de saída sobre a potência.

Nota-se que a variação desta variável independente não afeta significativamente o consumo da potência. Isto indica que a tendência é existir um equilíbrio dos efeitos do acabamento da superfície de saída dos alargadores com a força tangencial que atua naquela superfície.

4.8. FLUIDO DE CORTE

Em geral, o uso de fluido de corte é altamente recomendado porque ele substancialmente reduz o atrito e a temperatura na interface broca e peça. Isto reduz o desgaste e prolonga a vida da broca, resultando em custos reduzidos por furo executado por causa do menor "downtime" para troca de ferramenta e reafiação. Embora, em geral, os fluidos de corte são benéficos, o corte a seco é aconselhável em algumas aplicações tal como alargamento de ferro fundido (Ten Horn et alli, 1959, apud Soratgar, 1987). A Tabela 4.8 mostra os resultados médios, e os respectivos desvios padrões, das variáveis dependentes (diâmetro, rugosidade, circularidade, cilíndricidade e potência) obtidos pelos diferentes tipos de fluido de corte usados no processo de alargamento do presente trabalho. Todos os fluidos utilizados são semi-sintéticos, com exceção do fluido 6 que é sintético.

Tabela 4.8 - Resumo dos resultados encontrados na etapa 8.

sub-etapa	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7
tipo de fluido	1	2	3	4	5	6	7
\varnothing (mm)	12,0075	12,0184	12,0363	12,0164	12,0185	12,0141	12,0156
desvio	0,0022	0,0211	0,0445	0,0154	0,0231	0,0034	0,0233
Ra(μ m)	2,4953	3,2829	3,6832	2,4274	2,9981	2,1516	2,6465
desvio	0,3127	1,3005	1,3677	0,7515	0,7103	0,6214	0,7944
Cr(μ m)	0,0170	0,0924	0,0734	0,0215	0,0280	0,0190	0,0307
desvio	0,0055	0,0652	0,0527	0,0081	0,0227	0,0068	0,0192
Cl(μ m)	0,0072	0,0926	0,0900	0,0140	0,0197	0,0066	0,0189
desvio	0,0032	0,0529	0,0746	0,0114	0,0147	0,0021	0,0148
potência(W)	78,4015	64,6041	72,0587	72,7428	67,7871	72,4874	63,0546
desvio	25,3758	15,7460	15,1093	14,1709	12,5811	11,0128	15,3362

A Figura 4.44 mostra os valores de diâmetro em função da variação do tipo de fluido de corte.

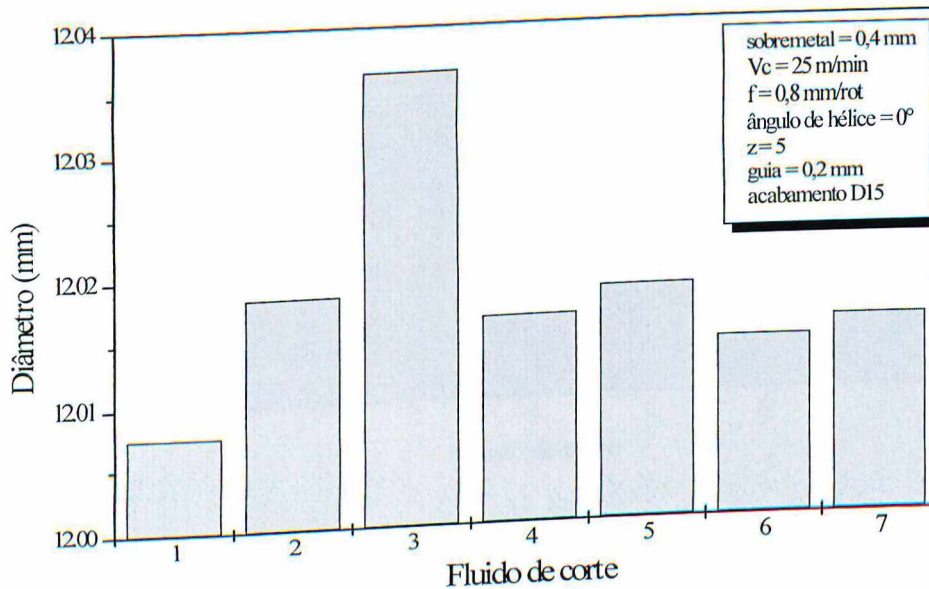


Figura 4.44 - Influência do fluido de corte sobre o diâmetro.

O fluido 1 apresentou um excelente resultado com diâmetro médio de 12,0075 mm, o qual se encontra dentro da tolerância IT6. Os fluidos 6, 7 e 4 apresentaram resultados satisfatórios com diâmetros médios dentro da tolerância IT7 (12,0141, 12,0156, e 12,0164 mm, respectivamente).

A influência do tipo de fluido de corte sobre a rugosidade é mostrada no gráfico da Figura 4.45. O menor valor de rugosidade média apresentada foi do fluido 6 com 2,1516 μm . O fato deste fluido ser o único sintético pode ser a justificativa mais convincente.

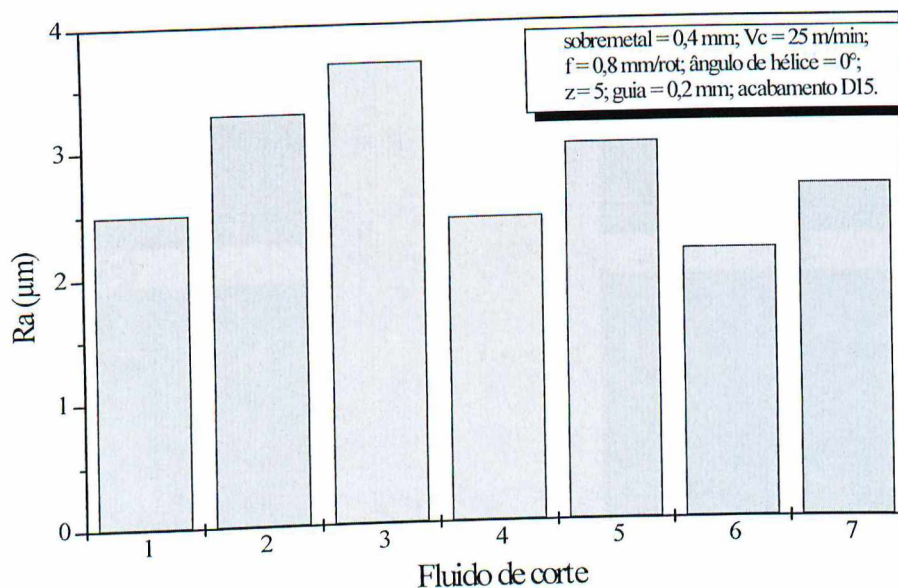


Figura 4.45 - Influência do fluido de corte sobre a rugosidade.

Os resultados dos experimentos de Kosenko e Ageev (1973) mostraram que com a redução do coeficiente de fricção, a rugosidade superficial também diminuía. A presença do fluido com maior propriedade lubrificante apresentou menor coeficiente de fricção e, conseqüentemente, menor rugosidade. Foi concluído, nos ensaios de Schroeter (1989), que a rugosidade diminuía quando o poder de lubrificação do fluido aumentava. Ohgo et alli (1979) ao alargar ferro-fundido cinzento utilizando fluido de corte obteve $R_{máx}$ igual a $12 \mu\text{m}$. Observou que com o uso do refrigerante conseguiu-se melhor acabamento que a seco. Além disso, as APC's são muito menores quando um refrigerante é utilizado, independente da geometria do alargador.

A Figura 4.46 apresenta as superfícies dos furos usinados pelo processo de alargamento com diferentes tipos de fluido de corte. Nota-se claramente, na foto (f), que o fluido 6 apresentou melhor acabamento superficial.

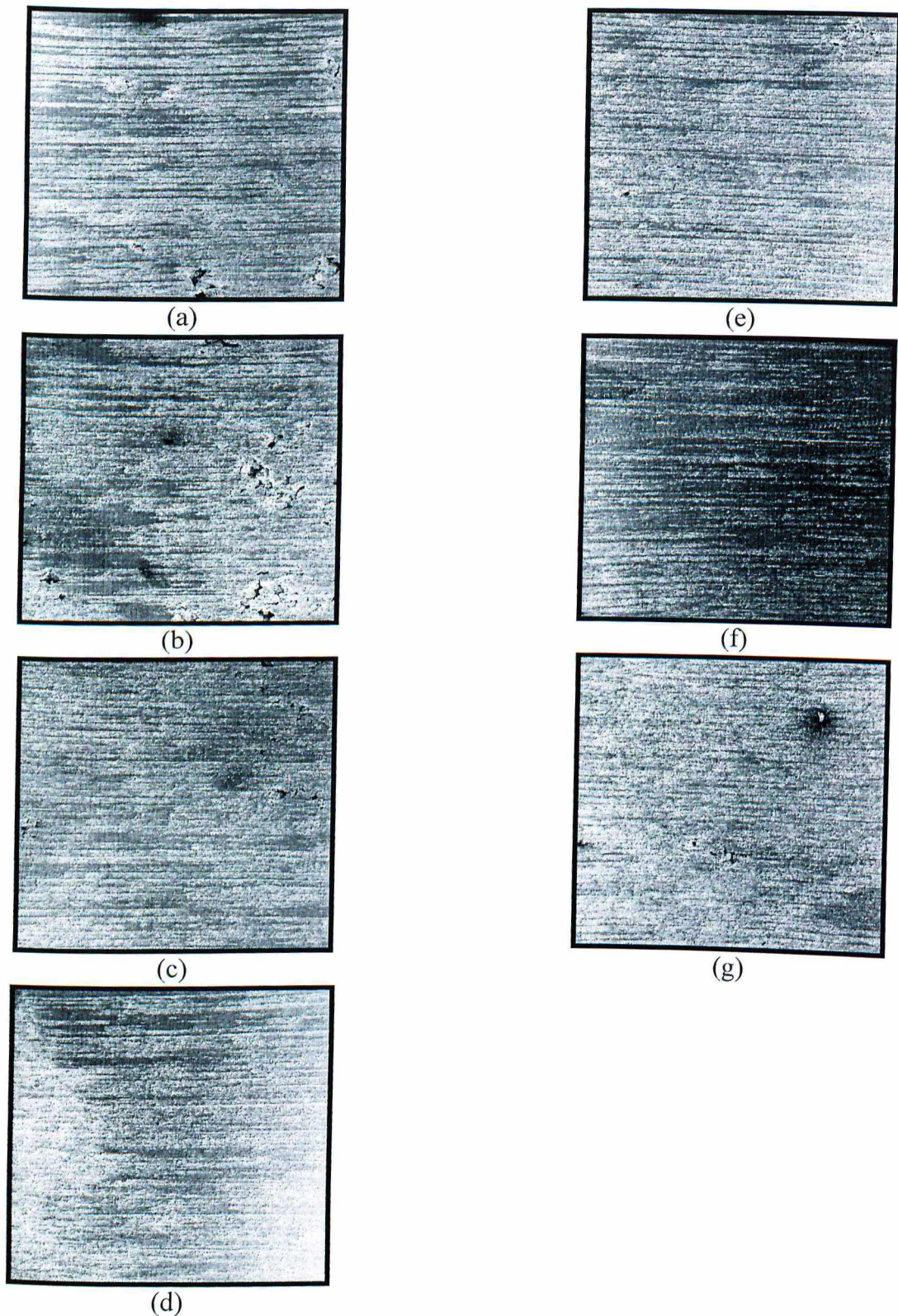


Figura 4.46 - Superfícies dos furos alargados com variação do fluido de corte: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6; (g) 7. Ampliação de 7 vezes.

Nos experimentos de Turley (1975), onde alargou-se alumínio 7075 com alargadores para pino cônico de metal duro, foi observado que o alargamento a seco havia presença da APC, enquanto que com óleo de corte mineral nenhuma APC significativa foi encontrada. Ao

examinar o alargador, observou-se que quando o alargamento foi realizado a seco houve uma apreciável adesão da APC nas arestas de corte e nos flancos circulares. Acredita-se que a APC foi formada pelas sucessivas soldagens de camadas da liga de alumínio sobre o topo de cada uma. Este efeito poderia ser mais claramente visto sobre os flancos circulares adjacentes às arestas de corte. O acabamento superficial resultante foi muito ruim. Quando se utilizou o óleo de corte mineral, a APC da liga de alumínio foi virtualmente prevenida, e houve apenas leves traços de adesão da liga de alumínio sobre as arestas de corte e os flancos circulares. O acabamento superficial foi muito bom em comparação com o alargamento a seco. O uso de óleo de corte mineral no alargamento reduziu as forças. Isto em parte é associado com a adesão reduzida do metal sobre os flancos circulares e a consequente redução das forças de fricção entre o metal aderido e as superfícies alargadas.

A Figura 4.47 destaca a influência do tipo de fluido de corte sobre a circularidade dos furos alargados.

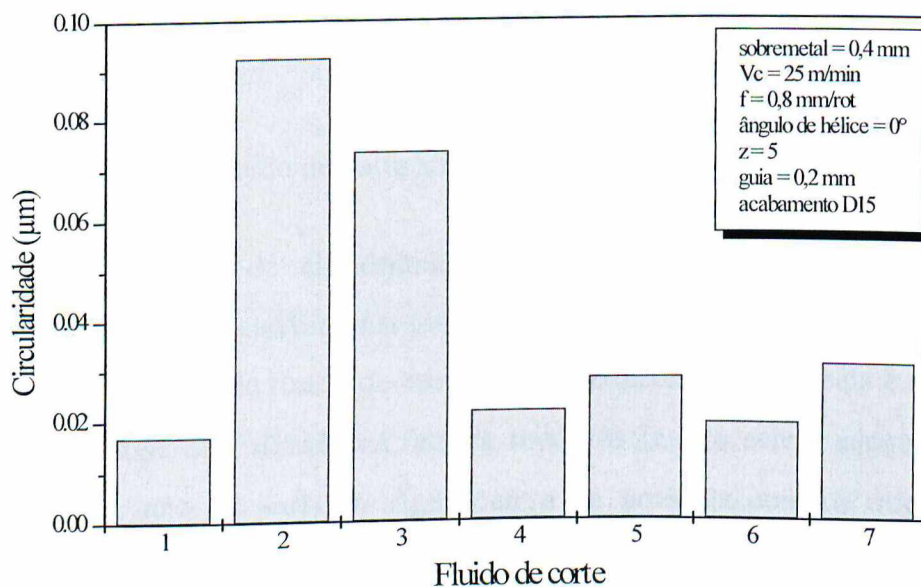


Figura 4.47 - Influência do fluido de corte sobre a circularidade.

O fluido de corte 1 apresentou a menor variação dimensional quanto à circularidade ($0,0170 \mu\text{m}$). Apenas os fluidos 2 e 3 apresentaram resultados significativamente piores. Schroeter (1989) observou que o fator de maior influência na circularidade foi o fluido de

corde empregado: emulsões de óleo conseguiram maiores valores de circularidade, enquanto os óleos de corte davam valores satisfatórios.

O comportamento da cilindricidade dos furos alargados em função do tipo de fluido de corte é mostrado na Figura 4.48.

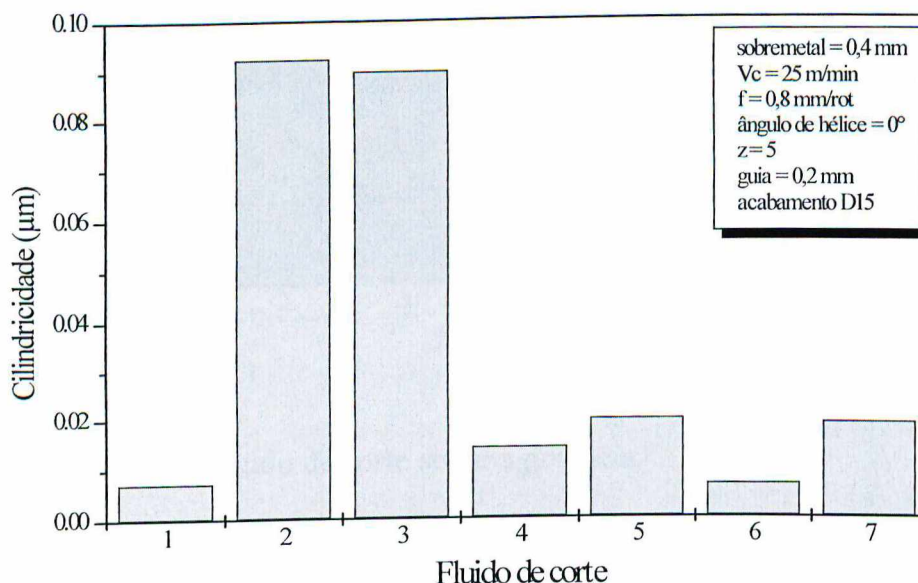


Figura 4.48 - Influência do fluido de corte sobre a cilindricidade.

O melhor resultado de cilindricidade foi obtido pelo fluido 6 (0,0066 µm), e novamente, resultados significativamente piores foram obtidos com os fluidos 2 e 3.

A influência do tipo de fluido de corte sobre o consumo de potência é apresentado na Figura 4.49. Verifica-se que, devido ao fato de todos os fluidos serem adequados para esta aplicação específica, não há variação significativa da potência com os diferentes fluidos utilizados.

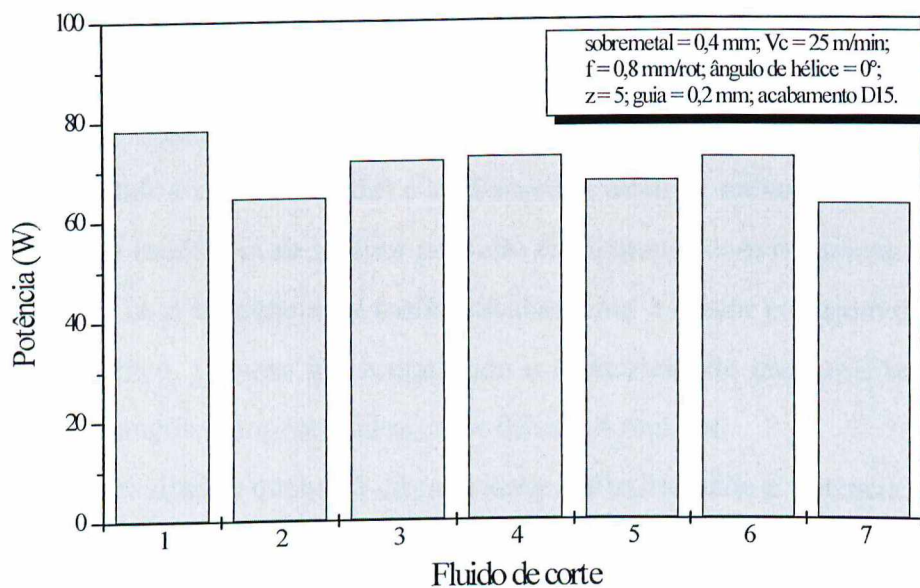


Figura 4.49 - Influência do fluido de corte sobre a potência.

4.9. SUMÁRIO DOS MELHORES RESULTADOS

A Tabela 4.9 apresenta o resumo das melhores condições.

Tabela 4.9 - Resumo das melhores condições.

CONDIÇÃO	MELHOR
sobremetal de 0,4 e 0,6 mm	Cr - Cl - Ø - Ra
velocidade de corte baixa	Cr - Cl - Ø - Ra
avanço maior	Ø
avanço menor	Cr - Cl - Ra
ângulo de hélice entre 0° e 7°	Cr - Cl
ângulo de hélice de 0°	Ø
número de lâminas maior	Cl - Ø - Ra
guia cilíndrico menor	Cr - Cl
rebolo D15	Cr - Cl - Ø
fluidos 1 e 6	Cr - Cl - Ø

Simbologia: Cr - Circularidade; Cl - Cilindricidade; Ø - diâmetro; Ra - acabamento (rugosidade média aritmética).

5. CONCLUSÕES

- Os menores valores de sobremetal (0,4 e 0,6 mm) apresentaram melhores resultados quanto à precisão de diâmetro, cilindridade, acabamento e circularidade, respectivamente.

- Com velocidades de corte obtiveram-se melhores estabilidade dimensional (diâmetro, circularidade e cilindridade) e acabamento, além de menor consumo de potência.

- Houve uma tendência de melhor precisão de diâmetro com o aumento do avanço, em contrapartida, houve uma tendência de melhor acabamento e menor consumo de potência com a diminuição do avanço. Quanto à circularidade e cilindridade melhores resultados foram apresentados para avanços compreendidos entre 0,2 e 0,4 mm/rot.

- Melhores resultados quanto à circularidade, cilindridade e potência consumida são obtidas com ângulos de hélice entre 0° e 7°. O pior acabamento foi apresentado com ângulo de hélice de 0°, mas este ângulo apresentou melhor precisão de diâmetro.

- O maior número de lâminas resultou em melhores precisão de diâmetro, acabamento e circularidade, e em pior cilindridade e maior consumo de potência.

- Pequeno valor do guia cilíndrico (0,2 mm) acarretou em excelentes resultados quanto à precisão de diâmetro, à rugosidade e à cilindridade. Enquanto os melhores resultados quanto à circularidade e menor consumo de potência foi obtido para valor intermediário do guia cilíndrico (0,4 mm).

- O acabamento do plano de saída D15 apresentou melhor estabilidade dimensional (maior precisão de diâmetro e menores erros de forma). Entretanto, o mesmo apresentou o pior acabamento. Não houve influência significativa do acabamento do plano de saída sobre o consumo de potência.

- Os fluidos 1 e 6, semi-sintético e sintético respectivamente, apresentaram os melhores resultados em relação às variáveis dependentes (diâmetro, rugosidade, circularidade, cilindridade e potência).

- A metodologia utilizada mostrou-se ser satisfatória na otimização dos principais parâmetros do processo de alargamento para esta liga de alumínio-silício. Desta forma, a condição sugerida é a seguinte: sobremetal de 0,4 mm; velocidade de corte de 25 m/min; avanço de 0,8 mm/rot; ângulo de hélice de 0°; número de lâminas igual a 5; dimensão do guia cilíndrico de 0,2 mm; acabamento do plano de saída D15; e fluido de corte 1.

- O sistema de aquisição de potência, que utiliza o efeito Hall, não se mostrou adequado para o processo de alargamento, onde os esforços são muito pequenos, devido a grande dispersão dos resultados.

6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- Em relação ao processo de alargamento de furos com alargadores, o número de pesquisas para a determinação do momento de torção e força de avanço é relativamente reduzido. Sugere-se estudar estas variáveis com a utilização de um equipamento adequado (plataforma dinamométrica piezoelétrica).

- O número de ensaios de desgaste e vida dos alargadores realizados até o presente é relativamente pequeno, de maneira que não se dispõe ainda de tabelas que nos forneçam a velocidade de corte para uma vida determinada. Desta forma, não há possibilidade de aplicação ainda da fórmula de Taylor da vida da ferramenta. Sugere-se realizar ensaios de longa duração de forma a mapear desgaste e determinar curvas de vida.

- Seria interessante estudar a influência dos parâmetros de corte do processo de furação sobre o resultado final de um furo alargado. Além de verificar a influência dos parâmetros do processo de alargamento para diversas dimensões de diâmetro.

- Os resultados encontrados nesta investigação são bem específicos. Portanto, extrapolações e generalizações devem ser feitas com ressalvas. Entretanto, poder-se-ia aumentar a possibilidade de generalizar e extrapolar se fizesse uma investigação mais aprofundada de cada variável dependente, com várias condições sendo alteradas, em diferentes materiais, para buscar respostas mais precisas da influência de cada uma.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGOSTINHO, O.L.; RODRIGUES, A.C.S. e LIRANI, J. (1977). *Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões*, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 295 pags.
- BAKER, A. (1975). *Use and Care of Reamers*, American Machinist, Vol. 119, N° 6; pp. 71-74.
- BELOUS, Y.P. (1976). *Accuracy of Reamed Bores*, Machining and Tooling, Vol. 47, N° 4, pp. 42.
- BLACK, J.T. (1989). *Introduction to Machining Processes*, Metals Handbook, Volume 16, Machining, Ninth Edition, ASM international.
- BOOTH, G.R. (1989). *Bore Reaming Can Beat Finish Boring*, Machinery and Production Engineering, 3 February, pp. 28-30.
- CASSIN, C. e BOOTHROYD, G. (1965). *Lubrication in Metal Cutting*, Scientific Lubrication, Vol. 17, pp. 13-16, apud TURLEY, D.M. (1975), *Surface Finishes Produced by Tungsten Carbide Taper Pin Reamers*, Trans. ASME Ser. H., Vol. 97, N° 1, pp. 21-24.
- CHAMBERLAIN, B. (1989). *Machinability of Aluminum Alloys*, Metals Handbook, Volume 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals, Ninth Edition, ASM international.
- CHENGZHOU, C. (1983). *The Effect of Cutting Conditions on Torque and Surface Roughness in Reaming*, First International Metal Cutting Conference, China, apud SCHROETER, R.B. (1989), *Alargamento de Precisão em Alumínio Aeronáutico com Ferramentas de Gume Único Regulável*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 113 pags.

- COELHO, R.T.; YAMADA, S.; ASPINWALL, D.K.; e WISE, M.L.H. (1995). *The Application of Polycrystalline Diamond (PCD) Tool Materials When Drilling and Reaming Aluminium Based Alloys Including MMC*, International Journal of Machine Tools & Manufacturing, Volume 35, n° 5, pp.761-774.
- COUTINHO, T. de A. (1980). *Análise e Prática - Metalografia de Não-Ferrosos*, Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 128 pags.
- DALLAS, D.B. (1976). *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, Society of Manufacturing Engineers, McGraw-Hill Book Co., New York, N.Y., 3rd ed., apud SORATGAR, M.S. (1987), *An Analysis of the Effectiveness of Reaming as a Secondary Operation for Hole Production*, Degree of Doctor of Philosophy, Texas Technology University, USA, 298 pags.
- DE CHIFFRE, L.; LASSEN, S.; PEDERSEN, K.B.; e SKADE, S. (1994). *A Reaming Test for Cutting Fluid Evaluation*, Journal Synth. Lubr., Vol. 11, N° 1, pp. 17-34.
- DIETER, K. (1982). *Reaming or Precision Boring*, Tz Metallbearb, 76, pp. 19-24, apud SHUNMUGAM, M.S. e SOMASUNDARAM, G. (1990), *Investigations into Reaming Processes Using a Frequency-Decomposition Technique*, International Journal Prod. Res., vol. 28, n° 11, pp. 2065-2074.
- ERDEL, B.P. (1989). *High-Precision Tools Cut Secondary Operations*, Tooling and Production, Vol. 55, N° 4, pp. 54-56.
- FERRARESI, D. (1972). *Usinagem dos Metais*, apostila, Quarta Edição, Associação Brasileira de Metais, São Paulo.
- FUKUMOTO, I. e AYABE, T. (1990). *Improvement of Ground Surface Roughness in Al-Si Alloys*, Wear, Vol. 137, N° 2, pp. 199-209.

- GALLOWAY, D.F. (1957).** *Some Experiments on the Influence of Various Factors on Drill Performance*, Transactions of the ASME, Vol.79, pp. 191-224, apud SORATGAR, M.S. (1987), *An Analysis of the Effectiveness of Reaming as a Secondary Operation for Hole Production*, Degree of Doctor of Philosophy, Texas Technology University, USA, 298 pags.
- GANGOPADHYAY, A.K.; RAMANANDA, B.S.; RANGANATHAN, M.V.; e KARUNAKARANS, S. (1980).** *Production Technology: Drilling and Reaming*, HMT Bangalore, HMT Ltd., pp. 147-157, apud SORATGAR, M.S. (1987), *An Analysis of the Effectiveness of Reaming as a Secondary Operation for Hole Production*, Degree of Doctor of Philosophy, Texas Technology University, USA, 298 pags.
- GOMES, M.R. e BRESCIANI FILHO, E. (1976).** *Propriedades e Usos de Metais Não-Ferrosos*, Quinta Impressão, Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 280 pags.
- HATSCHEK, R.L. (1978).** *Machining Aluminium*, American Machinist, special report 702 (3), apud SCHROETER, R.B. (1989), *Alargamento de Precisão em Alumínio Aeronáutico com Ferramentas de Gume Único Regulável*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 113 pags.
- HOLMAN, J.P. (1978).** *Experimental Methods for Engineers*, Third Edition, McGraw-Hill, USA, 493 pags.
- ILIN, V.M. (1975).** *Cutting Properties of Solid Cemented-Carbide Reamers*, Russ. Eng. J., Vol. 55, N° 4, pp. 49-50.
- ILIN, V.M. e MUKHIN, A.V. (1977).** *Reamer for Reaming Non-Ferrous Metals and Alloys*, Machining and Tooling, Vol. 48, N° 7, pp. 52.
- KÖNIG, W. e ERINSKI, D. (1979).** *Spanende Bearbeitung von Aluminium-Silizium-Druckguß*, Giesserei 66, 6, pp. 142-146, apud KÖNIG, W. (1981), *Tecnologia da Fabricação - Tornear, Fresar e Furar*, Vol. 1, Universidade Técnica de Aachen, Alemanha, 419 pags., traduzido por Weingaertner, W.L., UFSC.

- KÖNIG, W. (1981). *Tecnologia da Fabricação - Tornear, Fresar e Furar*, Vol. 1, Universidade Técnica de Aachen, Alemanha, 419 pags., traduzido por Weingaertner, W.L., UFSC.
- KÖNIG, W. (1990). *Fertigungsverfahren Bd.1*, Drehen, Fräsen, Bohren, VDI - Verlag Düsseldorf, apud TÖNSHOFF, H.K., SPINTIG, W., KÖNIG, W., e NEISES, A. (1994), *Machining of Holes Developments in Drilling Technology*, Annals of the CIRP, Volume 43/2/1994, pp. 551-561.
- KOSENKO, A.I. e AGEEV, L.D. (1973). *Rapid Method for Evaluating Reaming Fluids*, Machining and Tooling, Vol. 44, N° 7, pp. 45-46.
- KRESS, D. (1975). *Reiben mit hohen Schnittgeschwindigkeiten*, Werkzeugmaschine International WI - Fachbuchreihe Band 4, Vogel-Verlag, Würzburg, apud WEINERT, K.; ADAMS, F.; BIERMANN, D.; e THAMKE, D. (1998), *Alargadores de Corte Único: Corte mais Eficiente, Além de Vantagens Econômicas*, Máquinas e Metais, Aranda Editora, Ano XXXIV, n° 384, pp. 38-57.
- KRESS, D. (1982). *Reiben Oder Feinbohren*, Tz Fuer Metallbearbeitung, 76, Jahrg, (2), pp. 19-24, apud SCHROETER, R.B. (1989), *Alargamento de Precisão em Alumínio Aeronáutico com Ferramentas de Gume Único Regulável*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 113 pags.
- KRESS, D. e ERDEL, B.P. (1987). *CNC-Tooling for Finish-Machining High Precision Bores*, Carbide Tool Journal, Vol. 19, N° 5, pp.10-13.
- LAI, M.O. e KOH, S.F. (1994). *Fatigue Performance of Holes with Different Finishing Processes*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 44, pp. 118-128.
- MACHADO, A.R. e DA SILVA, M.B (1997). *Usinagem dos Metais*, apostila, 3ª versão, Editora da Universidade Federal de Uberlândia - EDUFU, 172 pags.

METALS HANDBOOK (1973). *Metallography, Structures and Phase Diagrams*, Vol. 8, Eighth Edition, American Society for Metals.

METALS HANDBOOK - VOLUME 2 (1989). *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals*, Ninth Edition, ASM international.

METALS HANDBOOK - VOLUME 16 (1989). *Machining*, Ninth Edition, ASM international.

MILLER, P.C. (1986). *Better Tools Upgrade Boring and Reaming*, Tooling and Production, (10), pp. 30-32, apud SCHROETER, R.B. (1989), *Alargamento de Precisão em Alumínio Aeronáutico com Ferramentas de Gume Único Regulável*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 113 pags.

MORTON, I.S. (1967). *Recent Developments in Cutting Fluids*, ISI Special Report 94, pp. 185-192, apud TURLEY, D.M. (1975), *Surface Finishes Produced by Tungsten Carbide Taper Pin Reamers*, Trans. ASME Ser. H., Vol. 97, N° 1, pp. 21-24.

NAKAYAMA, K.; SHAW, M.C.; e BREWER, R.C. (1966). *Relationship between Cutting Forces, Temperature, Built-up Edge and Surface Finish*, Annals of CIRP, Vol. 14, pp. 211-223, apud MACHADO, A.R. e SILVA, M.B. (1997), *Usinagem dos Metais*, apostila, 3ª versão, Editora da Universidade Federal de Uberlândia - EDUFU, 172 pags.

OHGO, K.; SATOH, A.; MIZUNO, T.; e ITOH, T. (1979). *Relation between Cutting Conditions and Precision in the Reaming of Gray Iron Castings*, Wear, Vol. 52, N° 1, pp. 79-88.

PERRET, R. (1948). *La Fonderie des Alliages Lagers*, Ed. Dunod, apud GOMES, M.R. e BRESCIANI FILHO, E. (1976), *Propriedades e Usos de Metais Não-Ferrosos*, Quinta Impressão, Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 280 pags.

ROCEK, W. e BOLES LAU, M. (1982). *Einfluss der Schneidenqualitaet von Reibahien auf die Oberflaechenrauheit der Bohrungen*, Werkstatt und Betrieb, 115 (12), pp. 785-786, apud SCHROETER, R.B. (1989), *Alargamento de Precisão em Alumínio Aeronáutico com Ferramentas de Gume Único Regulável*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 113 pags.

ROSSI, M. (1970). *Máquinas-Operatrizes Modernas*, Livro Ibero-Americano Ltda, Rio de Janeiro, 562 pags.

SCHMALZ, K. (1970). *Reibahle für hohe Kreisformgenauigkeit*, Werkstatt und Betrieb 103, 5, pp. 313-318, apud WEINERT, K.; ADAMS, F.; BIERMANN, D.; e THAMKE, D. (1998), *Alargadores de Corte Único: Corte mais Eficiente, Além de Vantagens Econômicas*, Máquinas e Metais, Aranda Editora, Ano XXXIV, n° 384, pp. 38-57.

SCHROETER, R.B. (1989). *Alargamento de Precisão em Alumínio Aeronáutico com Ferramentas de Gume Único Regulável*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 113 pags.

SHAW, M.C. (1986). *Metal Cutting Principles*, Oxford Science Publications, USA, ISBN 0-19-859002-4, 594 pags.

SHOUCKRY, A.S. (1982). *The Effect of Cutting Conditions on Dimensional Accuracy*, Wear, Vol. 80, pp. 197-205, apud MACHADO, A.R. e SILVA, M.B. (1997), *Usinagem dos Metais*, apostila, 3ª versão, Editora da Universidade Federal de Uberlândia - EDUFU, 172 pags.

SHUNMUGAM, M.S. e SOMASUNDARAM, G. (1990). *Investigations into Reaming Processes Using a Frequency-Decomposition Technique*, International Journal Prod. Res., vol. 28, n° 11, pp. 2065-2074.

SKF (1987). *Manual Técnico SKF*, SKF Ferramentas S.A., São Paulo.

SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS (1983). *Machining*, Tool and Manufacturing Engineers Handbook, Fourth Edition, Dearborn, One S.M.E. Drive, Vol.1, pp. 9•107-9•133, apud SCHROETER, R.B. (1989), *Alargamento de Precisão em Alumínio Aeronáutico com Ferramentas de Gume Único Regulável*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 113 pags.

SOMASUNDARAM, G. (1987). *Study of the Reaming Process*, M. Tech. Dissertation, IIT, Madras, apud SHUNMUGAM, M.S. e SOMASUNDARAM, G. (1990), *Investigations into Reaming Processes Using a Frequency-Decomposition Technique*, International Journal Prod. Res., vol. 28, n° 11, pp. 2065-2074.

SORATGAR, M.S. (1987). *An Analysis of the Effectiveness of Reaming as a Secondary Operation for Hole Production*, Degree of Doctor of Philosophy, Texas Technology University, USA, 298 pags.

STEMMER, C.E.. *Ferramentas de Furar*, Apostila, Editora da UFSC, Florianópolis, apud SCHROETER, R.B. (1989), *Alargamento de Precisão em Alumínio Aeronáutico com Ferramentas de Gume Único Regulável*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 113 pags.

STEMMER, C.E. (1987). *Ferramentas de Corte: ferramentas simples de torneiar*, Editora da UFSC, Florianópolis, 203 pags.

STEMMER, C.E. (1992). *Ferramentas de Corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos*, Editora da UFSC, Florianópolis, 314 pags.

TEN HORN, B.L.; SCHUERMAN, R.A.; e SLAATS, J. (1959). *Reaming Accuracy Improved with Coolants*, The Tool Engineer, Vol. 42, n° 3, pp. 93-99, apud SORATGAR, M.S. (1987), *An Analysis of the Effectiveness of Reaming as a Secondary Operation for Hole Production*, Degree of Doctor of Philosophy, Texas Technology University, USA, 298 pags.

- TÖNSHOFF, H.K. (1991).** *Fertigungsverfahren*, Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, 17, Auflage, apud TÖNSHOFF, H.K., SPINTIG, W., KÖNIG, W e NEISES, A. (1994), *Machining of Holes Developments in Drilling Technology*, Annals of the CIRP, Volume 43/2/1994, pp. 551-561.
- TÖNSHOFF, H.K.; SPINTIG, W.; KÖNIG, W.; e NEISES, A. (1994).** *Machining of Holes Developments in Drilling Technology*, Annals of the CIRP, Volume 43/2/1994, pp. 551-561.
- TRENT, E.M. (1984).** *Metal Cutting*, Second Edition, Butterworths, England, ISBN 0-408-10856-8, 245 pags.
- TURLEY, D.M. (1975).** *Surface Finishes Produced by Tungsten Carbide Taper Pin Reamers*, Transactions of the ASME, Ser. H., Vol. 97, N° 1, pp. 21-24.
- VON POBLOTZKI, J. (1967).** *Untersuchungen über den Einflub der Schneidengeometrie und der Schnittbedingungen auf das Arbeitsergebnis beim Zerspanvorgang des Reibens von Bohrungen*, Dissertation, TU Berlim, apud WEINERT, K.; ADAMS, F.; BIERMANN, D.; e THAMKE, D. (1998), *Alargadores de Corte Único: Corte mais Eficiente, Além de Vantagens Econômicas*, Máquinas e Metais, Aranda Editora, Ano XXXIV, n° 384, pp. 38-57.
- WEINERT, K.; ADAMS, F.; BIERMANN, D.; e THAMKE, D. (1998).** *Alargadores de Corte Único: Corte mais Eficiente, Além de Vantagens Econômicas*, Máquinas e Metais, Aranda Editora, Ano XXXIV, n° 384, pp. 38-57.
- WEINGAERTNER, W.L. e SCHROETER, R.B. (1991).** *Tecnologia de Usinagem do Alumínio e suas Ligas*, Segunda Edição, Alcan Alumínio do Brasil, São Paulo.
- WILLIAMS, J.E. e ROLLANSON, E.C. (1970).** *Metallurgical and Pratical Machining Parameters Affecting Built-up Edge Formation in Metal Cutting*, Journal Inst. Metals, Vol. 98, pp. 144-153, apud MACHADO, A.R. e SILVA, M.B. (1997), *Usinagem dos Metais*, apostila, 3ª versão, Editora da Universidade Federal de Uberlândia - EDUFU, 172 pags.

8. ANEXOS

8.1. CONDIÇÕES DE USINAGEM DE CADA SUB-ETAPA

ETAPA 1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
\varnothing_{broca} (mm)	10,4	10,6	10,8	11,0	11,2	11,4	11,6	11,8
a_p (mm)	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
V_c (m/min)	45							
f (mm/rot)	0,2							
γ_f (°)	0							
z	5							
guia (mm)	0,4							
acab.pl. saída	D15							
alargador n°	01							
fluido	1							

ETAPA 2	2.1	2.2	2.3	2.4
\varnothing_{broca} (mm)	11,6			
a_p (mm)	0,2			
V_c (m/min)	25	45	60	80
f (mm/rot)	0,2			
γ_f (°)	0			
z	5			
guia (mm)	0,4			
acab.pl. saída	D15			
alargador n°	01			
fluido	1			

ETAPA 3	3.1	3.2	3.3	3.4
\varnothing_{broca} (mm)	11,6			
a_p (mm)	0,2			
V_c (m/min)	25			
f (mm/rot)	0,1	0,2	0,4	0,8
γ_f (°)	0			
z	5			
guia (mm)	0,4			
acab.pl. saída	D15			
alargador n°	01			
fluido	1			

ETAPA 4	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5
\varnothing_{broca} (mm)	11,6				
a_p (mm)	0,2				
V_c (m/min)	25				
f (mm/rot)	0,8				
γ_f (°)	-10	-7	0	+7	+10
z	5				
guia (mm)	0,4				
acab.pl. saída	D15				
alargador n°	03	02	01	04	05
fluido	1				

ETAPA 5	5.1	5.2	5.3
\varnothing_{broca} (mm)	11,6		
a_p (mm)	0,2		
V_c (m/min)	25		
f (mm/giro)	0,8		
γ_f (°)	0		
z	3	4	5
guia (mm)	0,4		
acab.pl. saída	D15		
alargador n°	06	07	01
fluido	1		

ETAPA 6	6.1	6.2	6.3
\varnothing_{broca} (mm)	11,6		
a_p (mm)	0,2		
V_c (m/min)	25		
f (mm/giro)	0,8		
γ_f (°)	0		
z	5		
guia (mm)	0,2	0,4	0,7
acab.pl. saída	D15		
alargador n°	08	01	09
fluido	1		

ETAPA 7	7.1	7.2	7.3
\varnothing_{broca} (mm)		11,6	
a_p (mm)		0,2	
V_c (m/min)		25	
f (mm/giro)		0,8	
γ_f (°)		0	
z		5	
guia (mm)		0,2	
acab.pl. saída	D7	D15	D45
alargador n°	10	08	11
fluido		1	

ETAPA 8	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7
\varnothing_{broca} (mm)				11,6			
a_p (mm)				0,2			
V_c (m/min)				25			
f (mm/giro)				0,8			
γ_f (°)				0			
z				5			
guia (mm)				0,2			
acab.pl. saída				D15			
alargador n°				08			
fluido	1	2	3	4	5	6	7

8.2. CARACTERÍSTICAS DOS ALARGADORES UTILIZADOS CONFORME RELATÓRIO DE INSPEÇÃO DO FABRICANTE

ITEM \ ALARGADOR	01	02	03	04	05
diâmetro (mm)	11,999	11,995	11,995	11,997	11,995
ângulo de posição (°)	60	60	60	60	60
comprimento (mm)	140	140	140	140	140
ângulo de folga (°)	22	22	22	22	22
ângulo de saída (°)	9	10	10	10	10
guia cilíndrico (mm)	0,4	0,38-0,4	0,38-0,4	0,38-0,4	0,38-0,4
acabamento do plano saída	D15	D15	D15	D15	D15
ângulo de hélice (°)	0	- 7	- 10	+ 7	+ 10
número de lâminas	5	5	5	5	5
batimento do diâmetro	0,003	0,004	0,003	0,005	0,006
material do corpo	VND	VND	VND	VND	VND
classe do metal duro	K10	K10	K10	K10	K10

ITEM \ ALARGADOR	06	07	08	09	10	11
diâmetro (mm)	12,000	11,999	11,995	11,991	11,990	11,993
ângulo de posição (°)	60	60	60	60	60	60
comprimento (mm)	140	140	140	140	140,2	140,3
ângulo de folga (°)	22	22	22	22	22	22
ângulo de saída (°)	10	10	10	10	10	10
guia cilíndrico (mm)	0,3-0,4	0,35-0,4	0,2	0,65-0,7	0,15-0,2	0,2
acabamento do plano saída	D15	D15	D15	D15	D45	D7
ângulo de hélice (°)	0	0	0	0	0	0
número de lâminas	3	4	5	5	5	5
batim. do diâmetro (mm)	0,002	0,005	0,002	0,003	0,002	0,001
material do corpo	VND	VND	VND	VND	VND	VND
classe do metal duro	K10	K10	K10	K10	K10	K10

8.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DOS FLUIDOS DE CORTE

UTILIZADOS

ENSAIOS	1	2	3	4	5	6	7
pH a 3% (DIN 51369)	10 a 11,5	9,0	8,5 a 9,5	9,0 a 10,5	9,12	-	9,0
pH a 5%	-	-	-	-	-	9,22	-
viscosidade a 20°C (cSt) (ASTM 445)	-	135	-	-	-	-	-
viscosidade a 40°C (cSt)	20 a 60	-	-	20 a 40	-	-	-
densidade a 20/4°C (g/cm ³)	-	-	0,99 a 1,05	-	1,0348	1,0039	0,970
densidade a 20°C (g/cm ³) (ASTM 4176/1)	-	0,954	-	-	-	-	-
densidade a 25°C (g/cm ³)	0,98 a 1,0	-	-	0,90 a 0,94	-	-	-
corrosão Herbert a 1%	0/0	-	-	0/0	-	-	-
corrosão Herbert a 3%	-	-	0/0	-	-	-	-
corrosão emulsão a 3% (DIN 51360/2)	-	0	-	-	-	-	0/0
fator de corros. p/medida de concentração	-	-	-	-	1,20 graus brix	2,5 graus brix	-
est. da emulsão 24 hs à 5% em H ₂ O 20° d + 0,3% NaCl	-	nenhuma separação	-	-	-	-	-
reserva alcalina a 3% (ml HCl 0,1N)	mínimo 90	-	mínimo 35	mínimo 20 (mg KOH/g)	-	-	-
espuma (ml/ml)	1000 / 1000	-	-	700/700	-	-	-
bactericida	ausente	-	-	-	-	-	-
aparência	-	leitosa	-	-	verde levemente e turvo	amarel o claro	branca leitosa (a 5%)

8.4. RESULTADOS DE DIÂMETRO, RUGOSIDADE, POTÊNCIA, CIRCULARIDADE E CILINDRICIDADE DE TODAS AS SUB-ETAPAS

OBS.1: Todo valor acompanhado por * foi rejeitado pelo critério de rejeição Chauvenet (Holman, 1978).

DIÂMETRO (mm)						
FUROS	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
1	12,082	12,112	12,087	12,087	12,064	12,064
2	12,095	12,141 *	12,070	12,093	12,058	12,057
3	12,099	12,108	12,080	12,087	12,095	12,089
4	12,089	12,095	12,102	12,073	12,084	12,097
5	12,101	12,096	12,082	12,081	12,097	12,069
6	12,110	12,099	12,090	12,087	12,064	12,058
7	12,117	12,084	12,099	12,079	12,084	12,070
8	12,109	12,091	12,085	12,085	12,083	12,055
9	12,076	12,089	12,096	12,093	12,071	12,061
10	12,078	12,100	12,086	12,087	12,094	12,076
11	12,079	12,094	12,085	12,094	12,082	12,065
12	12,079	12,097	12,080	12,097	12,085	12,064
13	12,079	12,096	12,099	12,075	12,087	12,078
14	12,082	12,101	12,083	12,134 *	12,091	12,089
15	12,098	12,091	12,099	12,094	12,076	12,062
16	12,086	12,090	12,081	12,068	12,077	12,075
17	12,078	12,082	12,071	12,081	12,079	12,050
18	12,074	12,085	12,075	12,144 *	12,065	12,103
19	12,065	12,094	12,076	12,088	12,092	12,096
20	12,083	12,093	12,080	12,104	12,059	12,083
21	12,075	12,105	12,074	12,084	12,084	12,080
22	12,077	12,105	12,086	12,105	12,087	12,050
23	12,086	12,094	12,080	12,076	12,119 *	12,086
24	12,052 *	12,089	12,083	12,069	12,084	12,073
25	12,083	12,081	12,076	12,085	12,081	12,069
26	12,089	12,094	12,099	12,082	12,119 *	12,043
27	12,080	12,096	12,082	12,092	12,067	12,062
28	12,084	12,084	12,079	12,106	12,076	12,060
29	12,095	12,091	12,093	12,073	12,080	12,048
30	12,105	12,097	12,097	12,102	12,092	12,064
31	12,084	12,092	12,082	12,092	12,075	12,094
32	12,083	12,087	12,085	12,082	12,073	12,059
MÉDIA	12,0871	12,0939	12,0851	12,0867	12,0795	12,0703
DESVIO	0,0119	0,0073	0,0087	0,0101	0,0106	0,0154

OBS.2: Para que não haja repetição dos dados de sub-etapas de consições idênticas, as mesmas não foram apresentadas. A sub-etapas idênticas são as seguintes: 2.2 = 1.7; 3.2 = 2.1; 4.3, 5.3 e 6.2 = 3.4; 7.2 e 8.1 = 6.1.

DIÂMETRO (mm)						
FUROS	1.7	1.8	2.1	2.3	2.4	3.1
1	12,052	12,055	12,039	12,093	12,290	12,040
2	12,049	12,079	12,037	12,078	12,286	12,044
3	12,048	12,084	12,034	12,079	12,282	12,040
4	12,045	12,040	12,034	12,095	12,282	12,046
5	12,046	12,053	12,034	12,148	12,292	12,050
6	12,054	12,063	12,035	12,060	12,302	12,031
7	12,048	12,046	12,035	12,047	12,295	12,027
8	12,045	12,034	12,059 *	12,080	12,300	12,028
9	12,048	12,035	12,032	12,079	12,295	12,033
10	12,053	12,048	12,037	12,112	12,294	12,023
11	12,047	12,045	12,034	12,114	12,308	12,023
12	12,050	12,096	12,035	12,053	12,288	12,025
13	12,043	12,089	12,035	12,072	12,275	12,026
14	12,047	12,037	12,037	12,060	12,268	12,026
15	12,051	12,097	12,030	12,064	12,275	12,023
16	12,052	12,049	12,034	12,136	12,282	12,034
17	12,049	12,076	12,040	12,114	12,285	12,026
18	12,047	12,143	12,035	12,120	12,134 *	12,028
19	12,046	12,087	12,030	12,045	12,287	12,031
20	12,049	12,098	12,035	12,047	12,278	12,034
21	12,046	12,041	12,031	12,110	12,288	12,027
22	12,049	12,043	12,039	12,063	12,297	12,021
23	12,046	12,036	12,032	12,160	12,285	12,094 *
24	12,043	12,084	12,025	12,050	12,299	12,026
25	12,135 *	12,044	12,032	12,123	12,263	12,031
26	12,053	12,060	12,037	12,071	12,284	12,070 *
27	12,046	12,042	12,030	12,127	12,280	12,030
28	12,051	12,054	12,028	12,119	12,279	12,027
29	12,052	12,054	12,032	12,135	12,284	12,029
30	12,056	12,171	12,031	12,117	12,285	12,041
31	12,069	12,154	12,032	12,135	12,291	12,031
32	12,046	12,196 *	12,031	12,105	12,275	12,028
MÉDIA	12,0492	12,0689	12,0336	12,0941	12,2863	12,0310
DESVIO	0,0048	0,0350	0,0033	0,0327	0,0098	0,0072

DIÂMETRO (mm)						
FUROS	3.3	3.4	4.1	4.2	4.4	4.5
1	12,032	12,020	12,044	12,029	12,040	12,034
2	12,030	12,025	12,033	12,025	12,040	12,040
3	12,029	12,019	12,034	12,022	12,032	12,026
4	12,027	12,040	12,051	12,025	12,029	12,026
5	12,029	12,015	12,044	12,037	12,045	12,026
6	12,028	12,015	12,040	12,033	12,024	12,035
7	12,031	12,016	12,029	12,031	12,040	12,026
8	12,028	12,020	12,031	12,036	12,029	12,020
9	12,028	12,016	12,041	12,030	12,028	12,037
10	12,031	12,014	12,072	12,030	12,025	12,022
11	12,027	12,012	12,039	12,037	12,086 *	12,022
12	12,031	12,017	12,039	12,030	12,033	12,026
13	12,030	12,017	12,040	12,038	12,029	12,025
14	12,030	12,019	12,040	12,033	12,020	12,034
15	12,030	12,046 *	12,037	12,039	12,033	12,037
16	12,032	12,051 *	12,040	12,025	12,026	12,025
17	12,031	12,019	12,038	12,051 *	12,035	12,033
18	12,034	12,023	12,042	12,042	12,022	12,030
19	12,033	12,024	12,037	12,035	12,020	12,038
20	12,030	12,017	12,036	12,027	12,024	12,021
21	12,030	12,019	12,037	12,040	12,039	12,019
22	12,029	12,017	12,045	12,038	12,050	12,029
23	12,028	12,022	12,120 *	12,024	12,034	12,029
24	12,029	12,017	12,049	12,032	12,020	12,019
25	12,033	12,025	12,042	12,034	12,024	12,034
26	12,031	12,014	12,040	12,042	12,030	12,043
27	12,030	12,015	12,029	12,021	12,031	12,035
28	12,029	12,012	12,036	12,024	12,048	12,024
29	12,030	12,029	12,039	12,038	12,032	12,039
30	12,044 *	12,022	12,039	12,021	12,023	12,020
31	12,047 *	12,020	12,037	12,028	12,021	12,029
32	12,030	12,018	12,043	12,034	12,030	12,028
MÉDIA	12,0300	12,0193	12,0401	12,0316	12,0308	12,0291
DESVIO	0,0017	0,0055	0,0076	0,0062	0,0081	0,0067

DIÂMETRO (mm)						
FUROS	5.1	5.2	6.1	6.3	7.1	7.3
1	12,029	12,024	12,006	12,011	12,035	12,015
2	12,029	12,024	12,005	12,022	12,010	12,005
3	12,030	12,019	12,010	12,016	12,006	12,012
4	12,034	12,019	12,006	12,014	12,009	12,009
5	12,039	12,016	12,005	12,023	12,014	12,015
6	12,025	12,014	12,010	12,020	12,007	12,005
7	12,029	12,085	12,010	12,009	12,011	12,010
8	12,029	12,056	12,009	12,015	12,010	12,008
9	12,030	12,014	12,005	12,017	12,009	12,014
10	12,375 *	12,018	12,007	12,012	12,010	12,010
11	12,053	12,019	12,005	12,016	12,011	12,008
12	12,027	12,020	12,014 *	12,024	12,007	12,004
13	12,026	12,019	12,007	12,019	12,010	12,011
14	12,039	12,018	12,009	12,017	12,018	12,013
15	12,029	12,020	12,007	12,015	12,004	12,020
16	12,024	12,024	12,008	12,012	12,010	12,014
17	12,028	12,017	12,010	12,017	12,010	12,010
18	12,034	12,016	12,006	12,014	12,014	12,010
19	12,031	12,019	12,004	12,017	12,017	12,010
20	12,027	12,019	12,006	12,020	12,004	12,020
21	12,030	12,019	12,008	12,017	12,015	12,005
22	12,264 *	12,096	12,005	12,017	12,013	12,007
23	12,123	12,069	12,012	12,019	12,013	12,010
24	12,033	12,027	12,008	12,014	12,050 *	12,040
25	12,037	12,044	12,008	12,014	12,012	12,019
26	12,031	12,383 *	12,010	12,017	12,018	12,007
27	12,032	12,030	12,004	12,014	12,014	12,005
28	12,028	12,027	12,009	12,019	12,008	12,020
29	12,035	12,016	12,007	12,010	12,009	12,007
30	12,035	12,013	12,007	12,021	12,012	12,023
31	12,026	12,014	12,012	12,022	12,004	12,013
32	12,035	12,015	12,007	12,020	12,057 *	12,060 *
MÉDIA	12,0346	12,0274	12,0075	12,0167	12,0115	12,0122
DESVIO	0,0173	0,0205	0,0022	0,0037	0,0057	0,0071

DIÂMETRO (mm)						
FUROS	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7
1	12,007	12,007	12,014	12,023	12,018	12,008
2	12,006	12,014	12,007	12,020	12,011	12,006
3	12,011	12,009	12,071	12,003	12,016	12,012
4	12,005	12,005	12,004	12,004	12,015	12,004
5	12,003	12,004	12,033	12,016	12,014	12,011
6	12,025	12,011	12,006	12,005	12,015	12,004
7	12,024	12,007	12,011	12,025	12,009	12,011
8	12,022	12,010	12,008	12,007	12,008	12,003
9	12,052	12,004	12,002	12,007	12,015	12,037
10	12,013	12,051	12,117 *	12,112	12,018	12,004
11	12,047	12,100	12,012	12,038	12,012	12,008
12	12,007	12,014	12,011	12,004	12,028 *	12,006
13	12,050	12,093	12,048	12,007	12,015	12,006
14	12,007	12,145	12,008	12,013	12,016	12,072
15	12,005	12,007	12,020	12,309 *	12,016	12,120
16	12,009	12,170	12,009	12,007	12,013	12,003
17	12,009	12,053	12,053	12,008	12,008	12,008
18	12,005	12,265 *	12,010	12,066	12,014	12,321 *
19	12,006	12,025	12,014	12,020	12,014	12,036
20	12,008	12,080	12,013	12,006	12,008	12,005
21	12,011	12,008	12,008	12,069	12,010	12,019
22	12,210 *	12,072	12,003	12,015	12,017	12,009
23	12,061	12,007	12,032	12,009	12,010	12,009
24	12,006	12,002	12,010	12,002	12,012	12,011
25	12,223 *	12,002	12,014	12,016	12,015	12,008
26	12,090	12,043	12,009	12,013	12,015	12,007
27	12,284 *	12,008	12,010	12,020	12,022	12,010
28	12,006	12,036	12,007	12,009	12,012	12,016
29	12,002	12,106	12,008	12,010	12,019	12,007
30	12,002	12,008	12,018	12,010	12,018	12,010
31	12,027	12,022	12,012	12,008	12,016	12,002
32	12,008	12,003	12,023	12,010	12,015	12,011
MÉDIA	12,0184	12,0363	12,0164	12,0185	12,0141	12,0156
DESVIO	0,0211	0,0445	0,0154	0,0231	0,0034	0,0233

RUGOSIDADE (Ra em μm)						
FUROS	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
1	2,68	4,49	3,05	2,58	2,13	2,32
2	2,72	4,13	2,64	3,08	2,52	3,17
3	3,71	3,85	2,46	3,02	2,88	2,07
4	3,68	4,47	2,64	2,39	2,80	3,09
5	4,03	3,24	2,21	2,91	3,26	3,42
6	6,19 *	3,57	2,70	2,94	2,62	2,58
7	5,15	2,60	2,78	3,27	2,21	2,27
8	4,93	3,15	3,09	2,14	2,17	2,21
9	3,02	2,98	2,38	2,94	2,95	1,65
10	2,72	3,35	2,82	2,45	6,86 *	1,74
11	3,65	2,41	2,23	3,31	3,55	2,50
12	2,76	2,70	2,21	3,93	3,89	2,89
13	2,43	2,32	3,07	2,61	2,50	2,92
14	2,92	2,93	2,40	3,66	3,02	2,94
15	2,06	2,34	2,99	3,66	3,02	1,81
16	3,21	3,16	2,20	3,04	2,68	2,79
17	2,79	3,19	2,10	3,04	2,72	2,37
18	2,28	3,39	3,22	4,69 *	2,79	5,28 *
19	2,55	2,67	3,10	4,73 *	3,26	3,32
20	3,13	3,37	3,75	3,43	2,95	2,87
21	2,37	3,07	2,51	3,23	2,10	2,46
22	3,19	2,51	2,95	3,63	3,90	1,49
23	2,43	2,88	4,31 *	3,01	4,15	2,60
24	2,64	2,67	4,34 *	3,80	2,62	2,07
25	2,29	2,54	3,86	2,44	2,37	2,08
26	2,15	2,91	3,20	3,26	2,55	1,43
27	2,40	3,24	2,10	2,79	2,85	2,14
28	2,74	2,44	3,37	3,46	3,18	2,25
29	3,19	2,13	2,89	2,56	3,11	3,00
30	2,86	3,58	2,76	2,87	3,05	2,43
31	3,14	2,68	2,67	2,65	3,73	4,15
32	2,30	2,10	2,67	2,41	3,13	3,21
MÉDIA	2,9716	3,0331	2,7673	3,0170	2,9245	2,5239
DESVIO	0,7237	0,6072	0,4482	0,4567	0,5186	0,6066

RUGOSIDADE (Ra em μm)						
FUROS	1.7	1.8	2.1	2.3	2.4	3.1
1	3,18	4,11	2,68	6,59	7,12	3,44
2	2,84	3,77	2,63	4,85	7,50	1,71
3	3,41	3,17	2,72	3,43	7,25	2,33
4	2,49	3,05	2,85	2,84	7,11	2,31
5	2,97	4,31	3,26	4,64	7,21	2,87
6	2,85	4,42	2,81	3,18	7,11	2,62
7	5,05	4,98	3,04	2,65	7,29	2,64
8	2,90	5,37	2,81	2,77	7,23	3,27
9	4,77	4,46	3,73	3,52	6,56	2,65
10	3,27	3,85	2,94	4,19	7,44	2,46
11	2,69	4,45	2,80	4,03	8,36	3,17
12	2,78	3,34	3,40	2,72	6,59	2,47
13	2,81	4,51	3,43	4,70	7,10	4,04
14	3,25	5,92	2,93	2,38	8,27	2,84
15	2,61	4,98	2,64	3,58	7,25	2,49
16	2,80	4,97	3,00	4,80	7,67	2,02
17	2,92	5,18	3,22	3,21	7,31	2,35
18	2,51	5,75	2,73	6,23	4,82 *	2,64
19	3,49	5,56	2,95	2,81	6,69	2,44
20	2,56	4,07	3,02	2,39	7,58	3,49
21	2,83	3,05	2,65	3,35	8,56	2,55
22	2,68	4,69	3,72	3,20	7,76	2,68
23	2,75	4,83	2,68	4,67	7,98	3,93
24	3,45	4,22	3,56	2,66	6,69	2,25
25	6,65 *	3,74	3,34	4,28	8,19	2,42
26	3,20	3,77	3,28	3,40	8,12	2,75
27	2,99	4,84	2,94	5,24	7,63	2,86
28	2,74	4,08	3,29	4,55	7,02	5,33 *
29	2,67	3,95	3,21	3,67	8,27	2,71
30	3,06	4,56	3,11	6,17	7,68	3,70
31	2,69	5,82	2,94	4,99	7,17	2,57
32	1,58	4,71	2,66	5,20	7,17	3,54
MÉDIA	2,9932	4,4525	3,0303	3,9653	7,4477	2,7810
DESVIO	0,6162	0,7687	0,3136	1,1422	0,5284	0,5394

RUGOSIDADE (Ra em μm)						
FUROS	3.3	3.4	4.1	4.2	4.4	4.5
1	3,93	3,03	2,03	4,78	2,32	2,10
2	3,18	1,98	1,84	3,32	2,53	2,05
3	3,02	2,05	1,71	2,50	2,54	2,97
4	3,87	3,13	2,00	2,00	2,22	2,49
5	2,99	2,81	2,83	1,58	1,83	2,33
6	3,56	2,86	3,97	1,75	2,30	1,65
7	3,98	3,27	3,38	2,55	1,72	1,45
8	3,31	5,44	2,27	1,99	3,80	2,81
9	2,83	2,79	1,36	1,76	2,49	1,79
10	4,30 *	2,99	4,82	2,30	2,67	2,17
11	2,76	3,50	3,24	1,58	4,71	2,24
12	3,16	3,48	1,81	1,87	2,78	1,67
13	3,16	2,47	1,81	2,25	3,43	2,75
14	3,49	3,83	2,23	2,11	2,89	1,19
15	2,90	4,51	1,70	4,25	2,25	3,16
16	3,39	2,52	4,57	3,87	2,43	2,99
17	3,19	3,15	1,37	1,90	1,46	1,72
18	3,32	6,75 *	2,65	3,92	4,26	3,44
19	3,41	3,14	1,93	2,18	2,38	2,49
20	3,04	2,28	2,97	4,19	3,11	2,12
21	3,11	2,17	2,91	2,24	1,94	1,91
22	3,35	2,77	6,06 *	1,90	4,73 *	2,10
23	3,32	4,60	3,91	3,02	2,13	0,95
24	4,19	3,78	2,55	1,81	3,19	2,20
25	2,98	2,72	1,79	1,80	3,41	1,70
26	2,88	2,55	2,01	4,89	1,87	2,11
27	3,60	3,27	3,15	2,48	2,30	3,30
28	3,16	2,29	1,81	3,54	2,23	0,75
29	3,07	2,52	2,20	2,97	1,93	1,70
30	2,88	3,31	2,11	2,70	3,84	1,71
31	3,61	3,90	3,14	3,70	2,52	2,50
32	3,05	4,25	2,23	1,91	1,49	1,52
MÉDIA	3,2803	3,1406	2,5258	2,6753	2,6119	2,1259
DESVIO	0,3540	0,7923	0,8828	0,9624	0,7737	0,6431

RUGOSIDADE (Ra em μm)						
FUROS	5.1	5.2	6.1	6.3	7.1	7.3
1	5,03	4,56	2,46	2,73	3,12	3,17
2	4,37	2,68	2,51	3,20	0,66	0,80
3	5,64	5,80	1,98	4,06	1,18	1,92
4	4,78	2,55	2,87	4,02	2,34	1,52
5	5,52	3,21	2,46	3,12	2,43	2,28
6	5,05	4,15	2,93	4,49	3,37	0,92
7	4,90	4,74	2,38	2,66	1,51	3,14
8	4,36	5,02	2,16	3,33	0,81	1,95
9	4,83	2,82	2,28	3,61	1,85	2,55
10	5,95	3,75	2,22	4,01	2,01	3,08
11	5,32	2,92	2,03	3,04	0,92	1,01
12	4,46	3,05	3,67 *	5,67 *	0,76	1,07
13	4,04	3,12	2,37	4,03	0,78	1,00
14	6,06	2,55	2,70	3,52	2,86	2,37
15	3,91	3,49	2,14	2,96	1,29	2,59
16	4,53	3,04	2,65	3,60	1,66	2,11
17	4,30	2,75	2,36	3,87	1,13	0,86
18	4,68	2,86	2,21	3,19	0,97	2,58
19	4,66	3,08	2,75	3,89	4,64 *	1,10
20	5,53	3,31	2,37	4,62	1,25	3,32
21	4,31	4,33	2,55	3,44	1,51	1,05
22	7,77 *	4,39	3,18	2,97	1,50	2,06
23	6,03	4,46	2,85	4,38	2,95	0,77
24	5,34	3,37	2,81	2,77	3,31	3,78
25	4,83	3,70	2,49	3,18	0,93	3,66
26	4,73	7,18 *	3,88 *	2,71	2,43	0,83
27	4,95	2,80	2,07	4,28	1,65	1,51
28	4,48	2,44	2,95	3,64	1,98	3,09
29	3,74	2,49	3,01	3,86	1,34	1,75
30	4,54	2,95	2,34	3,64	0,90	2,68
31	4,22	4,72	2,60	3,61	1,86	2,21
32	4,28	3,42	2,18	4,65	4,03	2,75
MÉDIA	4,8184	3,5006	2,4953	3,5832	1,7835	2,0462
DESVIO	0,6024	0,8565	0,3127	0,5693	0,8873	0,9151

RUGOSIDADE (Ra em μm)						
FUROS	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7
1	2,03	2,10	1,93	2,67	3,82	2,57
2	2,30	4,87	1,50	2,53	1,95	2,76
3	2,12	3,22	2,91	3,16	2,65	1,86
4	2,03	1,99	3,47	2,95	1,28	2,15
5	1,91	2,29	1,97	2,75	1,65	3,95
6	4,85	2,45	2,60	3,01	3,32	3,49
7	3,90	2,61	4,34	4,83	2,71	3,06
8	2,77	2,18	2,76	2,30	1,56	2,11
9	4,77	2,13	2,33	3,24	2,26	2,72
10	3,27	1,98	4,20	4,18	1,79	1,92
11	8,45 *	4,10	2,60	3,46	1,57	2,50
12	1,93	4,03	2,22	2,79	4,14 *	1,89
13	4,81	3,63	2,76	3,00	1,96	1,90
14	2,57	3,91	2,31	2,49	2,26	4,90
15	4,05	4,15	1,71	5,30 *	3,09	4,99
16	2,70	6,07	2,78	2,53	1,58	3,60
17	1,92	5,64	3,53	1,91	1,76	2,14
18	3,31	9,28 *	2,14	4,96	1,85	6,81 *
19	2,20	5,68	1,95	1,98	2,40	3,04
20	1,90	6,37	1,31	2,66	1,58	2,23
21	2,63	2,36	2,23	3,53	2,83	2,27
22	6,07	3,63	1,73	2,74	2,39	1,98
23	3,54	5,03	3,71	2,81	2,04	2,23
24	4,91	2,01	2,28	3,44	1,64	2,44
25	4,92	2,57	2,22	3,62	3,04	2,01
26	6,62	5,22	2,34	3,26	1,64	2,56
27	4,08	5,11	1,93	2,45	2,05	2,26
28	2,21	2,76	2,23	1,93	2,09	2,69
29	2,47	5,58	2,28	3,46	2,98	2,03
30	4,00	3,07	1,46	2,97	1,40	2,46
31	2,87	3,14	1,52	2,45	2,01	3,04
32	2,11	4,30	4,71 *	2,88	1,55	2,29
MEDIA	3,2829	3,6832	2,4274	2,9981	2,1516	2,6465
DESVIO	1,3005	1,3677	0,7515	0,7103	0,6214	0,7944

POTÊNCIA (W)					
FUROS	2.1	2.3	2.4	3.1	3.3
1	30,194	103,414	292,340	5,063*	43,723
2	34,474	29,264	199,744	0,479*	39,251
3	35,383	82,027	326,475	26,639	31,015
4	26,391	178,031	297,179	25,249	21,706*
5	37,356	157,830	335,843	20,774	35,828
6	37,687	125,934	255,309	25,217	50,124
7	40,185	137,566	303,061	23,412	49,922
8	25,950	174,278	282,765	10,956	43,379
9	42,744	217,688	239,959	22,648	50,751
10	34,903	334,362	265,203	26,432	51,566
11	32,495	180,121	285,243	17,132	31,022
12	35,930	105,255	341,316	33,147	47,963
13	30,274	121,128	252,856	31,321	51,490
14	35,042	28,500	235,800	28,356	55,080
15	33,778	65,473	273,366	29,004	41,357
16	31,789	52,274	275,670	27,341	49,109
17	33,499	37,937	286,049	20,887	42,694
18	25,737	61,419	446,123*	24,884	50,896
19	43,528	91,147	331,608	32,809	49,967
20	31,977	107,247	321,069	32,655	45,179
21	33,847	240,003	401,801	27,653	39,831
22	26,055	132,414	299,325	18,245	45,893
23	26,826	315,220	321,434	20,916	30,633
24	26,939	200,516	399,952	27,605	51,206
25	28,733	235,706	356,436	23,963	40,544
26	31,299	158,565	300,696	28,642	58,655
27	23,291	305,903	386,996	22,288	57,621
28	32,016	203,063	356,628	30,983	42,892
29	18,618	85,482	312,550	31,162	55,549
30	24,036	86,974	361,528	27,617	58,093
31	26,075	142,729	279,880	25,085	54,141
32	22,733	31,991	205,633	37,583	52,426
MÉDIA	31,2432	141,5456	302,7005	26,0201	46,7032
DESVIO	5,7814	82,0884	50,2356	5,3886	7,7470

POTÊNCIA (W)					
FUROS	3.4	4.1	4.2	4.4	4.5
1	24,971*	100,839	82,923	25,309	70,174
2	63,924	117,580	44,725	2,883*	54,750
3	87,665	62,963	61,838	35,827	69,025
4	66,425	76,975	142,031	81,271	83,619
5	54,625	105,171	118,823	73,117	94,839
6	85,360	65,958	76,375	71,288	78,793
7	95,260	65,345	78,481	64,635	109,175
8	81,682	62,868	117,068	64,100	52,555
9	91,494	53,292	64,416	84,496	65,645
10	86,254	85,386	112,166	108,335	83,217
11	95,933	70,397	107,890	94,442	95,142
12	84,644	42,214	113,626	76,808	163,447
13	86,009	122,731	92,064	86,556	56,697
14	76,342	86,978	104,011	70,319	114,918
15	65,645	95,328	92,516	74,903	54,964
16	68,929	99,728	104,375	58,114	102,847
17	77,210	105,172	109,393	68,470	90,579
18	64,600	86,281	93,381	64,931	83,262
19	67,408	70,004	101,839	47,566	87,405
20	88,406	114,771	68,506	55,777	88,224
21	99,310	77,411	94,810	90,958	75,556
22	61,588	76,462	59,802	67,217	109,458
23	72,425	68,196	45,746	60,363	215,811*
24	71,609	76,491	96,359	61,987	74,065
25	32,022	127,920	80,963	81,187	101,175
26	55,985	91,806	73,719	60,317	83,855
27	43,406	93,991	71,633	103,965	73,529
28	53,372	86,224	121,041	66,180	213,003*
29	102,519	51,751	86,915	90,826	75,591
30	71,881	98,010	99,228	108,246	105,106
31	64,552	98,216	116,747	61,768	118,269
32	62,940	64,972	99,686	88,527	97,097
MÉDIA	73,5297	84,4198	91,6592	72,5098	87,0993
DESVIO	16,3431	21,0090	22,5739	18,8090	22,7899

POTÊNCIA (W)						
FUROS	5.1	5.2	6.1	6.3	7.1	7.3
1	6,675 *	23,536 *	76,987	36,756	76,340	70,099
2	29,850	61,871	73,243	61,850	71,941	67,977
3	64,388	62,982	93,758	75,191	86,463	94,488
4	33,647	91,437	103,150	23,305	86,903	109,199
5	97,153	90,093	102,309	113,062	90,713	64,360
6	81,332	70,268	131,030	137,173	99,838	106,374
7	67,084	78,272	130,036	111,441	72,232	79,585
8	66,172	66,621	61,735	54,408	98,336	80,965
9	66,381	47,018	96,048	61,324	113,182 *	76,530
10	74,319	76,300	80,856	104,284	88,011	86,733
11	50,428	52,700	61,086	131,011	81,113	75,732
12	70,101	73,505	95,897	77,570	71,575	75,945
13	81,520	85,890	83,443	93,136	82,369	57,829
14	90,833	74,545	101,530	98,112	72,545	43,659
15	86,207	69,046	79,876	58,104	63,527	74,603
16	56,127	62,078	192,531*	48,773	77,687	44,790
17	67,844	83,865	45,988	85,698	70,738	86,702
18	65,170	59,719	56,481	81,803	75,620	98,965
19	74,201	100,379	51,362	107,996	49,185	80,125
20	66,596	75,047	117,965	100,303	95,936	51,587
21	77,787	69,575	90,758	263,770*	90,549	66,001
22	75,249	79,091	78,619	69,060	79,121	97,293
23	74,827	86,222	76,352	66,988	75,871	103,290
24	89,196	71,922	60,767	59,787	51,335	71,046
25	42,336	54,536	47,026	87,736	71,418	62,076
26	91,418	66,509	29,783	105,196	97,017	74,324
27	74,232	59,323	26,128	69,024	87,619	41,276
28	85,757	64,789	93,872	84,124	76,180	87,520
29	68,185	79,570	67,717	84,529	89,528	69,619
30	76,482	63,704	58,589	72,201	84,871	64,951
31	88,275	61,162	88,797	81,197	80,496	71,606
32	66,918	101,664	69,259	70,476	60,464	76,105
MEDIA	70,9682	72,2485	78,4015	81,0199	79,2109	75,3547
DESVIO	15,7375	13,0983	25,3758	25,3024	12,3383	17,1283

POTÊNCIA (W)						
FUROS	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7
1	64,855	6,066 *	93,114	63,375	65,232	55,360
2	61,518	46,948	72,001	64,107	64,947	29,013
3	58,191	51,269	60,987	94,642	71,052	80,531
4	80,125	80,695	50,653	71,804	80,430	57,845
5	70,277	67,756	77,707	74,534	79,115	39,670
6	67,472	79,058	87,816	96,967	60,290	83,271
7	82,271	72,880	72,715	71,127	74,992	53,101
8	100,955	77,098	87,039	64,933	70,626	58,686
9	66,653	71,862	72,766	58,310	78,399	60,963
10	65,633	77,337	76,865	75,158	68,831	45,800
11	66,465	97,035	64,101	62,662	80,586	64,216
12	58,044	58,473	67,465	66,215	72,054	58,915
13	45,663	62,486	45,767	45,486	90,703	58,717
14	28,669	87,281	88,186	68,387	79,678	70,513
15	41,299	72,642	87,739	85,804	49,887	42,616
16	71,823	83,565	72,463	58,388	70,871	53,077
17	50,868	59,875	42,421	43,326	73,279	89,851
18	66,858	72,122	61,469	67,950	73,819	44,270
19	73,836	67,449	60,381	75,320	77,479	72,962
20	47,972	65,821	74,177	63,954	99,399	55,597
21	91,182	98,340	65,047	75,147	77,897	80,102
22	56,007	72,657	102,131	61,786	64,821	72,444
23	70,245	52,460	72,770	66,209	83,051	89,155
24	69,057	87,506	76,869	79,026	71,803	61,946
25	43,195	62,305	87,050	66,616	60,251	65,596
26	93,931	57,457	52,701	64,257	69,706	77,600
27	62,662	90,954	98,971	66,393	76,915	69,045
28	39,291	69,651	73,584	64,751	46,073	48,741
29	80,611	47,143	73,738	39,321	89,617	62,821
30	65,807	107,480	66,645	52,631	36,082 *	45,872
31	57,578	83,165	79,533	76,568	68,059	82,457
32	68,320	53,050	62,898	84,035	57,251	86,998
MÉDIA	64,6041	72,0587	72,7428	67,7871	72,4874	63,0546
DESVIO	15,7460	15,1093	14,1709	12,5811	11,0128	15,3362

1.1	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	FUROS	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.
8	0,047	0,053	0,078	0,057	0,057
9	0,075	0,115 *	0,085	0,032	0,042
24	0,034	0,028	0,024	0,047	0,047
25	0,016	0,026	0,036	0,037	0,040
		MÉDIA	0,0456	MÉDIA	0,0449
		DESVIO	0,0229	DESVIO	0,0084

1.2	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	FUROS	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.
1	0,065	0,070	0,048	0,057	0,045
16	0,056	0,036	0,028	0,030 *	0,037
17	0,040	0,042	0,030	0,045	0,050
32	0,008	0,012	0,028	0,045	0,045
		MÉDIA	0,0386	MÉDIA	0,0463
		DESVIO	0,0183	DESVIO	0,0056

1.3	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	FUROS	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.
8	0,030	0,021	0,038	0,040	0,067
9	0,055	0,022	0,035	0,057	0,050
24	0,045	0,047	0,050	0,070	0,042
25	0,021	0,018	0,030	0,075	0,085
		MÉDIA	0,0343	MÉDIA	0,0608
		DESVIO	0,0122	DESVIO	0,0151

1.4	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	FUROS	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.
1	0,043	0,035	0,055	0,062	0,050
16	0,065	0,038	0,040	0,050	0,042
17	0,035	0,025	0,035	0,050	0,050
32	0,018	0,015	0,047	0,092 *	0,067
		MÉDIA	0,0376	MÉDIA	0,0530
		DESVIO	0,0137	DESVIO	0,0079

1.5	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	FUROS	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.
8	0,016	0,016	0,022	0,047	0,057
9	0,018	0,011	0,042	0,067	0,060
24	0,043	0,028	0,044	0,060	0,067
25	0,020	0,022	0,036	0,037	0,040
		MÉDIA	0,0265	MÉDIA	0,0544
		DESVIO	0,0113	DESVIO	0,0109

1.6	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	FUROS	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.
1	0,015	0,031	0,031	0,057	0,047
16	0,017	0,027	0,035	0,045	0,040
17	0,025	0,012	0,025	0,027	0,030
32	0,016	0,013	0,026	0,057	0,057
		MÉDIA	0,0228	MÉDIA	0,0450
		DESVIO	0,0075	DESVIO	0,0112

1.7	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	FUROS	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.
8	0,007	0,010	0,015	0,010	0,005
9	0,032	0,012	0,016	0,025	0,015
24	0,010	0,012	0,011	0,008	0,005
25	0,024	0,160 *	0,118	0,032 *	0,015
		MÉDIA	0,0243	MÉDIA	0,0119
		DESVIO	0,0304	DESVIO	0,0066

1.8	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	FUROS	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.
1	0,053	0,036	0,033	0,032	0,020
16	0,063	0,045	0,063	0,025	0,035
17	0,047	0,063	0,036	0,032	0,027
32	0,095	0,170 *	0,075	0,065	0,100 *
		MÉDIA	0,0554	MÉDIA	0,0337
		DESVIO	0,0180	DESVIO	0,0136

2.1	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	FUROS	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.
8	0,009	0,040 *	0,010	0,012	0,049 *
9	0,010	0,011	0,011	0,002	0,004
24	0,010	0,009	0,010	0,008	0,008
25	0,011	0,010	0,011	0,006	0,005
		MÉDIA	0,0102	MÉDIA	0,0064
		DESVIO	0,0007	DESVIO	0,0030

2.3	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	FUROS	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.
1	0,042	0,044	0,038	0,012	0,017
16	0,036	0,180 *	0,095	0,100	0,105
17	0,075	0,055	0,045	0,052	0,050
32	0,040	0,058	0,044	0,052	0,045
		MÉDIA	0,0520	MÉDIA	0,0541
		DESVIO	0,0173	DESVIO	0,0315

2.4	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	FUROS	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.
8	0,047	0,041	0,029	0,130 *	0,095
9	0,033	0,035	0,043	0,080	0,067
24	0,037	0,042	0,038	0,082	0,100
25	0,058 *	0,043	0,042	0,090	0,105
		MÉDIA	0,0391	MÉDIA	0,0884
		DESVIO	0,0050	DESVIO	0,0121

3.1	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	FUROS	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.
8	0,054 *	0,021	0,012	0,030	0,005
9	0,023	0,014	0,020	0,017	0,022
24	0,015	0,012	0,012	0,017	0,015
25	0,013	0,014	0,013	0,005	0,005
		MÉDIA	0,0154	MÉDIA	0,0145
		DESVIO	0,0038	DESVIO	0,0085

3.3	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	FUROS	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.
8	0,006	0,006	0,008	0,027 *	0,020
9	0,006	0,008	0,010	0,009	0,007
24	0,008	0,008	0,012 *	0,012	0,010
25	0,009	0,008	0,008	0,010	0,004
		MÉDIA	0,0077	MÉDIA	0,0103
		DESVIO	0,0012	DESVIO	0,0046

3.4	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	FUROS	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.
1	0,009	0,010	0,010	0,012	0,020
16	0,014	0,012	0,026	0,022	0,030
17	0,034 *	0,010	0,014	0,009	0,025
32	0,009	0,007	0,010	0,004	0,003
		MÉDIA	0,0119	MÉDIA	0,0156
		DESVIO	0,0049	DESVIO	0,0094

4.1	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	FUROS	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.
8	0,028	0,034	0,023	0,052	0,052
9	0,039	0,058	0,039	0,032	0,035
24	0,034	0,042	0,032	0,025	0,022
25	0,015	0,023	0,055	0,017	0,017
		MÉDIA	0,0352	MÉDIA	0,0315
		DESVIO	0,0121	DESVIO	0,0133

4.2 FUROS	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.	TRANSVERSAL
1	0,048	0,043	0,042	0,022	0,032
16	0,057	0,045	0,034	0,050	0,025
17	0,020	0,020	0,075 *	0,022	0,042
32	0,024	0,030	0,048	0,012	0,032
		MÉDIA	0,0374	MÉDIA	0,0296
		DESVIO	0,0119	DESVIO	0,0113

4.4 FUROS	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.	TRANSVERSAL
8	0,008	0,007	0,018	0,025	0,020
9	0,007	0,007	0,026 *	0,015	0,007
24	0,007	0,005	0,014	0,010	0,010
25	0,010	0,013	0,010	0,007	0,020
		MÉDIA	0,0096	MÉDIA	0,0142
		DESVIO	0,0037	DESVIO	0,0064

4.5 FUROS	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.	TRANSVERSAL
1	0,037	0,049	0,075	0,045	0,032
16	0,059	0,073	0,070	0,057	0,027
17	0,017	0,050	0,045	0,042	0,017
32	0,025	0,018	0,042	0,020	0,030
		MÉDIA	0,0467	MÉDIA	0,0338
		DESVIO	0,0194	DESVIO	0,0126

5.1 FUROS	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.	TRANSVERSAL
8	0,030	0,020	0,018	0,005	0,010
9	0,032	0,021	0,016	0,012	0,015
24	0,027	0,016	0,018	0,017	0,010
25	0,033	0,026	0,025	0,008	0,012
		MÉDIA	0,0235	MÉDIA	0,0111
		DESVIO	0,0059	DESVIO	0,0036

5.2 FUROS	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.	TRANSVERSAL
8	0,130 *	0,070	0,028	0,052 *	0,032
9	0,016	0,016	0,016	0,011	0,010
24	0,030	0,022	0,025	0,011	0,009
25	0,070	0,055	0,034	0,020	0,008
		MÉDIA	0,0347	MÉDIA	0,0144
		DESVIO	0,0197	DESVIO	0,0081

6.1	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	FUROS	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.
8	0,026	0,014	0,012	0,003	0,009
9	0,018	0,008	0,008	0,006	0,007
24	0,021	0,021	0,019	0,007	0,003
25	0,019	0,036 *	0,021	0,013	0,010
		MÉDIA	0,0170	MÉDIA	0,0072
		DESVIO	0,0055	DESVIO	0,0032

6.3	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	FUROS	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.
1	0,055	0,016	0,010	0,020	0,052
16	0,057	0,014	0,009	0,010	0,060
17	0,088	0,014	0,009	0,012	0,042
32	0,180 *	0,014	0,014	0,015	0,010
		MÉDIA	0,0273	MÉDIA	0,0276
		DESVIO	0,0255	DESVIO	0,0191

7.1	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	FUROS	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.
8	0,009	0,016	0,030	0,004	0,020
9	0,009	0,009	0,019	0,005	0,006
24	0,023	0,038	0,062*	0,040	0,038
25	0,012	0,020	0,028	0,004	0,004
		MÉDIA	0,0194	MÉDIA	0,0151
		DESVIO	0,0092	DESVIO	0,0147

7.3	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	FUROS	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.
1	0,020	0,052	0,045	0,035	0,090*
16	0,025	0,025	0,056	0,048	0,008
17	0,014	0,014	0,021	0,016	0,016
32	0,017	0,023	0,055	0,020	0,070
		MÉDIA	0,0306	MÉDIA	0,0304
		DESVIO	0,0157	DESVIO	0,0204

8.2	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	FUROS	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.
8	0,045	0,092	0,048	0,050	0,092
9	0,092	0,100	0,136	0,136	0,060
24	0,028	0,045	0,030	0,040	0,070
25	0,140	0,300*	0,260	0,200	0,440*
		MÉDIA	0,0924	MÉDIA	0,0926
		DESVIO	0,0652	DESVIO	0,0529

8.3 FUROS	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.	TRANSVERSAL
1	0,012	0,026	0,041	0,006	0,044
16	0,230*	0,180	0,130	0,160	0,220
17	0,072	0,060	0,071	0,080	0,030
32	0,030	0,037	0,148	0,160	0,020
		MÉDIA	0,0734	MÉDIA	0,0900
		DESVIO	0,0527	DESVIO	0,0746

8.4 FUROS	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.	TRANSVERSAL
8	0,021	0,034	0,030	0,034	0,014
9	0,011	0,014	0,015	0,004	0,004
24	0,012	0,032	0,020	0,032	0,008
25	0,016	0,032	0,021	0,010	0,006
		MÉDIA	0,0215	MÉDIA	0,0140
		DESVIO	0,0081	DESVIO	0,0114

8.5 FUROS	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.	TRANSVERSAL
1	0,014	0,016	0,095	0,050	0,085*
16	0,020	0,020	0,044	0,016	0,008
17	0,013	0,016	0,026	0,016	0,008
32	0,024	0,020	0,105*	0,008	0,032
		MÉDIA	0,0280	MÉDIA	0,0197
		DESVIO	0,0227	DESVIO	0,0147

8.6 FUROS	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.	TRANSVERSAL
8	0,022	0,026	0,030	0,006	0,006
9	0,014	0,017	0,027	0,008	0,004
24	0,006	0,020	0,017	0,016*	0,004
25	0,010	0,016	0,023	0,008	0,010
		MÉDIA	0,0190	MÉDIA	0,0066
		DESVIO	0,0068	DESVIO	0,0021

8.7 FUROS	CIRCULARIDADE			CILINDRICIDADE	
	INFERIOR	MÉDIO	SUPERIOR	LONGITUDIN.	TRANSVERSAL
1	0,040	0,036	0,093*	0,036	0,024
16	0,020	0,036	0,020	0,010	0,004
17	0,010	0,012	0,080	0,006	0,080*
32	0,014	0,026	0,044	0,008	0,044
		MÉDIA	0,0307	MÉDIA	0,0189
		DESVIO	0,0192	DESVIO	0,0148