

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

ALARGAMENTO DE PRECISÃO EM ALUMÍNIO AERONÁUTICO
COM FERRAMENTAS DE GUME ÚNICO REGULÁVEL

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

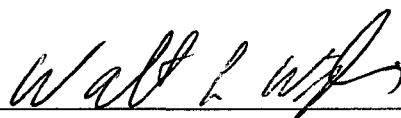
ROLF BERTRAND SCHROETER

FLORIANÓPOLIS, OUTUBRO DE 1989

ALARGAMENTO DE PRECISÃO EM ALUMÍNIO AERONÁUTICO
COM FERRAMENTAS DE GUME ÚNICO REGULÁVEL

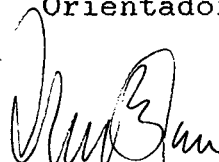
ROLF BERTRAND SCHROETER

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
FABRICAÇÃO, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA.



Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.-Ing.

Orientador




Prof. Arno Blass, Ph.D.

Coordenador da Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.-Ing.



Prof. Lourival Boehs, Dr. Eng. Mec.



Prof. Benedito Purquerio, Ph.D.

AGRADECIMENTOS

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

A Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, pela concessão de bolsa de estudos.

A firma August Beck GmbH, da República Federal da Alemanha, pelo fornecimento das ferramentas de gume único regulável e de informações.

A Empresa Brasileira de Aeronáutica - EMBRAER, pela doação de material.

Ao Comércio de Lubrificantes Rubens Moreira Ltda, pela doação de amostras de óleo de corte.

A Sanches-Blanes S.A., pelo empréstimo de ferramentas.

Aos técnicos e bolsistas do Laboratório de Máquinas-Ferramentas - USIMAQ e Laboratório de Metrologia - LABMETRO, pelo auxílio prestado.

Aos colegas de curso e professores do Departamento de Engenharia Mecânica.

Ao graduando Luciano Teixeira Moreira, pelo auxílio na montagem dos experimentos e utilização de "software", ao projetista Hugo Vivanco, pelos desenhos, e ao graduando Miguel Angelo Anzolin, pela execução de ensaios.

Em especial, ao graduando Aloísio José Schultek, pelas sugestões e inestimável auxílio na execução deste trabalho.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTADO DA ARTE	3
2.1. Alargamento	3
2.2. Alargadores	5
2.2.1. Generalidades	5
2.2.2. Terminologia de alargadores	7
2.2.3. Classificação de alargadores	8
2.2.4. Ângulos em alargadores	11
2.3. Parâmetros para operações de alargamento	12
2.3.1. Velocidade de corte	13
2.3.2. Avanço	13
2.3.3. Fluido de corte	14
2.4. Forças de corte no alargamento	15
2.4.1. Definição de forças de corte	15
2.4.2. Medição de forças	17
2.5. Escolha do tipo de alargador	18
2.6. Problemas, causas e soluções em alargamento com alargadores convencionais	25
2.7. Equações de respaldo	29
2.7.1. Velocidade de corte	29
2.7.2. Rugosidade R_t	29
2.7.3. Largura de usinagem	29
2.7.4. Espessura de usinagem	29

3. PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	30
3.1. Ferramenta utilizada - alargador regulável de gume único com inserto intercambiável	30
3.1.1. Generalidades	30
3.1.2. Problemas, causas e soluções em alargamento com alargadores ajustáveis de gume único	32
3.2. Material ensalado	35
3.2.1. Composição	35
3.2.2. Propriedades mecânicas	36
3.2.3. Aplicações	37
3.2.4. Corpos de prova	37
3.3. Máquina-ferramenta	38
3.4. Equipamento para medição de forças de usinagem	38
3.4.1. Descrição da montagem	38
3.4.2. Dinamômetro piezelétrico	40
3.4.3. Amplificador de sinais	40
3.4.4. Unidade de controle e aquisição de dados	41
3.4.5. Micro-computador	41
3.5. Equipamento para regulagem e verificação do gume do alargador	41
3.5.1. Metroscópio horizontal	41
3.5.2. Microscópio ótico de medição	42
3.6. Equipamento para verificação da qualidade dos furos	42
3.6.1. Micrômetro interno	42
3.6.2. Rugosímetro	42

3.6.3. Circularmetro	43
3.7. Calibrações	44
3.7.1. Controle das velocidades de rotação e avanço na máquina-ferramenta	44
3.7.2. Calibração do sistema de medição das forças de usinagem	44
3.8. Determinação das variáveis do processo	46
3.8.1. Velocidade de corte	46
3.8.2. Avanço	47
3.8.3. Sobremedida de usinagem	47
3.8.4. Inclinação do gume	47
3.8.5. Ângulo de saída	48
3.8.6. Fluido de corte	48
3.9. Metodologia de ensaios	49
4. DESENVOLVIMENTO DO EXPERIMENTO	51
4.1. Preparação dos ensaios	51
4.2. Regulagem do alargador de gume único	52
4.3. Realização dos ensaios	55
4.3.1. Medição de forças de usinagem	55
4.3.2. Velocidade de corte	55
4.3.3. Avanços	56
4.3.4. Sobremedida de usinagem	56
4.3.5. Inclinação do gume	57
4.3.6. Ângulo de saída	57
4.3.7. Fluido de corte	57
4.3.8. Suporte pendular	58
4.3.9. Alargamento de preparação	59
4.3.10. Tolerância dimensional	59

4.4. Verificação da qualidade dos furos	61
4.4.1. Rugosidade	61
4.4.2. Circularidade	62
4.4.3. Diâmetro	63
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	65
5.1. Rugosidade	65
5.1.1. Influência da velocidade de corte	65
5.1.2. Influência do avanço	66
5.1.3. Influência da inclinação do gume	68
5.1.4. Influência da sobremedida de usinagem	69
5.1.5. Influência do ângulo de saída	70
5.1.6. Influência do fluido de corte	72
5.1.7. Influência do suporte pendular	74
5.1.8. Influência do alargamento de preparação	75
5.2. Circularidade	76
5.3. Forças de usinagem	77
5.3.1. Influência da velocidade de corte	77
5.3.2. Influência do avanço	80
5.3.3. Influência da inclinação do gume	81
5.3.4. Influência da sobremedida de usinagem	82
5.3.5. Influência do ângulo de saída	83
5.3.6. Influência do fluido de corte	84
5.4. Sobremedida dos furos	85
5.4.1. Influência da velocidade de corte	86
5.4.2. Influência do avanço	87
5.4.3. Influência da inclinação do gume	88
5.4.4. Influência da sobremedida de usinagem	89
5.4.5. Influência do ângulo de saída	90

5.4.6. Influência do fluido de corte	91
5.5. Tolerância dimensional	92
5.6. Considerações econômicas	93
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DO TRABALHO	97
6.1. Conclusões	97
6.2. Sugestões para continuidade do trabalho	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
BIBLIOGRAFIA AUXILIAR	103
ANEXO A	105
ANEXO B	112

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

2.1. Divisão desuniforme	6
2.2. Terminologia	7
2.3. Tipos de canais	8
2.4. Alargadores de máquina e manuais	10
2.5. Formas de entrada	11
2.6. Ângulos em alargadores	11
2.7. Definição das componentes da força de usinagem	15
2.8. Seção transversal de cavaco	16
2.9. Montagem de instalação para medição de forças	18
2.10. a 2.26. Exemplos de alargamento	19 a 24

CAPÍTULO 3

3.1. Corpos de prova	37
3.2. Montagem para medição de forças de usinagem	39
3.3. Calibração de F_f	45
3.4. Calibração de M_t	46

CAPÍTULO 4

4.1. Regulagem do alargador com auxílio de metroscópio horizontal	52
4.2. Alargador de gume único	54
4.3. Medição de rugosidade	62

4.4. Medição de circularidade	63
4.5. Medição de diâmetros	64

CAPÍTULO 5

5.1. Influência de v_c sobre Ra e Rt	66
5.2. Influência de f sobre Ra e Rt	68
5.3. Influência da inclinação do gume sobre Ra e Rt	69
5.4. Influência de "a" sobre Ra e Rt	70
5.5. Influência de γ sobre Ra e Rt	71
5.6. Influência do fluido de corte sobre Ra e Rt	72
5.7. Furos com acabamento espelhado obtidos com alargadores de gume único regulável	74
5.8. Influência do alargamento de preparação sobre Ra e Rt	75
5.9. Influência de v_c sobre Mt	78
5.10. Influência de v_c sobre Ff	79
5.11. Influência de f sobre Mt	80
5.12. Influência de f sobre Ff	81
5.13. Influência da inclinação do gume sobre Mt e Ff	82
5.14. Influência de "a" sobre Mt e Ff	83
5.15. Influência de γ sobre Mt e Ff	84
5.16. Influência do fluido de corte sobre Mt e Ff	85
5.17. Influência de v_c sobre a sobremedida dos furos	87
5.18. Influência de f sobre a sobremedida dos furos	88
5.19. Influência da inclinação do gume sobre a sobremedida dos furos	89

5.20. Influência de "a" sobre a sobremedida dos furos	90
5.21. Influência de γ sobre a sobremedida dos furos	91
5.22. Estudo de tolerância dimensional	92
5.23. Comparação entre previsão de custos para alargamento convencional e alargamento com ferramentas de gume único regulável	96

SIMBOLOGIA

a	mm	Sobremedida de usinagem
b	mm	Largura de usinagem
D	mm	Diâmetro da ferramenta
DM(P)		Dispersão dos resultados enquadrando P% dos resultados
f	mm/rot	Avanço por rotação
f_z	mm	Avanço por dente
F_f	N	Força de avanço
F_{c1}	N	Força total de corte por dente
F_{ca1}	N	Força principal de atrito por dente
F_{cc1}	N	Força principal de corte por dente
F_{f1}	N	Força de avanço por dente
F_{p1}	N	Força passiva por dente
F_1	N	Força de usinagem por dente
h	mm	Espessura de usinagem
HB		Dureza Brinell
k_c	N/mm^2	Força específica de corte
k_f	N/mm^2	Força específica de avanço
K_F	NCz\$/peça	Custo de fabricação
K_{ML}	NCz\$/min	Custo de máquina e operador
K_{WT}	NCz\$	Custo da ferramenta por vida
m		Tamanho do lote
M_t	N.cm	Momento total de corte
n	rpm	Rotação
N		Tamanho da amostra
r_ϵ	mm	Raio de ponta da ferramenta

R		Amplitude
R_a	μm	Desvio médio aritmético (rugosidade R_a)
R_t	μm	Altura máxima das irregularidades (rugosidade R_t)
s		Desvio padrão
t		Fator de Student
T	min	Vida da ferramenta
t_h	min	Tempo principal
t_n	min	Tempos secundários
t_r	min	Tempo de preparação
t_w	min	Tempo de troca da ferramenta
v_c	m/min	Velocidade de corte
\bar{X}		Média dos valores
α_o	Grau	Ângulo de incidência ortogonal da ferramenta (ângulo de folga)
α'_p	Grau	Ângulo de incidência passivo do gume secundário
γ_f	Grau	Ângulo de saída lateral (ângulo de hélice)
γ_o ou γ	Grau	Ângulo de saída ortogonal da ferramenta
γ'_p	Grau	Ângulo de saída passivo do gume secundário
Δ_D	μm	Sobremedida do furo
χ_r	Grau	Ângulo de direção do gume da ferramenta (ângulo de posição)

RESUMO

O objetivo deste trabalho é a obtenção de furos com alta qualidade superficial e precisão de forma, dentro de tolerâncias estreitas, com alargadores de gume único regulável, na liga de alumínio Al 7075-T651, também denominada de alumínio aeronáutico. São estudados os efeitos das variáveis do processo - velocidade de corte, avanço, sobremedida de usinagem, inclinação do gume, ângulo de saída e fluido de corte - sobre a qualidade dos furos e sobre as forças de usinagem.

Verifica-se a ocorrência de um aumento substancial na qualidade superficial dos furos através do alargamento com ferramentas de gume único regulável, em relação ao alargamento convencional com alargadores de múltiplos gumes. Os ensaios mostram a possibilidade de obter furos dentro de tolerâncias em classes abaixo de IT6, ao mesmo tempo em que há uma redução nos tempos de usinagem, ocasionada pelo emprego de velocidades de corte mais elevadas.

ABSTRACT

This work is concerned with the fundamental study of reaming with a high form and superficial quality on close dimensions. Cutting tests were performed on the aluminium alloy 7075-T651 (called aerospace aluminium) with a single blade reamer, in order to investigate the correlation between the finished bores accuracy/tool forces and the process variables, such as cutting speed, feed rate, depth of cut, edge inclination, radial rake angle and cutting fluid.

The surface roughness of bores reamed with a single blade reamer is better than those made with a conventional reamer. The reaming tests show that single blade reamer operations produce an excellent surface finish and bores better than class IT6, at the same time increasing productivity.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A execução de furos é uma das operações de usinagem mais comuns na fabricação de peças. Uma grande proporção destes furos exige operações posteriores à furação, para melhorar a qualidade superficial, a precisão de forma e dimensional. Para esta tarefa são comumente empregados os alargadores. Os alargadores convencionais, entretanto, oferecem resultados limitados quanto à tolerância dimensional, geométrica e acabamento superficial. Para determinadas tarefas, a qualidade exigida dos furos é superior à que se pode obter com este tipo de ferramenta.

Na execução de furos de qualidade ainda maior do que a obtida com alargadores convencionais, começa a ter importância crescente um novo tipo de ferramenta, o alargador de gume único regulável. Com o mesmo, podem ser resolvidos problemas na obtenção de furos de alta qualidade, anteriormente obtida apenas através de operações posteriores de brunimento, retificação interna, furação de precisão e outras. Juntamente com o incremento na qualidade, o uso de alargadores de gume único regulável possibilita uma redução substancial nos tempos da operação de alargamento. Esta redução ocorre graças às altas velocidades de corte possíveis em função da otimização da geometria destas ferramentas. Também a eliminação de possíveis operações posteriores permite diminuir ainda mais os tempos de usinagem. A diminuição de tempos tem uma importância crescente

dentro de um mercado cada vez mais competitivo, onde o custo de hora-máquina das modernas máquinas-ferramentas atinge valores muito altos.

Este trabalho tem como objetivo aprofundar a pesquisa sobre o processo de alargamento de precisão com ferramentas de gume único regulável. Para tanto, são estudadas as variáveis do processo no alargamento da liga de alumínio 7075-T651, também denominada de alumínio aeronáutico. A escolha deste material vem da necessidade que a indústria aeronáutica tem de obter furos de alta qualidade. O alargamento deste material com alargadores convencionais foi estudado em outros trabalhos, o que permite uma comparação de resultados e desempenho.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

2.1. Alargamento

Alargamento é um processo de usinagem de precisão com retirada de cavacos, com ferramenta de geometria definida, que tem por objetivo proporcionar um aumento de diâmetro, melhoria de qualidade da superfície usinada e melhoria na geometria de furos já existentes, diminuindo as tolerâncias de medida do furo. Durante a operação de alargamento, há uma rotação da ferramenta (alargador) e/ou da peça, e um avanço relativo entre peça e ferramenta, o que produz uma pequena remoção de material das paredes do furo. As operações de furação e alargamento podem ser realizadas no mesmo tipo de máquinas-ferramentas.

A precisão dos furos e a qualidade das superfícies produzidas por alargamento dependem fundamentalmente das condições iniciais do furo (antes do alargamento), rigidez da máquina e das fixações da peça e da ferramenta, velocidades e avanços corretos, fluido de corte conveniente e aplicado de forma apropriada e do estado geral da ferramenta.

Devido à pequena remoção de material e à necessidade de uma remoção uniforme durante o alargamento, os furos iniciais (produzidos por brocas ou outros processos de furação) devem ter circularidade, retilinelidade e acabamento superficial regulares. Alargadores tendem a seguir a linha de centro dos furos já

existentes, e em determinados casos há necessidade de uma operação de mandrilamento antes da operação de alargamento, de modo que se consiga atingir as tolerâncias requeridas. Com o emprego de condições próprias e parâmetros de operação adequados, é possível atingir tolerâncias apertadas e boa qualidade superficial através do alargamento.

É verificado que nas operações de alargamento, o diâmetro do furo obtido é, em geral, desprezivelmente maior do que o diâmetro da ferramenta, podendo-se observar uma proporção entre este aumento no diâmetro e a sobremedida de usinagem. Variações na sobremedida de usinagem podem também alterar a qualidade do acabamento superficial do furo [1].

Característico do alargamento é que o próprio alargador se "auto-posiciona" no furo de preparação, onde as forças passivas de gumes opostos se subtraem mutuamente. Esta característica permite o alargamento de furos muito longos e de pequeno diâmetro. Além disto, outras vantagens deste tipo de operação são sua facilidade de realização na maior parte das máquinas e o pequeno investimento exigido para aquisição de máquinas. Como desvantagens do alargamento tem-se a impossibilidade de mudança de posição do furo prévio e velocidade de corte limitada [2].

Embora a operação de alargamento esteja sendo substituída em alguns casos de produção de grandes séries por operações de torneamento interno de precisão e furação de precisão, ainda é de muita importância para pequenas e médias séries [2;3].

Nas operações de alargamento onde o furo de preparação e o alargamento não sejam feitos na mesma fixação, é recomendado o uso de suportes pendulares, que compensam um eventual desalinhamento entre o furo e o alargador [2;4].

2.2. Alargadores

2.2.1. Generalidades

Os alargadores, ferramentas utilizadas nas operações de alargamento, podem ser fabricados com diversos materiais e sob diversas formas. Entre os materiais mais usados estão o aço rápido e o metal-duro. Em alguns casos são usados alargadores com insertos de PKD (diamante policristalino).

Para o alargamento de furos, é necessário que os alargadores tenham dois elementos fundamentais: elemento de usinagem e elemento para guia da ferramenta no furo. Nos alargadores de corte múltiplo, mais difundidos, as duas funções (corte e guia) são realizadas pelos dentes. Já nos alargadores de gume único com insertos, a função de corte e guia é distribuída em dois elementos distintos [2].

Nos alargadores comuns de corte múltiplo, é usual a divisão dos dentes em divisões não simétricas, com o objetivo de evitar vibrações. Entretanto, os pares de dentes opostos têm divisão igual, de maneira a possibilitar uma fácil medição do diâmetro da ferramenta (vide fig. 2.1) [5].

Com o objetivo de evitar o travamento da ferramenta no furo e conseguir um melhor acabamento, o diâmetro de corte dos alargadores se reduz da entrada em direção à haste. Esta redução no diâmetro é da ordem de 0,015 a 0,025 mm para cada 100 mm de comprimento de corte, no caso de alargadores convencionais [7] e de 0,070 a 0,100 mm para cada 100 mm de comprimento de corte, no caso de alargadores de gume único regulável, com inserto intercambiável [6].

Em relação às dimensões máxima e mínima admissíveis para alargadores convencionais, o maior diâmetro admissível para o alargador fica em torno de 15% da respectiva tolerância do furo ($0,15.IT$) abaixo da dimensão máxima admissível para o furo, e o menor diâmetro admissível para o alargador fica em torno de 35% da respectiva tolerância do furo ($0,35.IT$) abaixo do diâmetro máximo admissível para o alargador [7].

Segundo Stemmer [5] e Rocek [8], um acabamento refinado do gume de corte em alargadores tem notável efeito sobre a vida da ferramenta, sendo observado um aumento de vida na ordem de dez vezes para ferramentas lapidadas em relação às retificadas.

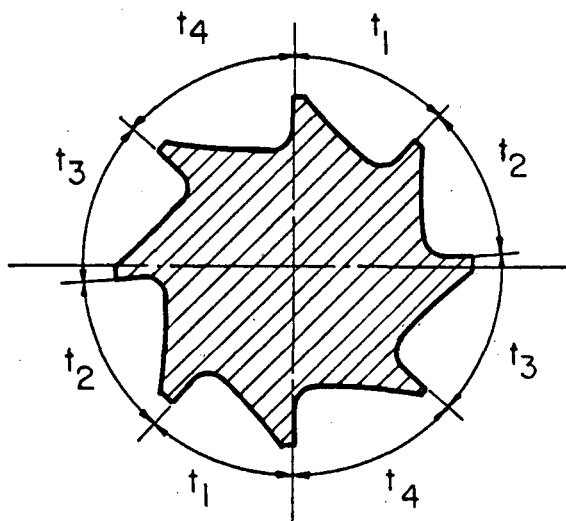
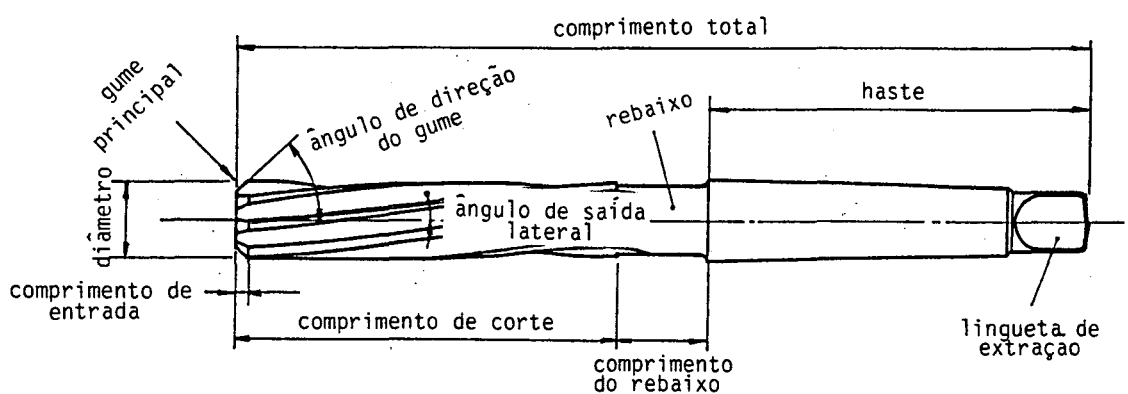
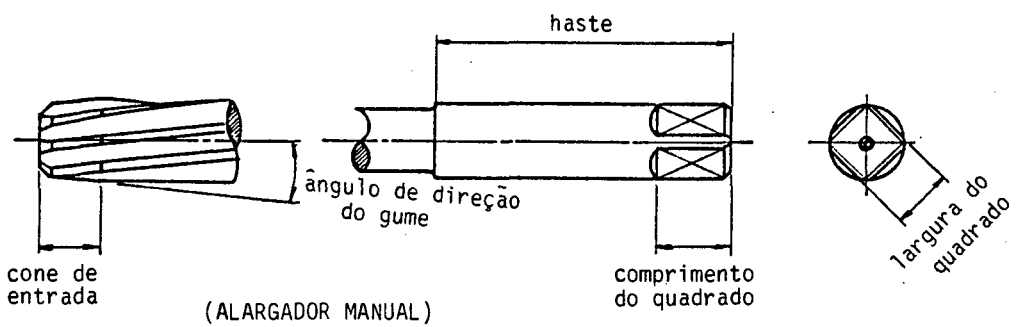


FIG. 2.1 - Divisão desuniforme [5]

2.2.2. Terminologia de alargadores (fig. 2.2)



(ALARGADOR PARA MÁQUINA)



(ALARGADOR MANUAL)

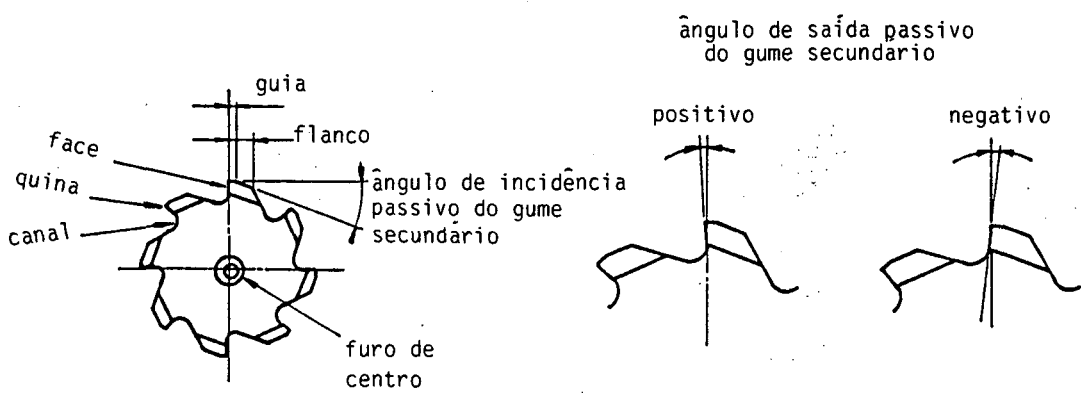


FIG. 2.2 - Terminologia [7]

2.2.3. Classificação de alargadores

a) Quanto ao tipo de operação - podem ser de desbaste ou 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 [5].

b) Quanto ao tipo de dentes (canais) - podem ser de dentes retos ou helicoidais. 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 com interrupções na parede (rasgos de chaveta, furos, fendas, canais de lubrificação e quando há maior exigência quanto ao acabamento [9]). 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 (fig. 2.3)[5].

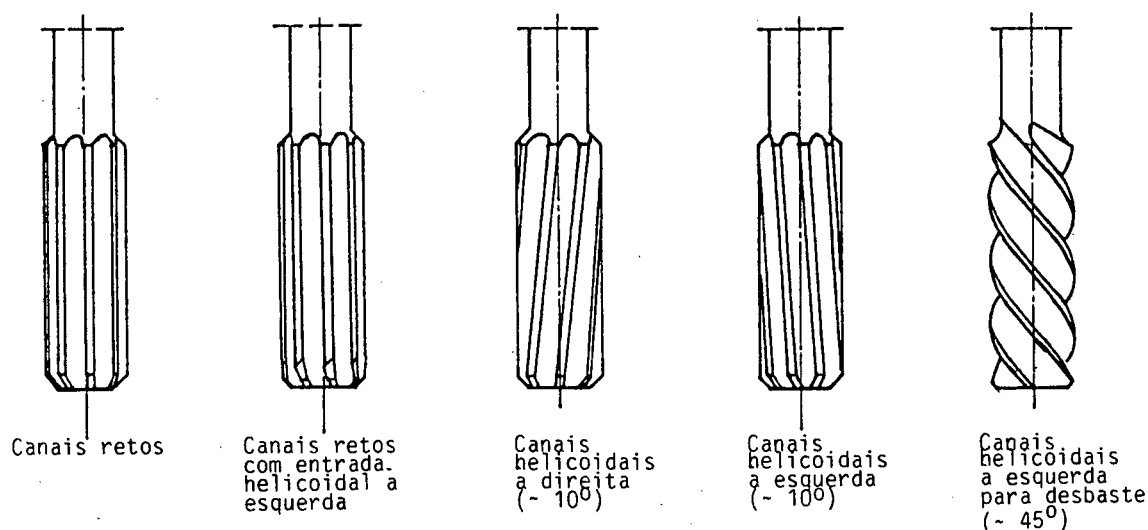


FIG. 2.3 - Tipos de canais [7]

c) Quanto à fixação - podem ter haste cônica ou cilíndrica.

d) Quanto ao sentido de corte - o sentido de corte verifica-se 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.

Os alargadores em geral são de corte à direita. Usando-se, então, uma hélice esquerda, o cavaco é empurrado para a frente, evitando que este 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 hélice à 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. A força é no sentido de arrancar o alargador do mandril. Por estas razões, alargadores com hélice à direita e corte à direita só são utilizados no alargamento de furos cegos, nos quais o cavaco jogado para a frente não encontraria lugar para alojar-se [5].

e) 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 (fig. 2.4)[5].

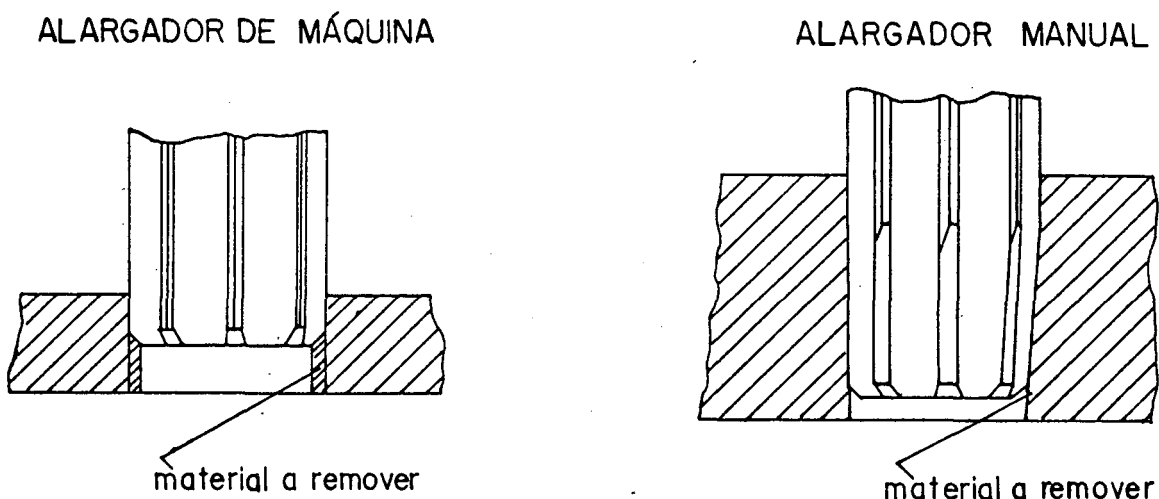


FIG. 2.4 - Alargadores de máquina e manuais [5]

f) 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.

g) Quanto à geometria do furo - podem ser cônicos ou paralelos. Alargadores cônicos são utilizados para tornar cônicos furos para pinos ou cones Morse [5].

h) Quanto ao número de dentes - podem ser de corte múltiplo (vários dentes) ou de corte único.

i) Quanto à forma de entrada - alargadores podem ter a entrada conforme mostrado na fig. 2.5.

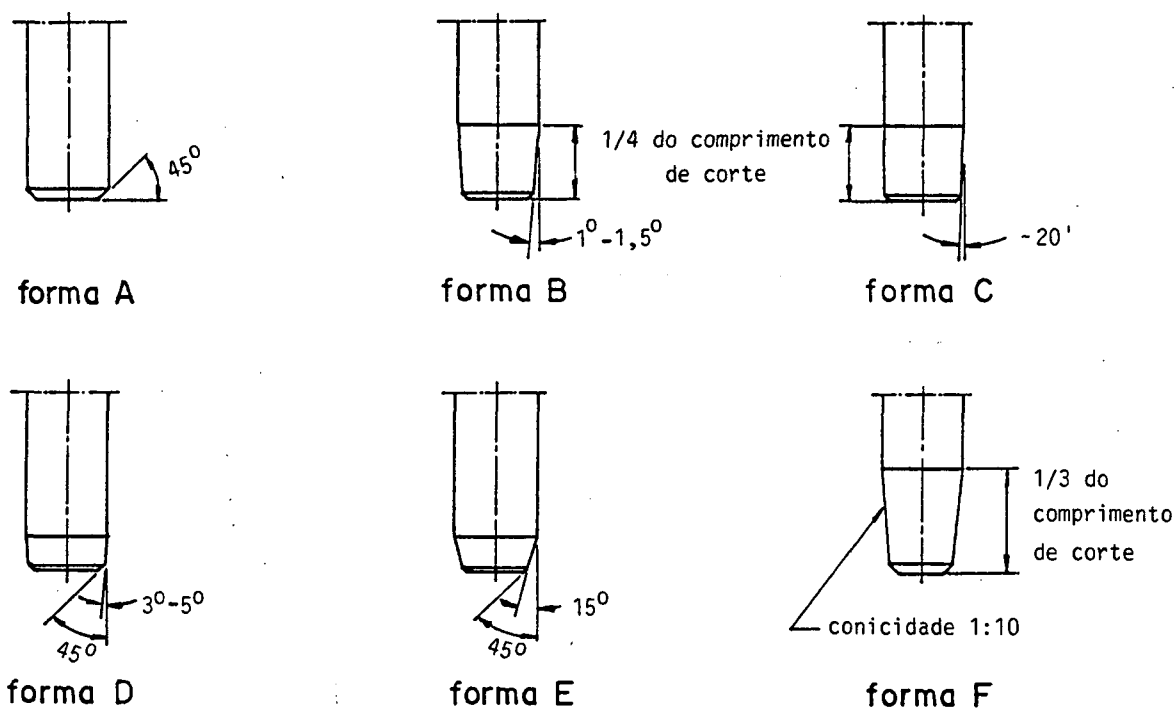


FIG. 2.5 - Formas de entrada [7]

2.2.4. Ângulos em alargadores (fig. 2.6) [7]

a) Ângulo de saída ortogonal γ_0 - forma-se do ângulo de direção do gume χ_r , do ângulo de saída passivo do gume secundário γ'_p e do ângulo de saída lateral γ_f .

b) Ângulo de direção do gume χ_r - varia de 20' a 30' para alargadores manuais, de 1° a 2° para alargadores de desbaste e, nos alargadores para máquinas, é de 45°.

c) Ângulo de saída passivo do corte secundário γ'_p - varia de 0° a 5° em ferramentas do tipo N e de 8° a 15° para ferramentas do tipo W.

d) Ângulo de saída lateral (ângulo de hélice) γ_f - varia de 0°, nos alargadores de dentes retos, a mais de 30°, em alargadores helicoidais de desbaste.

e) Ângulo de incidência ortogonal α_o - deve ser suficiente para que, com um avanço normal, a cunha cortante tenha corte livre. Não deve ser menor do que 5° .

f) Ângulo de incidência passivo do gume secundário α'_p - deve ter, aproximadamente, de 8° a 10° . A sua grandeza depende da largura da guia e do diâmetro do alargador.

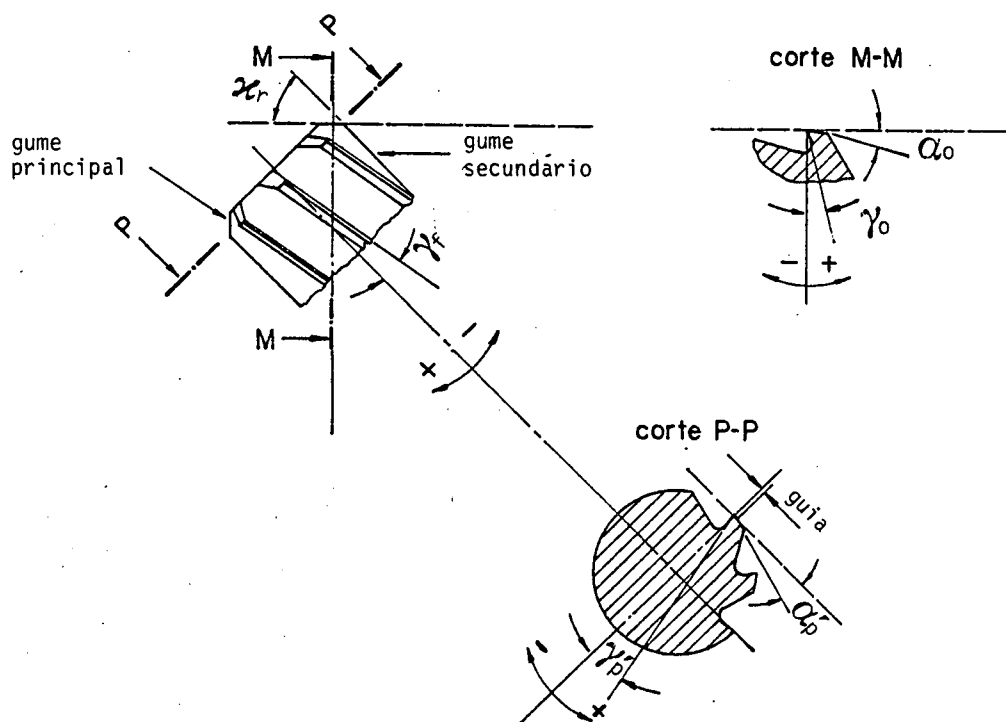


FIG. 2.6 - Ângulos em alargadores [7]

2.3. Parâmetros para operações de alargamento

Dentre os fatores que devem ser observados para um alargamento eficiente e economicamente viável estão a velocidade de corte apropriada, avanço e fluído de corte a serem empregados.

2.3.1. Velocidade de corte

A velocidade de corte utilizada nas operações de alargamento situa-se, normalmente, entre 65% e 75% da velocidade de corte para furação do mesmo material. Este parâmetro, entretanto, depende basicamente do tipo de alargador empregado, da quantidade de material a ser removido e do acabamento desejado. Quanto maior esta quantidade, menor deve ser a velocidade de corte empregada.

Baixas velocidades de corte diminuem a produtividade sem que haja um aumento significativo na vida da ferramenta, e velocidades muito altas podem provocar quebra de gumes, desgaste maior e produção de superfícies de maior rugosidade [1].

Segundo Stemmer [5], para alargadores de desbaste é usual a utilização de velocidades de corte da ordem de 1/4 das velocidades utilizadas em operações de desbaste em tornos, para o mesmo material.

2.3.2. Avanço

Os avanços, neste tipo de operação, situam-se na faixa de duas a três vezes maior que os avanços para furação do mesmo material [1]. Para ferramentas de aço rápido, os avanços em mm/rot usados para a maior parte dos materiais está em torno de 1% do diâmetro do furo, reduzindo-se progressivamente a 0,5% para furos maiores que 50 mm. [5].

Com o uso de baixos avanços ocorre um desgaste excessivo da ferramenta, porém o acabamento é melhor. Já com o uso de altos avanços consegue-se um aumento na vida da ferramenta, entretanto podem ocorrer marcas espirais na parede do furo e um acabamento

ondulado [1].

Segundo Miller [9], para materiais de dureza superior a 55 HRC, é recomendado o uso de avanço manual.

2.3.3. Fluido de corte

Os fluidos de corte têm quatro funções principais na usinagem de metais:

- a) Refrigeração.
- b) Lubrificação da região de contato entre ferramenta e peça e entre ferramenta e cavaco.
- c) Prevenção de adesão, gume postiço e redução de lascamento no gume de corte.
- d) Arrastar cavacos para longe da região de corte [10].

Para operações de alargamento, a seleção do fluido de corte é feita baseando-se principalmente no acabamento superficial que este fluido permite, e não tanto devido às suas propriedades refrigerantes.

Na usinagem do alumínio, os fluidos de corte mais empregados são as emulsões de óleo em água, em concentrações de 3% a 5%. A aplicação do fluido de corte sob forma de névoa é geralmente preferida. Ar comprimido, em pressões de 0,7 a 5,5 bar, é utilizado para atomizar o fluido e impeli-lo à zona de corte [10].

Segundo Miller [9], o uso de querosene e óleo de corte na usinagem do alumínio também traz bons resultados.

2.4. Forças de corte no alargamento

2.4.1. Definição de forças de corte

De acordo com a DIN 6584, a força de usinagem em um dente é denominada F_1 , onde o índice "1" está para o número de dentes do alargador. Esta força pode ser decomposta em componentes segundo:

a) A direção do eixo da ferramenta F_{f1} , denominada força de avanço por dente.

b) A direção tangencial ao perímetro F_{c1} = direção de corte = direção da velocidade de corte, denominada força total de corte por dente.

c) A direção perpendicular ao eixo da ferramenta e a direção de corte F_{p1} , denominada força passiva por dente.

A componente F_{c1} pode ser subdividida em força principal de corte por dente F_{cc1} e força principal de atrito por dente F_{ca1} (fig. 2.7) [3].

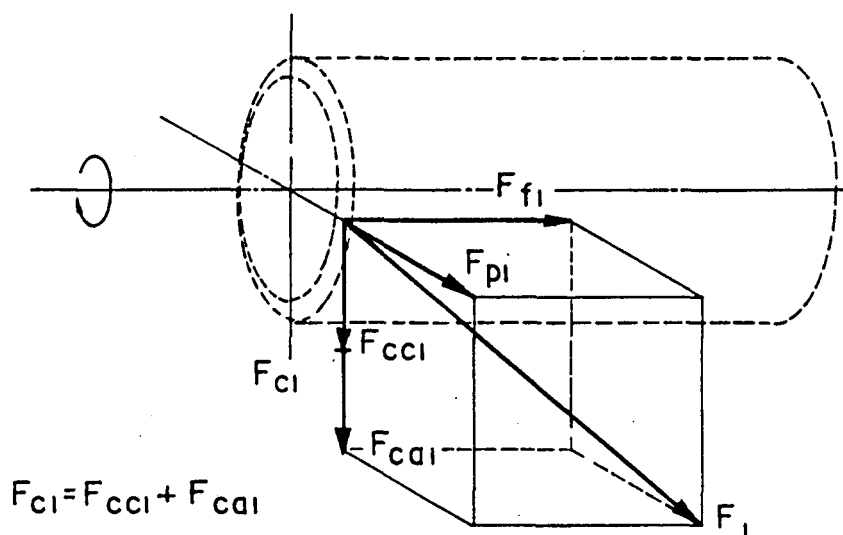


FIG. 2.7 - Definição das componentes da força de usinagem [3]

F_{f1} = força de avanço por dente.

F_{p1} = força passiva por dente.

F_{cc1} = força principal de corte por dente.

F_{ca1} = força principal de atrito por dente.

F_{c1} = força total de corte por dente.

F_1 = força de usinagem por dente.

A partir das forças totais de corte e de avanço por dente, e da seção transversal de cavaco (vide fig. 2.8), é possível determinar a força específica de corte k_c e a força específica de avanço k_f , segundo as fórmulas:

$$k_c = F_{c1} / b \cdot h = 2 \cdot F_{c1} / a \cdot f_z \quad (1)$$

$$k_f = F_{f1} / b \cdot h = 2 \cdot F_{f1} / a \cdot f_z \quad (2)$$

onde: a = sobremedida de usinagem (diferença entre diâmetros).

h = espessura de corte.

b = comprimento de corte.

f_z = avanço por dente.

χ_r = ângulo de direção do gume.

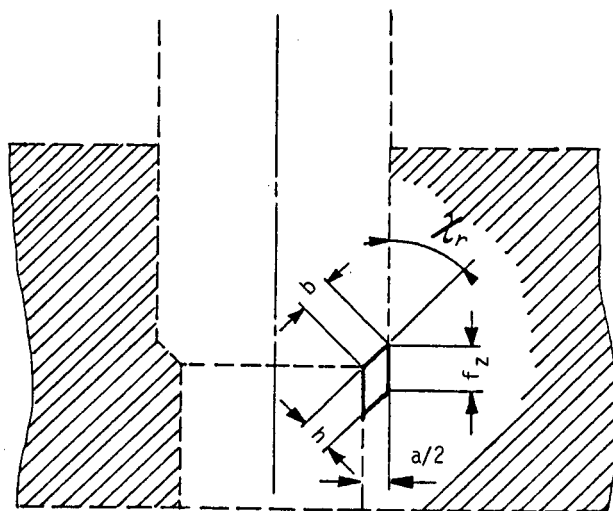


FIG. 2.8 - Seção transversal de cavaco [3]

2.4.2. Medição de forças

Com os medidores de força de corte usuais não é possível medir diretamente uma força. Quando uma força atua sobre um material, este é deformado. Esta deformação pode então ser medida em um sistema passivo (indutivo, capacitivo ou através da medição de resistência em um calibre de tensão por fio). O princípio piezelétrico de medição de forças se diferencia essencialmente dos outros sistemas por ser um sistema ativo. Quando uma força atua sobre um elemento de quartzo, ocorre na superfície deste uma carga elétrica proporcional à força. Portanto, não há necessidade de medir a deformação em si.

O princípio piezelétrico para medição de forças é bastante difundido, por serem os dinamômetros piezelétricos sistemas rígidos. Isto significa que sua frequência natural é alta, de modo que é possível medir processos dinâmicos [3].

Como outras vantagens dos dinamômetros piezelétricos podem-se citar as pequenas deformações do sistema quando da aplicação de uma força (no máximo alguns milésimos de milímetro), larga faixa de medição (acima de 1:1.000.000), linearidade alta, baixa histerese e simplicidade de uso [12:22].

Para medição de forças com um dinamômetro piezelétrico, em virtude das pequenas cargas elétricas surgidas nos cristais piezelétricos pela aplicação de forças, é necessário conectá-lo a um amplificador de carga e este a um registrador de valores, que pode ser um "plotter", um voltímetro, um osciloscópio ou um aquisitor de dados (fig. 2.9).

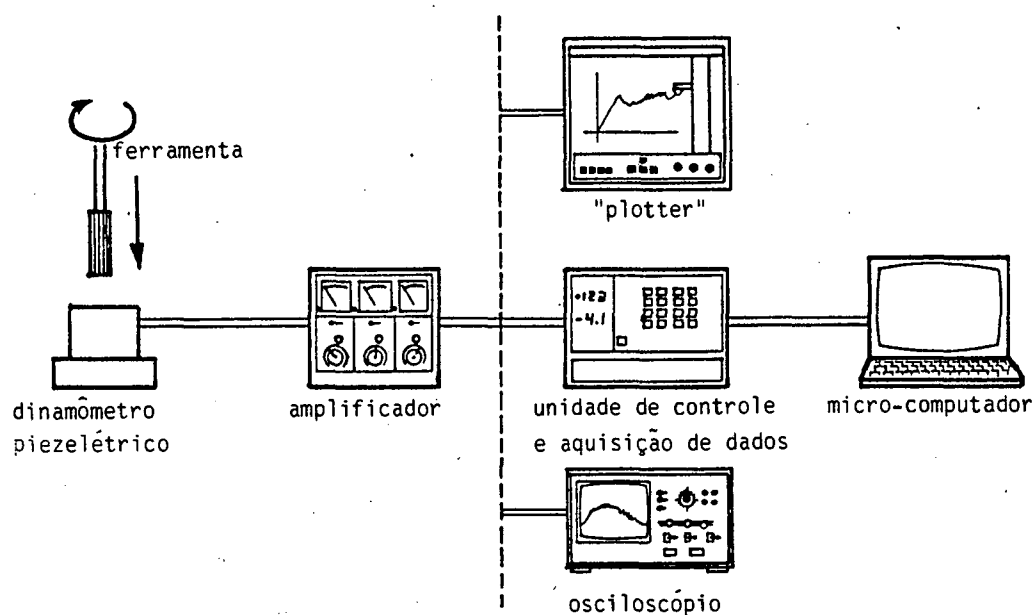


FIG. 2.9 - Montagem de Instalação
para medição de forças

2.5. Escolha do tipo de alargador [7]

O resultado do processo de usinagem de precisão "alargar" depende de vários fatores de influência que, em sua maioria, devem ser levados em consideração no momento da determinação da construção da ferramenta. São especialmente decisivos os seguintes fatores de influência:

- aplicação manual ou mecânica;
- características do furo, como profundidade, passante ou cego, interrompido, estado do pré-furo, espessura da parede da peça, dimensões e grau de acabamento ou precisão;
- resistência e usinabilidade do material.

Nas figuras seguintes são mostrados alguns exemplos de usinagem com as respectivas recomendações [7]. As formas de entrada citadas encontram-se no tópico 2.2.3., 1).

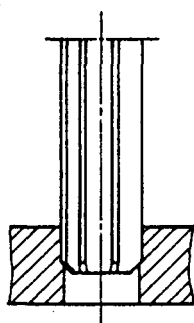


FIG. 2.10 - Furos passantes com até $1 \times D$ de profundidade são alargados com alargadores para máquinas com forma de entrada A, sendo que, para diâmetros maiores que 8 mm, é necessária a operação de calibrar antes da de alargar.

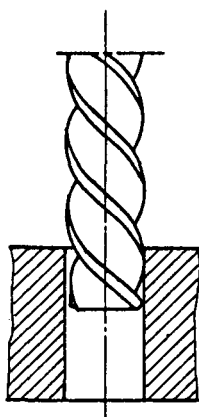


FIG. 2.11 - Furos passantes acima de $1 \times D$ de profundidade em materiais que produzem cavacos longos e de baixa resistência são usinados com alargadores para máquinas com canais helicoidais à esquerda com forma de entrada C.

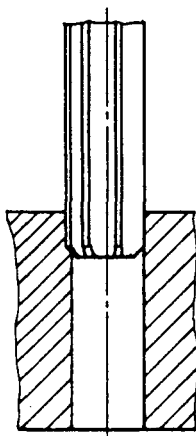


FIG. 2.12 - Furos passantes acima de $1 \times D$ de profundidade em materiais de cavaco curto são alargados com alargadores para máquinas com canais retos e forma de entrada A e eventualmente com forma de entrada D.

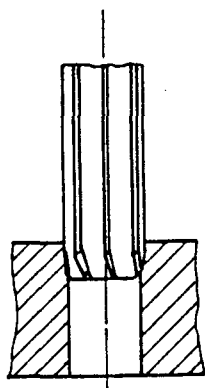


FIG. 2.13 - Para o alargamento de furos passantes em materiais de difícil usinagem, são utilizados alargadores para máquinas com canais retos e com entrada helicoidal à esquerda.

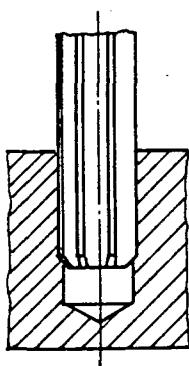


FIG. 2.14 - Para furos cegos com até $3 \times D$ usam-se alargadores para máquinas com canais retos com forma de entrada A.

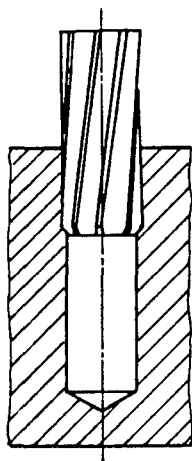


FIG. 2.15 - Para furos cegos e profundos (acima de $3 \times D$), para furos que devem ser alargados até o fundo ou ainda para alargar furos em materiais de difícil usinagem, usam-se alargadores para máquinas com canais helicoidais à direita e forma de entrada A.

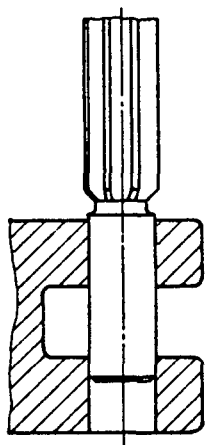


FIG. 2.16 - Furos consecutivos alinhados, com pequenos espaços entre si, são usinados com alargadores com piloto de guia.

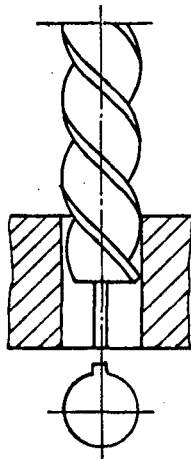


FIG. 2.17 - Furos interrompidos no sentido longitudinal em materiais de cavaco longo e de baixa e média durezas são usinados com alargadores para máquinas com canais helicoidais à esquerda para desbaste com forma de entrada C.

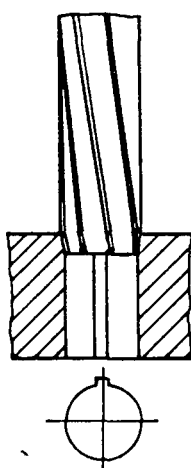


FIG. 2.18 - Para usinar furos interrompidos longitudinalmente em materiais tanto com cavaco curto como longo, são utilizados alargadores para máquinas com canais helicoidais à esquerda com forma de entrada E.

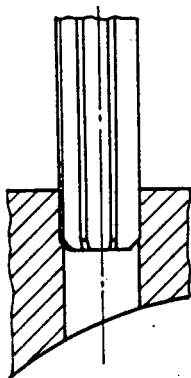


FIG. 2.19 - Quando a saída do furo for inclinada, deve-se utilizar um alargador com forma de entrada A.

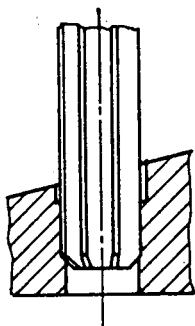


FIG. 2.20 - Evitar superfícies de entrada inclinadas. Fazer sempre uma superfície plana.

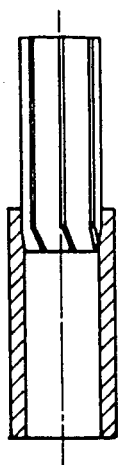


FIG. 2.21 - Para o alargamento de furos passantes e profundos em peças de paredes finas, são usados alargadores para máquinas com canais retos e entrada helicoidal à esquerda.

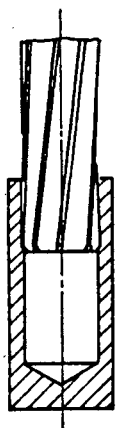


FIG. 2.22 - Furos cegos em peças de paredes finas são usinados com alargadores para máquinas com canais helicoidais à direita e com forma de entrada A.

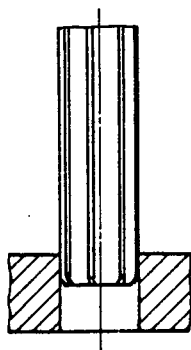


FIG. 2.23 - Alargamento de um furo cônico com um alargador cônico com canais retos. Nos furos até $1 \times D$ (diâmetro médio) de profundidade, a pré-furação poderá ser cilíndrica. Furos mais profundos deverão ser pré-furados com brocas cônicas ou pré-usinados com alargadores cônicos com canais helicoidais à esquerda para desbaste que não necessitam de uma pré-furação cônica.

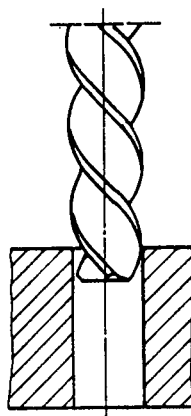


FIG. 2.24 - Alargamento de um furo cônico com um alargador cônico de canais helicoidais. É importante que o diâmetro do pré-furo seja maior que o menor diâmetro do alargador. Caso se exija precisão e/ou grau de acabamento, repassar com alargador cônico de canais retos.

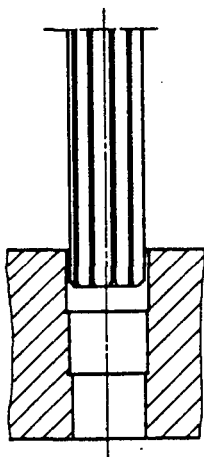


FIG. 2.25 - Alargamento de um furo para Cone Morse com alargador de canais retos, que só poderá ser empregado caso o pré-furo tenha sido usinado de forma escalonada ou pré-alargado com um alargador cônico de canais helicoidais.

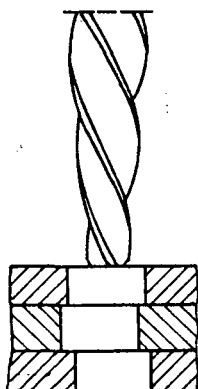


FIG. 2.26 - Em trabalhos de montagem, o alargador de furos para rebites é usado para compensar furos deslocados em chapas. Possui forma de entrada F.

2.6. Problemas, causas e soluções em alargamento com alargadores convencionais [1]

Problemas	Causas	Soluções
a) Furo muito grande	Desalinhamento e/ou vibrações/trepidações	Reparar ou mudar de máquina para aumentar rigidez. Realinhar e reapertar fixação da peça e da ferramenta. Usar suporte pendular ou fixação ajustável. Usar buchas mais justas. Reduzir vel. de corte e aumentar avanço, se necessário.
	Folga excessiva nas buchas	Trocar buchas ou reapertá-las.
	Desgaste do chanfro do alargador	Reaflar ou substituir alargador.
	Furo de preparação de má qualidade	Melhorar furo de preparação.
	Remoção excessiva de material	Aumentar diâmetro do furo de preparação.

Problemas	Causas	Soluções
	Alargador bate no fundo de furo cego	Aumentar profundidade do furo cego. Diminuir prof. de alargamento.
	Atrito	Usar alargador de metal- duro e buchas. Aumentar vazão de fluido de corte/mudar fluido.
	Alargador com gumes embotados	Reaflar ou substituir alargador.
	Alargador Inadequado	Mudar alargador.
b) Furo muito pequeno	Calor excessivo	Usar fluido de corte, verificar se este atinge zona de corte. Alterar fluido de corte. Aumentar vazão do fluido de corte. Reduzir avanço e/ou velocidade de corte.
	Tamanho do alar- gador Inadequado	Mudar alargador.

Problemas	Causas	Soluções
	Alargador mal aflado	Reafiar ou substituir alargador.
c) Furos em forma de tonel	Desalinhamento e/ ou vibrações/ trepidação	Mesmas soluções do caso de furo muito grande.
	Avanço inadequado	Aumentar avanço.
	Haste do alargador torta	Substituir alargador.
	Ferramenta muito longa	Usar ferramenta mais curta.
	Peça muito aper- tada na fixação	Checar fixação. Diminuir pressão de fixação.
d) Mau acabamento da superfície do furo	Alargador embotado ou danificado	Reafiar ou substituir alargador.
	Alargador inadequado	Substituir alargador.
	Desalinhamento e/ ou vibrações/ trepidações	Ver soluções para furo muito grande.

Problemas	Causas	Soluções
	Remoção excessiva de material	Aumentar furo de preparação.
	Baixa usinabilidade da peça	Alterar material da ferramenta. Alterar fluido de corte.
	Alargador tocando fundo de furo cego	Aumentar profundidade do furo cego ou diminuir prof. de alargamento.
	Velocidade de corte excessiva	Reduzir velocidade de corte. Alterar material do alargador.
	Calor excessivo	Ver soluções para furo muito pequeno.
	Marcas da ferramenta	Parar rotação do alargador antes de retirá-lo.
	Atrito	Usar alargador de metal- duro e buchas.

2.7. Equações de respaldo

2.7.1. Velocidade de corte

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (3)$$

2.7.2. Rugosidade Rt

$$R_t = \frac{f^2}{8 \cdot r_\epsilon} \quad (4)$$

2.7.3. Largura de usinagem

$$b = \frac{a}{2 \cdot \text{sen } \alpha_r} \quad (5)$$

2.7.4. Espessura de usinagem

$$h = f_z \cdot \text{sen } \alpha_r \quad (6)$$

CAPÍTULO 3

PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

3.1. Ferramenta utilizada - Alargador de gume único regulável com inserto intercambiável

3.1.1. Generalidades

No alargador de gume único, as duas funções exercidas pelos dentes dos alargadores convencionais, ou seja, usinagem do material e guia da ferramenta dentro do furo, são divididas em dois elementos distintos: o inserto e as réguas de guia. As réguas de guia servem para guiar o alargador dentro do furo e a usinagem é tarefa do inserto. Desta forma, cada elemento pode ser projetado para sua função específica, o que possibilita o trabalho com altas velocidades de corte e avanço. Segundo Kress [2], com geometrias de corte semelhantes às utilizadas em operações de torneamento, resultados também semelhantes ao torneamento são obtidos.

Pelas características construtivas deste tipo de alargador, é possível regular a inclinação do gume e ajustar o diâmetro dentro de uma pequena faixa (na ordem de 0,05 mm), de maneira que possam ser compensados eventuais desgastes do gume e encontrar a melhor inclinação deste para cada tipo diferente de material usinado. A inclinação do gume é definida como o ângulo que o gume forma com uma reta paralela ao eixo longitudinal da ferramenta,

pertencendo a reta que passa pelo gume e o eixo longitudinal da ferramenta a um mesmo plano. Com a inclinação do gume, o diâmetro da ferramenta sofre uma redução no diâmetro da ponta em direção à haste.

A utilização de fluido de corte no alargamento com alargadores de gume único é muito importante, menos como refrigerante e mais como lubrificante das réguas de encosto (gula), que na usinagem a seco sofreriam elevado desgaste e danificariam as paredes do furo.

Como principais vantagens da utilização deste tipo de ferramenta são citadas [6]:

a) Redução do tempo principal, devido às altas velocidades de corte e avanço.

b) Redução dos tempos secundários, devido ao pouco tempo necessário à regulagem.

c) Melhoria da qualidade dos furos, devido à melhoria da circularidade, cilindricidade, qualidade superficial e precisão dimensional.

d) Baixos custos de ferramenta, devido à grande vida desta.

Na realização dos ensaios será empregada uma ferramenta com as seguintes características:

Fabricante - August Beck GmbH & Co (Rep. Fed. Alemanha)

Modelo - RB 01, ARB 15

Comprimento total - 182 mm

Diâmetro - 12 mm

Tipo de haste - Cone Morse 2

Devido à ausência de fabricantes nacionais de alargadores de gume único, utilizou-se uma ferramenta importada.

3.1.2. Problemas, causas e soluções em alargamento com alargadores ajustáveis de gume único [6]

Problemas	Causas	Soluções
a) Furo muito grande/muito pequeno	Alargador com diâmetro muito grande/muito pequeno	Ajustar diâmetro menor/maior
	Coaxilidade entre peça e ferramenta é insuficiente	Melhorar coaxilidade. Usar suporte pendular.
b) Furo fica cônico	Inclinação do gume muito grande	Diminuir conicidade do gume.
	Coaxilidade entre peça e ferramenta é insuficiente	Melhorar coaxilidade. Usar suporte pendular.
c) Furo fica não circular	Diâmetro do alargador muito pequeno	Aumentar diâmetro do alargador.
	Diâmetro do alargador muito grande	Diminuir diâmetro do alargador.

Problemas	Causas	Soluções
	Peça muito apertada na fixação	<p>Checar fixação.</p> <p>Diminuir pressão de fixação.</p>
	Lâmina com distância incorreta em relação às réguas de encosto	Assegurar encosto de inserto nos batentes.
d) Furo em forma de tonel	Peça muito apertada na fixação	<p>Checar fixação.</p> <p>Diminuir pressão de fixação.</p>
e) Superfície do furo com marcas de trepidação	Inclinação do gume muito pequena	Aumentar inclinação.
	Coaxialidade entre peça e ferramenta é insuficiente	<p>Melhorar coaxialidade.</p> <p>Usar suporte pendular.</p>
f) Furo fica cônico na entrada/saída	Avanço muito grande	Diminuir avanço.
	Inclinação do gume muito grande	Diminuir inclinação do gume.

Problemas	Causas	Soluções
	Inclinação do gume muito pequena	Aumentar inclinação do gume.
g) Furo fica torto	Sobremedida de usinagem insuficiente	Aumentar sobremedida de usinagem.
	Lâminas muito longas	Diminuir comprimento de lâminas.
h) Superfície do furo com sulcos	Sobremedida de usinagem insuficiente	Aumentar sobremedida de usinagem.
	Geometria de corte não apropriada	Modificar geometria de corte.
	Avanço muito grande	Diminuir avanço.
	Velocidade de corte inadequada	Modificar velocidade de corte.
	Fluido de corte inadequado	Substituir fluido de corte, aumentar sua vazão e pressão.

Problemas	Causas	Soluções
	Formação de gume postiço, deposição de material sobre réguas de encosto	Diminuir avanço, alterar velocidade de corte, aumentar oleosidade e vazão de fluido de corte.
	Permanência de cavacos na zona de corte	Aumentar vazão e pressão do fluido de corte.
	Alargador com gume embotado	Substituir inserto.
1) Lâmina engan- cha nas paredes do furo	Permanência de cavacos na zona de corte	Aumentar vazão e pressão do fluido de corte.
	Inclinação do gume muito pequena	Aumentar inclinação do gume.

3.2. Material ensalado

3.2.1. Composição [14]

O material submetido às operações de alargamento é a liga de alumínio 7075-T651, também denominada alumínio aeronáutico,

com a seguinte composição:

0,40% máx. Si
0,50% máx. Fe
1,2 a 2% Cu
0,30% máx. Mn
2,1 a 2,8% Mg
0,18 a 0,29% Cr
5,1 a 6,1% Zn
0,2% máx. Ti
0,05% máx. outros (cada)
0,15% máx. outros (total)
Restante de alumínio

A liga acima é tratada termicamente. A especificação T651 significa:

T6 = solubilizada e envelhecida artificialmente.

T₅₁ = com alívio de tensões por estiramento.

3.2.2. Propriedades mecânicas [14]

Resistência à tração - 572 MPa (a 24^o C)

Tensão de escoamento - 503 MPa (a 24^o C)

Alongamento - 11%

Dureza Brinell - 150 HB (500 kg de carga, esfera de 10 mm de diâmetro, 30 s de duração do carregamento)

Resistência ao cisalhamento - 331 MPa

Resistência à fadiga - 159 MPa (5 x 10⁸ ciclos em teste tipo R.R. Moore).

3.2.3. Aplicações [14]

Usado normalmente em elementos estruturais de aviões e em outras aplicações onde são requeridas resistências muito altas, boa resistência à corrosão e baixa relação peso/resistência.

3.2.4. Corpos de prova

Os corpos de prova utilizados nos ensaios tem dimensões conforme a fig. 3.1, de maneira a permitir sua fixação em dispositivo já existente que, por sua vez, será fixado ao dinamômetro piezelétrico. Para cada corpo de prova são planejados dez ensaios, observando-se a distância mínima de $0,5.D$ entre paredes de furos. Este distanciamento tem por objetivo evitar a influência de possíveis deformações, causadas pela usinagem de um furo, sobre furos já existentes.

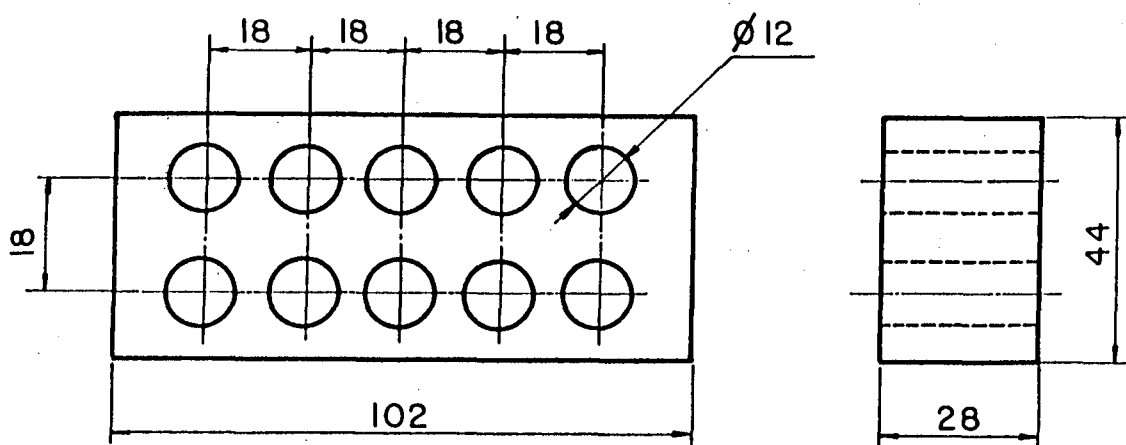


FIG. 3.1 - Corpos de prova

3.3. Máquina-ferramenta [15]

A máquina-ferramenta utilizada nos ensaios de alargamento é uma furadeira radial Csepel RFh 75/1500, pertencente ao Laboratório de Máquinas-Ferramentas da UFSC (USIMAQ). Esta furadeira permite uma velocidade máxima de rotação da árvore de 1900 rpm, sendo as velocidades reguladas de maneira escalonada (série R 10), nas seguintes vinte e uma rotações:

19 - 23,6 - 30 - 37,5 - 47,5 - 60 - 75 - 95 - 118 - 150

190 - 236 - 300 - 375 - 475 - 600 - 750 - 950 - 1180 - 1500

1900.

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

0,047 - 0,063 - 0,094 - 0,125 - 0,187 - 0,25 - 0,375 - 0,5

0,75 - 1 - 1,5 - 2.

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

3.4. Equipamento para medição de forças de usinagem

3.4.1. Descrição da montagem

Para a medição das forças de usinagem é montado um sistema compreendendo um dinamômetro piezelétrico, um amplificador de sinais, uma unidade de controle e aquisição de dados e um micro-computador (fig. 3.2).

O dinamômetro piezelétrico permite medir a força de avanço da ferramenta (F_f) e o momento de torção (M_t), baseando-se no efeito piezelétrico de medição de forças (vide 2.4.2.). O amplificador de carga, ligado ao dinamômetro piezelétrico, é necessário em virtude do pequeno sinal de carga gerado. Na unidade de controle e aquisição de dados, o sinal de tensão (analógico) que sai do amplificador de carga, é transformado em um sinal digital, podendo então ser armazenado e tratado no computador ligado à unidade de controle e aquisição de dados.

Para impedir o contato do fluido de corte com o dinamômetro, este é protegido com uma capa plástica.

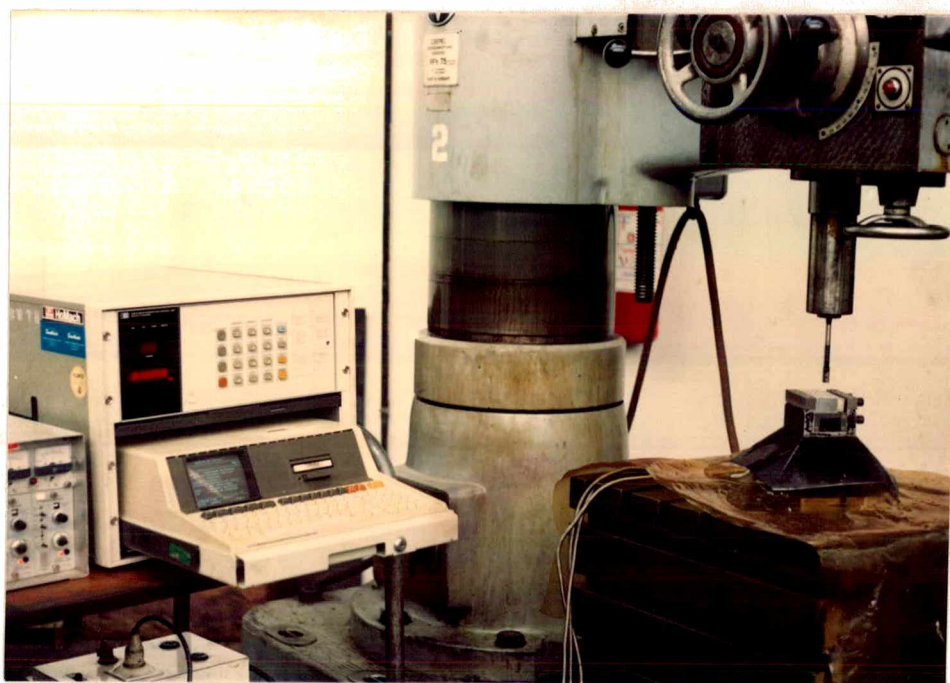


FIG. 3.2 - Montagem para medição de forças de usinagem

3.4.2. Dinamômetro piezelétrico [11]

Fabricante : Kistler Instrumente A.G.

Modelo: 9273

Número de série: 142.405

	Ff	Mt
Faixa de medição:	-5...20N	-100...100N.m
Sinal mínimo de resposta:	0,02N	0,02N.cm
Sensibilidade:	-1,94pC/N	1,65pC/N.cm
Linearidade:	< $\pm 1\%$ FSO	< $\pm 1\%$ FSO
Histerese:	< 1% FSO	< 1% FSO
Temperatura de utilização:	0...70 ⁰ C	

3.4.3. Amplificador de sinais [16]

Fabricante: Kistler Instrumente A.G.

Modelo: 5006

Faixa de medição: $\pm 10...500.000$ pC

Sensibilidade: -0,1...11.000 pC/unidade mecânica

Impedância de entrada: ~100 T Ω

Faixa de frequência: 0...180 kHz

Precisão: < $\pm 1\%$ Linearidade: < $\pm 0,5\%$ Sinal parasita do cabo: -3.10^{-5} pGrms/pFTemperatura de utilização: 0...50⁰C

3.4.4. Unidade de controle e aquisição de dados [17]

Fabricante: Hewlett-Packard

Modelo: 3497 A

Impedância de entrada: $>10^{10}$ ohms (escala de 1 a 10 V)

10 Mohms \pm 0,5% (escala 100 V)

Resolução: 10 mV (para 3 dígitos, escala 10 V)

3.4.5. Micro-computador

Fabricante: Hewlett-Packard

Modelo: HP-85

3.5. Equipamento para regulagem e verificação do gume do alargador

3.5.1. Metroscópio horizontal [18]

Para a regulagem do diâmetro e inclinação do gume do alargador, é utilizado um metroscópio horizontal, instalado no Laboratório de Metrologia da UFSC (LABMETRO), com as seguintes características:

Fabricante: Carl Zeiss

Modelo: ULM 02-600

Indicação do valor: digital

Resolução: 0,0001 mm

Força de medição: 1 N

3.5.2. Microscópio óptico de medição

O microscópio óptico de medição é empregado na verificação e medição de desgaste do gume da ferramenta e verificação da possível ocorrência de trincas e lascamentos.

Fabricante: Nikon

Aumento: 30 x

3.6. Equipamento para verificação da qualidade dos furos

Como parâmetros para definição da qualidade dos furos alargados, são verificados os diâmetros (e variação destes), a rugosidade e a circularidade dos mesmos. Para isto são utilizados, respectivamente, um micrômetro interno, um rugosímetro e um circularímetro, instalado no Laboratório de Metrologia da UFSC (LABMETRO).

3.6.1. Micrômetro interno

Fabricante: TESA

Resolução: 0,001 mm

Faixa de medição: 10...12 mm

3.6.2. Rugosímetro [19]

Fabricante: Feinpruef GmbH

Modelo: Perthometer M3A

Número: 24 01 02

Tipo de rugosidade: Rt e Ra

Indicação do valor: analógica

Comprimentos de medição: 1,5 - 4,8 - 15 mm

Comprimentos de "cut-off": 0,25 - 0,8 - 2,5 mm

Faixas de medição: 0...0,25 - 0...2,5 - 0...25 μm (Ra)

0...1 - 0...10 - 0...100 μm (Rt)

3.6.3. Circularímetro [20]

Fabricante: Feinpruef GmbH

Modelo: Formmeter MMQ2/Makrograph F1A

Número: 68 0029 2

Faixas de medição: $\begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 3 - \begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 10 - \begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 30 - \begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 300 - \begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 1000 \mu\text{m}$

(com braço de 40 mm)

$\begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 6 - \begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 20 - \begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 60 - \begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 200 - \begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 600 - \begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 1200 \mu\text{m}$

(com braço de 80 mm)

Filtros (4): 0...50; 0...150; 0...500; 15...500 ondas por
circunferência

Faixa de centragem eletrônica: 3...1000 μm (excentricidade
máxima de acordo com a
faixa de medição)

Tempo de centragem: 12 s

Indicação do valor medido: analógica

3.7. Calibrações

3.7.1. Controle das velocidades de rotação e avanço da árvore da máquina-ferramenta

Conforme Godoy Ramsay [21], as velocidades de rotação da árvore da furadeira radial Csepei RFh 75/1500 apresentam um erro médio de aproximadamente 4% a mais do que o valor nominal. Este erro, normal em máquinas deste tipo, deve ser corrigido quando do cálculo das velocidades de corte.

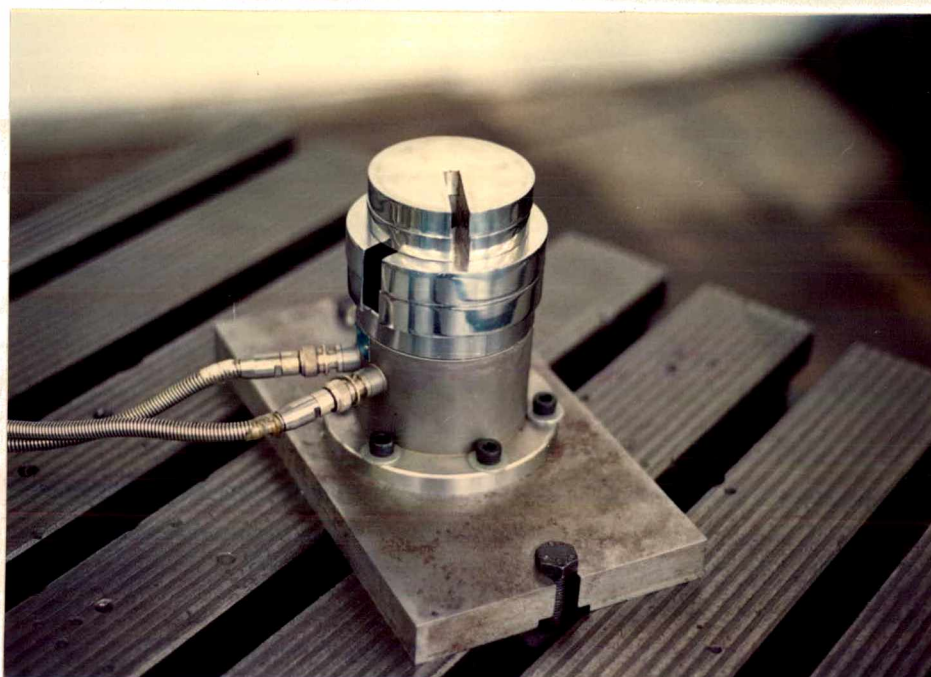
Os resultados obtidos por Godoy Ramsay [21] foram confirmados através da medição de algumas velocidades de rotação e avanço da árvore.

Com relação às velocidades de avanço, entretanto, foi verificada a correspondência dos avanços reais com os avanços nominais.

3.7.2. Calibração do sistema de medição das forças de usinagem

A calibração do sistema para medição das forças de usinagem é necessária para que, tendo-se o levantamento da curva de erros sistemáticos, estes possam ser corrigidos.

O sistema foi montado conforme ítem 3.4.1., sendo o dinamômetro piezelétrico fixado sobre uma mesa perfeitamente nivelada para a calibração da componente vertical de força, ou seja, a força de avanço. Sobre o dinamômetro foram aplicadas massas-padrão gradativamente maiores, de modo a se obter várias leituras de força na direção vertical (fig. 3.3).

FIG. 3.3 - Calibração de F_f

Na calibração dos momentos, fixou-se o dinamômetro em uma cantoneira a 90° da horizontal. Uma barra com um pêndulo foi rigidamente fixada (nivelada) ao dinamômetro, de forma que a aplicação de massas-padrão sobre o pêndulo criasse um momento de torção. Com a aplicação de diversas massas, pôde-se obter as leituras de momentos no sistema de medição, e uma posterior comparação das leituras com os momentos calculados permitiu a determinação dos erros sistemáticos (fig. 3.4).

Todo o procedimento de calibração foi feito com auxílio de um "software" desenvolvido por Rocha [22], que faz um tratamento dos dados de força e permite determinar a função transferência do sistema e a curva de erro sistemático.

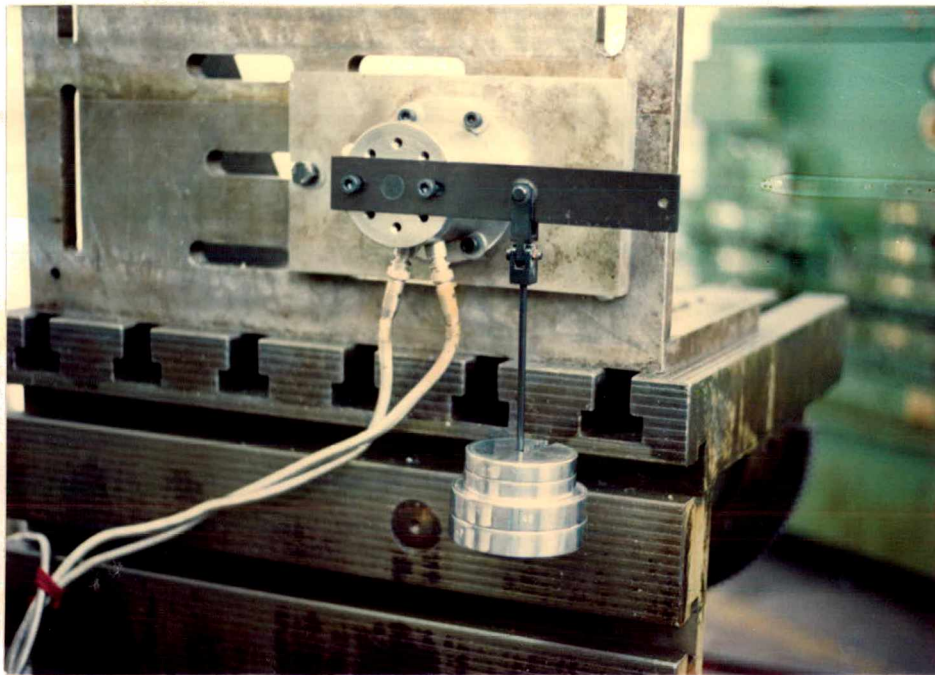


FIG. 3.4 - Calibração de Mt

3.8. Determinação das variáveis do processo

São denominados de variáveis do processo a velocidade de corte (v_c), o avanço (f), a sobremedida de usinagem (a), a inclinação do gume, o ângulo de saída (γ) e o fluido de corte. Além dessas grandezas, pretende-se determinar a influência do uso de suporte pendular no alargamento de furos com ferramentas de gume único, bem como a necessidade ou não de uma operação de alargamento de preparação.

3.8.1. Velocidade de corte

Segundo o fabricante da ferramenta a ser utilizada nos ensaios [6:23], a velocidade de corte ideal para alumínio com baixo teor de silício e para duralumínio situa-se entre 8 e 30

m/min. Para alargadores de gume único com refrigeração interna, estas velocidades podem chegar a 70 m/min. Como não existem referências aos dados de usinagem para alumínio aeronáutico, são utilizadas como referência as ligas de alumínio acima. Estas recomendações coincidem com as fornecidas por Kress [2] e Striegl [24].

3.8.2. Avanço

O avanço deve ser mantido entre 0,1 e 0,5 mm/rot para alumínio com baixo teor de silício, e entre 0,1 e 0,3 mm/rot para duralumínio, devendo sempre ser automático. Com a diminuição do avanço, deve-se esperar um melhor acabamento superficial [6;23].

3.8.3. Sobremedida de usinagem

Conforme recomendações do fabricante [6;23], os valores de sobremedida de usinagem ideais para a usinagem de duralumínio situam-se entre 0,1 e 0,5 mm, e entre 0,2 e 0,5 mm para alumínio com baixo teor de silício. Estes valores representam a diferença entre o diâmetro alargado e o diâmetro do furo de preparação. A espessura da parede alargada é, portanto, a metade deste valor [2;24].

3.8.4. Inclinação do gume

A regulagem da inclinação do gume do alargador, possível em ferramentas do tipo da utilizada nos ensaios, é necessária para evitar o travamento deste no furo alargado. Esta inclinação, que

se traduz em uma redução do diâmetro da parte cortante, deve manter-se entre os valores de 0,008 a 0,010 mm em cada 10 mm de comprimento da lâmina [6:23]. Este valor difere do recomendado por Striegl [24], que se situa na faixa de 0,010 a 0,020 mm em cada 10 mm de comprimento. Para verificar o efeito da variação do valor da inclinação da lâmina sobre a qualidade do furo, e visando esclarecer as diferenças entre as recomendações de diferentes fontes bibliográficas, são executados ensaios com variações de inclinação do gume de 0,005 a 0,020 mm em cada 10 mm de comprimento.

3.8.5. Ângulo de saída

Para a usinagem de alumínio recomendam-se ângulos de saída grandes, de até 15° . Sendo o material da ferramenta o aço rápido, os valores do ângulo de saída devem estar entre 8° e 15° . Para metal-duro, entre 6° e 10° e, no caso de ferramentas de PKD (diamante policristalino), ângulos de saída ainda menores [10]. Segundo o fabricante do alargador de gume único, os ângulos de saída adequados para usinagem de duralumínio são de 15° , e de 0° ou 15° para alumínio de baixo teor de silício [6:23]. Também Striegl [24] recomenda 15° na usinagem de ligas de alumínio.

3.8.6. Fluido de corte

O uso de fluido de corte, no caso de alargamento com ferramentas de gume único, é imprescindível, principalmente em virtude da necessidade de lubrificação das réguas de apoio. Como fluido recomendado para usinagem de ligas de alumínio encontram-

se as emulsões de óleo, em concentração mínima de 10% [4;6;23;24] e os óleos de corte [5;6;9;23]. Também o querosene tem sua aplicação recomendada como fluido de corte [9].

3.9. Metodologia de ensaios

Com o intuito de determinar a influência das variáveis do processo sobre a qualidade final dos furos alargados, ou seja, sobre a qualidade superficial (rugosidade), qualidade dimensional (diâmetro/tolerância) e qualidade de forma (circularidade), além das considerações econômicas, deve ser feita uma combinação destas entre si. Esta combinação deve ser feita de maneira que apenas uma das variáveis sofra alteração, mantendo-se as outras variáveis constantes, permitindo verificar a influência de cada uma delas, separadamente, sobre a qualidade final dos furos [25].

Optou-se por iniciar os experimentos com as condições fornecidas pela literatura. Quando não existem recomendações, ou seja, quando é dada uma faixa de condições, procurou-se iniciar os ensaios em condições intermediárias da faixa recomendada (como é o caso das velocidades de corte, avanço e sobremedida de usinagem).

A qualidade dos furos e as forças de usinagem obtidas no alargamento de precisão com ferramentas de gume único regulável são variáveis dependentes da função

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), \quad (7)$$

onde $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ são variáveis independentes, neste

trabalho denominadas de variáveis do processo.

O número de repetições para cada conjunto de variáveis independentes deve ser, segundo Schneider [25], de no mínimo igual a três, por motivos estatísticos. No entanto, como o número de ensaios resulta muito grande quando o número de variáveis independentes e o número de variações de cada variável independente também é grande, torna-se demasiado onerosa a adoção desta prática [26].

No presente trabalho, a metodologia adotada será a realização de cada combinação de variáveis apenas uma vez. Havendo dúvida quanto aos resultados, o ensaio será repetido. Em caso de ocorrer uma nítida inferioridade de uma condição testada quanto à qualidade dos furos obtida em relação às outras, a mesma será abandonada. Com isto pretende-se chegar a um bom nível de conhecimento de como obter furos de boa qualidade através de um número de ensaios pequeno, mesmo em detrimento de um conhecimento mais profundo sobre o comportamento de cada variável.

Uma análise estatística mais completa para verificação de desvios e dispersão dos valores de rugosidade, sobremedida dos furos e forças de usinagem foi feita para uma amostra maior de furos executados em condições similares (vide anexo A).

CAPÍTULO 4

DESENVOLVIMENTO DOS EXPERIMENTOS

4.1. Preparação dos ensaios

Após a montagem do sistema para medição de forças de usinagem conforme 3.4.1., foi definida uma sequência de operações e procedimentos-padrão para usinagem dos furos nos corpos de prova, na furadeira radial Csepel RFh 75/1500. Estas operações consistem na preparação dos furos a serem alargados e no seu posterior alargamento com a ferramenta em teste. Com o objetivo de se manterem constantes as condições de preparação dos furos ao longo de todos os ensaios, de maneira que qualquer alteração nas características dos furos alargados se devesse somente às operações de alargamento final, com alargador de gume único, foi definida a seguinte sequência de usinagem: furo de centro, furação com broca helicoidal, alargamento de preparação com alargador convencional (múltiplos gumes) e alargamento final com alargador de gume único. A operação de alargamento de preparação foi introduzida com o objetivo de se obter um furo calibrado, com uma tolerância de fabricação de qualidade IT7 e com diâmetro conhecido, possibilitando um melhor controle da quantidade de material removido na operação de alargamento final. Apenas em alguns ensaios a etapa de alargamento de preparação foi abandonada, para verificação de sua real necessidade ou não.

Para controle das condições de usinagem empregadas em cada

corpo de prova, foi criada uma tabela de dados com as informações relativas a cada ensaio (vide exemplo no Anexo B).

4.2. Regulagem do alargador de gume único

A utilização de ferramentas do tipo empregado nos ensaios de alargamento exige uma regulagem do diâmetro e da inclinação do gume. Para esta regulagem é exigido um equipamento de alta precisão, sendo que o uso de aparelhos óticos de medição é desaconselhado [4]. Para esta tarefa utilizou-se um metroscópio horizontal (fig. 4.1), disponível no Laboratório de Metrologia (LABMETRO), de fácil operação e grande precisão (vide 3.5.1.).



FIG. 4.1 - Regulagem do alargador com auxílio de metroscópio horizontal

No caso da utilização deste tipo de alargador em indústrias, entretanto, é recomendado um dispositivo de regulagem mais simples, constando de dois relógios comparadores montados em uma coluna e posicionados de forma a apalpar o gume da ferramenta em dois pontos distintos, a uma distância conhecida. A ferramenta permanece fixa entre pontas [6:23].

Antes de iniciar o procedimento de uma nova regulagem do alargador, verificou-se o estado do gume do inserto em microscópio ótico (vide ítem 3.5.2.), de modo a conhecer as condições deste quanto a trincas ou desgaste (no caso deste já ter sido utilizado). Segundo o fabricante, para se obter melhores resultados, a troca de um inserto por outro, com posterior regulagem, deve seguir os seguintes passos:

- 1) Afrouxar os parafusos de ajuste (g) em uma volta.
- 2) Afrouxar parafusos de pressão (a).
- 3) Retirar inserto (e) e limpar assento.
- 4) Colocar novo inserto, pressionando-o contra o batente posterior (h).
- 5) Pressionar inserto radialmente contra assento e axialmente contra batente posterior, e apertar parafuso de pressão.
- 6) Apertar parafuso de ajuste em 3/4 de volta, em pré-ajuste.
- 7) Regular diâmetro e inclinação apertando parafusos de ajuste.
- 8) Com o gume a 0,02 mm da posição final, aproximadamente, reapertar parafuso de pressão.
- 9) Para regulagem final, apertar parafusos de ajuste aos poucos, até atingir diâmetro e inclinação desejados (fig. 4.2).

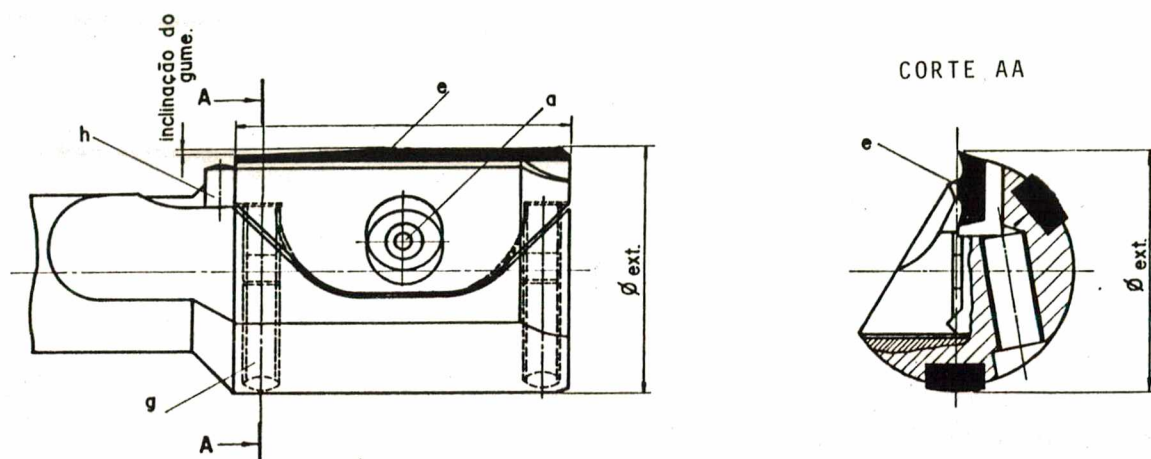


FIG. 4.2 - Alargador de gume único

Com o emprego do metroscópio horizontal para regulagem da ferramenta, faz-se necessário um cuidado especial com a força de medição empregada, de modo a evitar que os apalpadores, de metal-duro, possam prejudicar o gume de corte, também de metal-duro. Optou-se, portanto, por uma força de medição pequena (1 N). Forças de medição maiores trouxeram problemas de trincas no gume.

Como se deseja manter as condições de corte do gume da ferramenta a níveis aproximadamente constantes, de forma que as mesmas não influam sobre os resultados finais dos ensaios, os inserts foram substituídos após aproximadamente cada trinta furos.

4.3. Realização dos ensaios

4.3.1. Medição de forças de usinagem

Para medição do momento de torção e da força de avanço, utilizou-se um "software" desenvolvido por Rocha [22]. Com este "software" é possível tomar dez leituras de força durante o alargamento de um furo, sendo feito um tratamento estatístico dos dados (é fornecida a média dos dez valores e o desvio padrão). Cada ensaio foi identificado com relação aos seguintes dados:

- Executor do ensaio
- Data
- Hora
- Tipo da ferramenta
- Material da ferramenta
- Ângulo de saída
- Material usinado
- Índices de correção dos erros sistemáticos
- Velocidade de corte
- Avanço
- Número do experimento
- Número do furo
- Diâmetro da ferramenta

Estes dados, em conjunto com as folhas de ensaio, permitem um controle eficaz dos ensaios.

4.3.2. Velocidade de corte

Como a máquina-ferramenta só permite uma regulagem

escalonada das rotações da árvore, foram seleccionadas seis rotações que fornecessem velocidades de corte conforme indicação no ítem 3.8.1. Estas rotações, de 300, 375, 475, 600, 750 e 950 rpm, juntamente com a informação do diâmetro da ferramenta utilizada nos ensaios (12mm), permitiram obter, com ajuda da equação (3), as seguintes velocidades de corte:

11,3 - 14,1 - 17,9 - 22,6 - 28,3 - 35,8 m/min.

Tendo a máquina-ferramenta erros sistemáticos conhecidos (vide 3.7.1.), corrigiram-se os valores de velocidade de corte para:

11,8 - 14,7 - 18,6 - 23,5 - 29,4 - 37,2 m/min.

4.3.3. Avanços

Os avanços escolhidos para realização dos ensaios foram:

0,094 - 0,125 - 0,187 - 0,25 - 0,375 - 0,5 mm/rot.

Com este escalonamento é possível cobrir de maneira satisfatória o intervalo de avanços recomendados no ítem 3.8.2.

4.3.4. Sobremedida de usinagem

A faixa de sobremedidas de usinagem utilizada nos ensaios de alargamento foi restrita a um intervalo de 0,1 a 0,3 mm. Conforme ítem 3.8.3., são possíveis valores de sobremedida de usinagem de até 0,5 mm, para alumínio. Entretanto, com o aumento das forças de usinagem houve aumento de vibrações audíveis quando do emprego de avanços maiores que 0,3 mm, abandonando-se estes ensaios. Também para valores baixos de "a" ocorreram problemas de vibração e de falhas na superfície usinada (para a = 0,1 mm, em alguns

casos, não houve usinagem de toda a superfície do furo, permanecendo marcas da usinagem anterior).

Os valores de sobremedida de usinagem, determinados pela diferença entre o diâmetro do furo de preparação e o diâmetro final, ficaram bem definidos com a introdução de uma operação de alargamento de preparação com alargadores convencionais, antes do alargamento final. Isto implica em uma incerteza quanto ao valor de "a" de menos de 0,02 mm, visto que os furos pré-alargados foram obtidos em um campo de tolerância da classe IT7.

4.3.5. Inclinação do gume

Com o objetivo de verificar a influência da inclinação do gume sobre a qualidade dos furos, foram realizados ensaios com as seguintes inclinações :

0,006 - 0,009 - 0,014 - 0,019 mm/10 mm de comprimento.

4.3.6. Ângulo de saída

Foram testados ângulos de saída de 15° e 6° para insertos de metal-duro, e de 0° para insertos de PKD.

4.3.7. Fluido de corte

Devido ao amplo uso de emulsões de óleo na indústria aeronáutica, a importância deste tipo de fluido de corte na indústria em geral e as recomendações da literatura para uso deste fluido de corte para usinagem de alumínio, testaram-se emulsões de óleo em concentrações de 5%, 10% e 20%. Dois tipos de

óleo de corte neutros, com viscosidades diferentes, foram testados. Os óleos de corte, denominados para efeito de reconhecimento posterior de óleo A e óleo B, têm as seguintes especificações, conforme ensaios feitos no Laboratório de Química Tecnológica da U.F.S.C.:

Óleo A: viscosidade cinemática = 170 SUS a 100^oF
ponto de fulgor = 198^oC

Óleo B: viscosidade cinemática = 70 SUS a 100^oF
ponto de fulgor = 138^oC

Também o querosene foi testado como fluido de corte.

4.3.8. Suporte pendular

O uso de suporte pendular é recomendado para os casos onde haja dúvida quanto à coaxialidade entre a árvore da máquina-ferramenta e o centro do furo de preparação, como é o caso da usinagem do furo de preparação em uma árvore e o alargamento final em outra [4]. Na realização dos ensaios de usinagem foram executados alargamentos de três maneiras diferentes, quanto à utilização de suporte pendular:

a) Todas as operações (furo de centro, furo com broca, alargamento de preparação e alargamento final) foram feitas mantendo-se a árvore da máquina em uma posição fixa. Entre uma operação e outra, apenas as ferramentas foram trocadas.

b) Todas as operações com a árvore em uma posição fixa. Entretanto, para a operação de alargamento final, a ferramenta

foi fixada ao suporte pendular, ao invés de ser rigidamente fixada à árvore.

c) As operações de preparação dos furos até o alargamento de preparação foram realizadas em uma fixação. Entretanto, para o alargamento final, a árvore da máquina foi deslocada da posição anterior e recolocada visualmente em posição de executar a operação final. Como a máquina permite apenas o posicionamento visual da árvore, é praticamente impossível evitar os erros de coaxialidade entre a árvore e o furo de preparação. Com o uso de suporte pendular na última operação pretende-se verificar a eficácia do mesmo na tarefa de eliminar falhas de coaxialidade.

O suporte pendular empregado permite a correção axial e do jogo radial.

4.3.9. Alargamento de preparação

A operação de alargamento de preparação, realizada com o objetivo de obter um furo calibrado antes do alargamento final, representa um aumento substancial no tempo total de usinagem, com óbvias implicações nos custos. Em virtude disto, é desejável a eliminação desta operação. Para verificar esta possibilidade, foram executados ensaios sem esta etapa, ou seja, o alargamento final foi feito logo após a operação de furação com broca.

4.3.10. Tolerância dimensional

Segundo Koenig [26], as operações de alargamento podem normalmente atingir tolerâncias até a classe IT6 e, em casos especiais, até a classe IT4. O fabricante do alargador de gume

único testado [23] afirma ser possível trabalhar em tolerâncias até IT6, o que, para um diâmetro de 12 mm, representa uma faixa de 0,011 mm (diâmetro de 12,000 a 12,011 mm, para tolerâncias H6). Atkey [27] cita exemplos onde tolerâncias IT4 são mantidas com ferramentas de gume único para alargamento.

Nos ensaios realizados procurou-se manter a tolerância na classe IT7, usual para operações de alargamento. Para atingir esta tolerância, regulou-se o alargador de acordo com a seguinte fórmula sugerida por Striegl [24] e pelo fabricante da ferramenta [6].

$$\begin{array}{l} \text{Diâmetro} \\ \text{regulado} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Menor dimensão} \\ \text{do furo} \end{array} + 40\% \begin{array}{l} \text{Campo de} \\ \text{tolerância} \end{array} \quad (8)$$

Esta fórmula prevê um aumento no diâmetro do furo em relação ao diâmetro da ferramenta, normal no alargamento de furos em alumínio.

Para diâmetros de 12 mm, a tolerância para qualidade IT7 representa uma faixa de 0,018 mm (diâmetro de 12,000 a 12,018 mm, para tolerâncias H7). Utilizando a fórmula acima, temos que o diâmetro da ferramenta deve ser regulado em 12,007.

Com o intuito de verificar a afirmação de que a tolerância poderia ser mantida no campo IT6 (tolerância H6), também foram realizados ensaios nesta faixa. Ainda utilizando a fórmula apresentada para regulagem do diâmetro da ferramenta, este resultou 12,004 mm.

4.4. Verificação da qualidade dos furos

4.4.1. Rugosidade

Em operações de alargamento com alargadores convencionais de múltiplos gumes, obtém-se normalmente rugosidades R_a entre 0,8 e 2,0 μm (R_t aproximadamente entre 6 e 14 μm), conforme as condições de usinagem escolhidas [28]. Estas informações estão de acordo com os resultados apresentados por Chengzhou [29]. Em alumínio aeronáutico, Araújo [31] obteve rugosidades R_a entre 0,3 e 2,0 μm , também com alargadores convencionais. Com alargadores de gume único do tipo empregado nos ensaios, segundo Striegl [24] e Christoffel [4], é possível obter rugosidades R_t entre 1 e 6 μm .

A medição de rugosidade da superfície dos furos feitos com ferramenta de gume único foi realizada com o rugosímetro descrito no item 3.6.2. (fig. 4.3). Para cada furo foram feitas medições de rugosidade R_a e R_t em três pontos distintos. Destes valores foi tomada a média e considerada como a rugosidade do furo. Havendo uma diferença significativa entre as três medições, fez-se um número maior de medições e uma análise estatística mais completa.

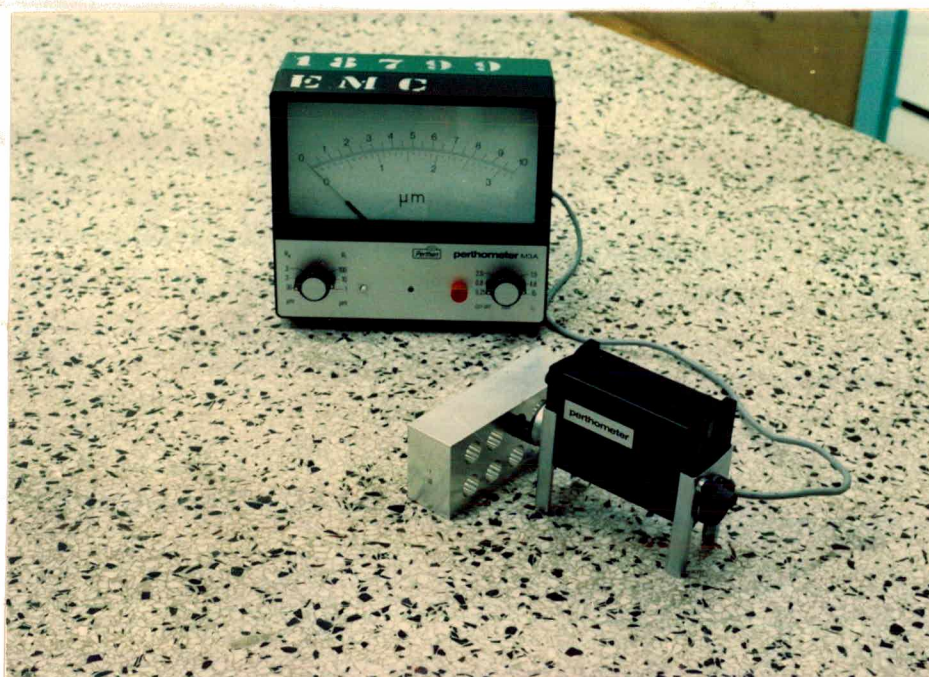


FIG. 4.3 - Medição de rugosidade

4.4.2. Circularidade

Em ensaios de alargamento com alargadores convencionais, em alumínio aeronáutico, obtiveram-se valores de circularidade de 2 a 10 μm , em condições normais de usinagem. Com ferramentas do tipo empregado neste trabalho obtém-se circularidades de 1 a 6 μm , segundo Christoffel [4] e Strlegl [24].

Na medição de circularidade dos furos ensaiados foi empregado o equipamento descrito no item 3.6.3. (fig. 4.4). A circularidade dos furos foi medida a 1/3 e a 2/3 da altura destes, objetivando verificar possíveis diferenças de qualidade com a variação da profundidade. Em vista da quantidade de furos ensaiados, apenas alguns destes, escolhidos de maneira a permitir a visualização da variação da qualidade com a variação das condições de usinagem, tiveram sua circularidade medida.

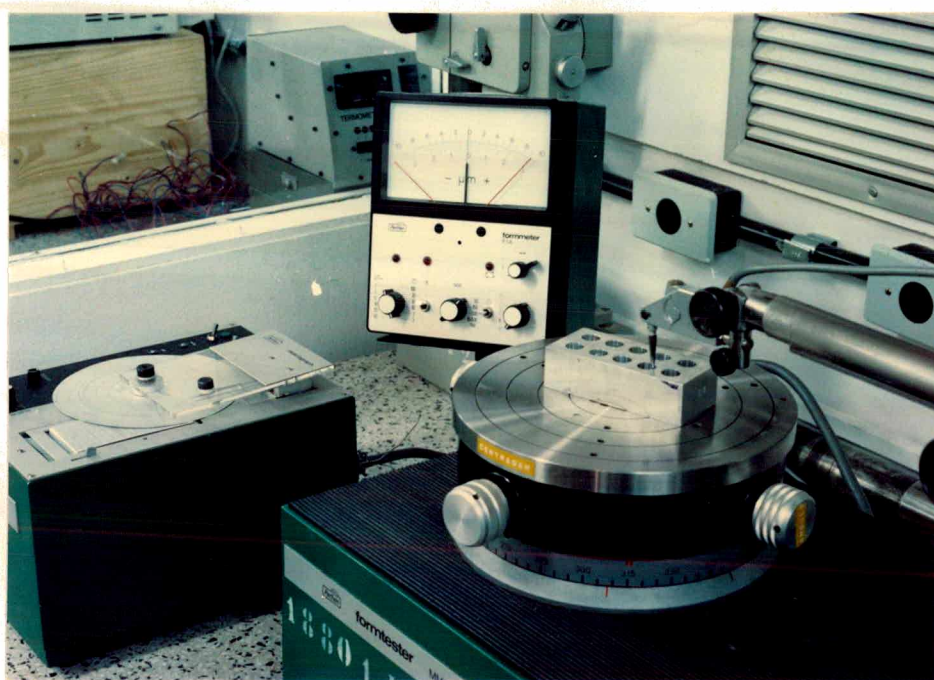


FIG. 4.4 - Medição de circularidade

4.4.3. Diâmetro

A medição do diâmetro dos furos foi feita com micrômetro interno em três alturas diferentes, com a intenção de detectar possíveis variações de medida (fig. 4.5). Com os valores de diâmetro dos furos e diâmetro da ferramenta, determinou-se a diferença entre estes, denominada sobremedida do furo. A determinação da sobremedida do furo visa prever qual a melhor regulagem da ferramenta, de maneira que o limite superior do campo de tolerância não seja ultrapassado.

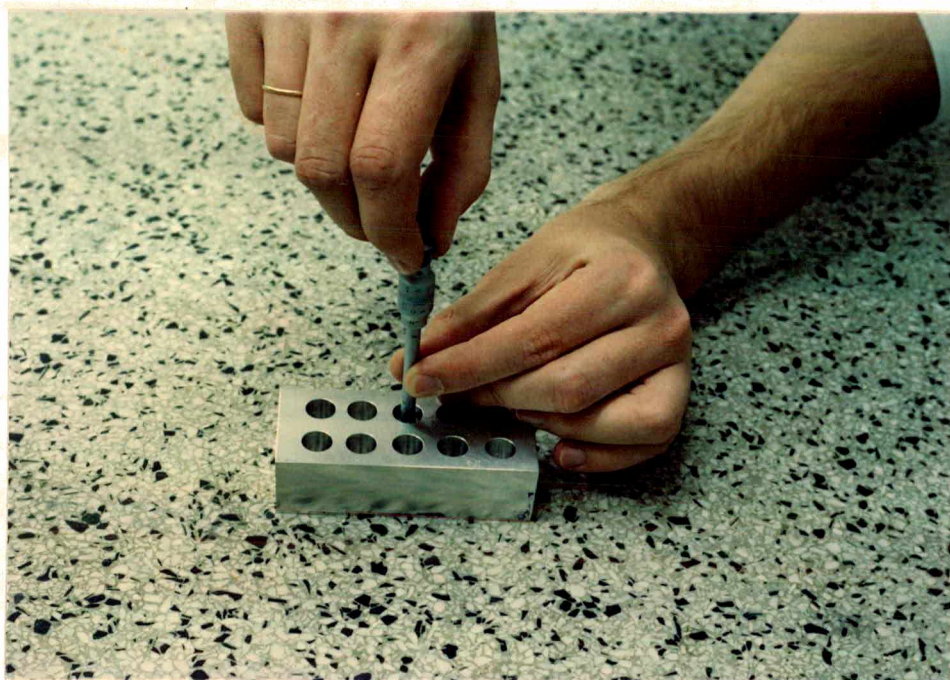


FIG. 4.5 - Medição de diâmetros

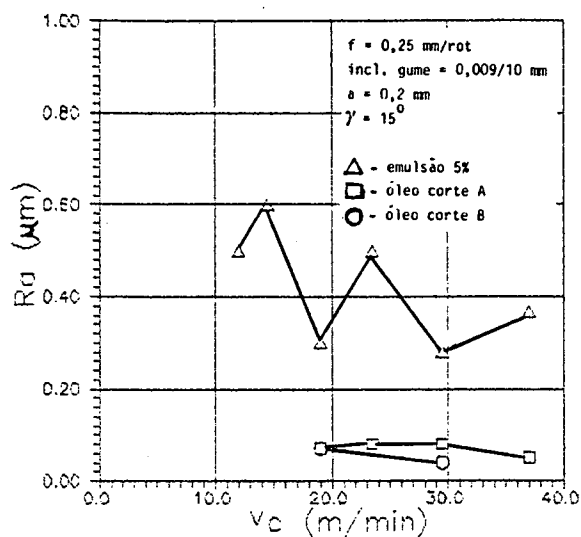
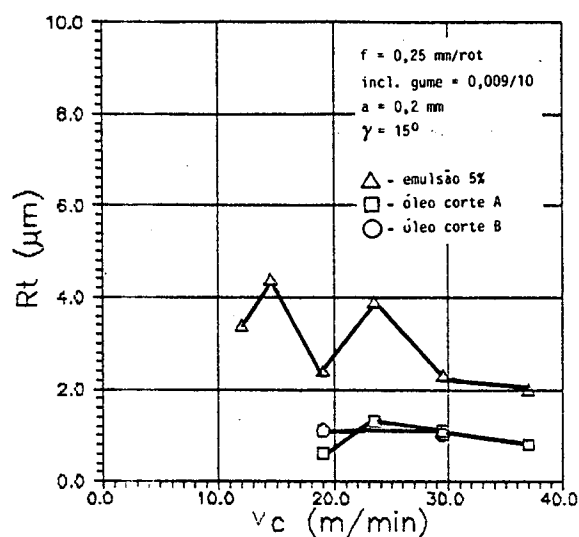
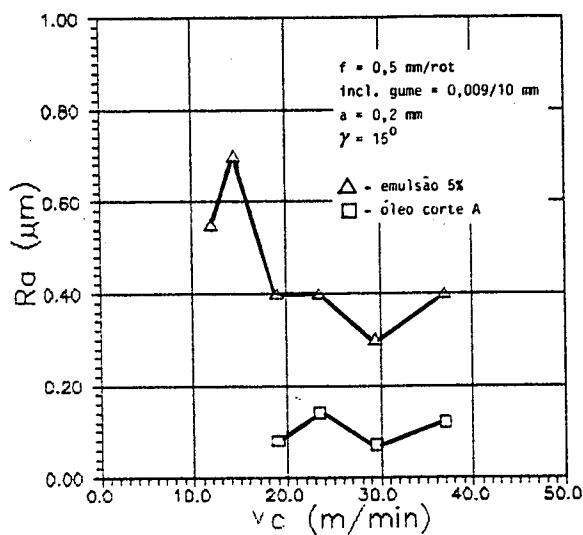
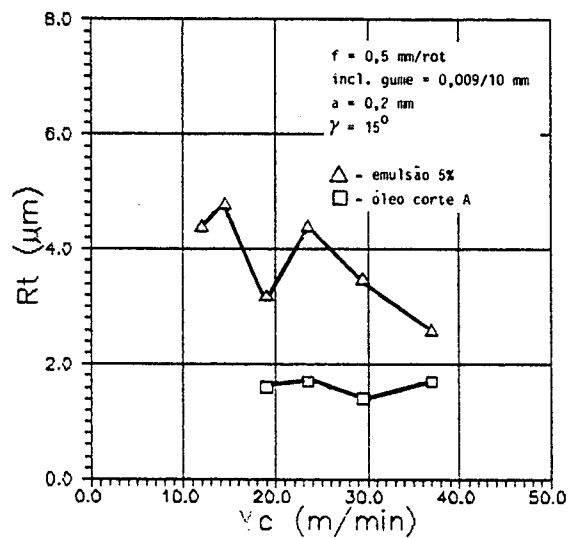
CAPÍTULO 5

ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. Rugosidade

5.1.1. Influência da velocidade de corte

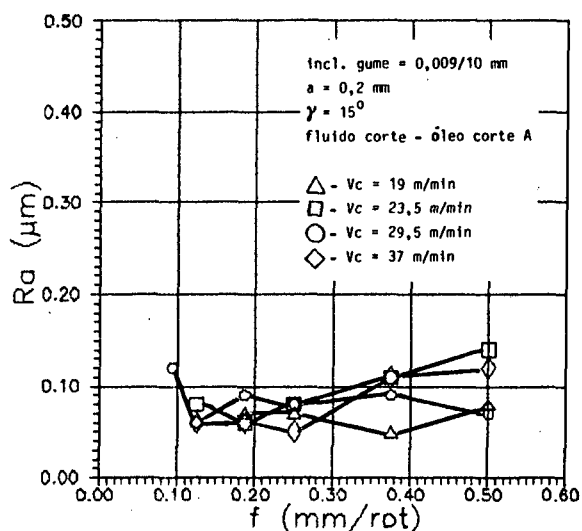
Nos ensaios realizados, a velocidade de corte dentro do intervalo testado de 12 a 37 m/min, mostrou não ter grande influência sobre a qualidade superficial dos furos, quando o fluido de corte usado foi o óleo de corte. Entretanto, a maioria dos ensaios realizados com as emulsões de óleo mostra uma tendência de queda na rugosidade com o aumento da velocidade de corte (fig. 5.1, gráficos 1, 2, 3 e 4). Também para alargamento de furos com alargadores convencionais não se percebe uma variação significativa da rugosidade com o aumento da velocidade de corte [29].

GRAF. 1 - Ra x v_cGRAF. 2 - Rt x v_cGRAF. 3 - Ra x v_cGRAF. 4 - Rt x v_cFIG. 5.1 - Influência de v_c sobre Ra e Rt

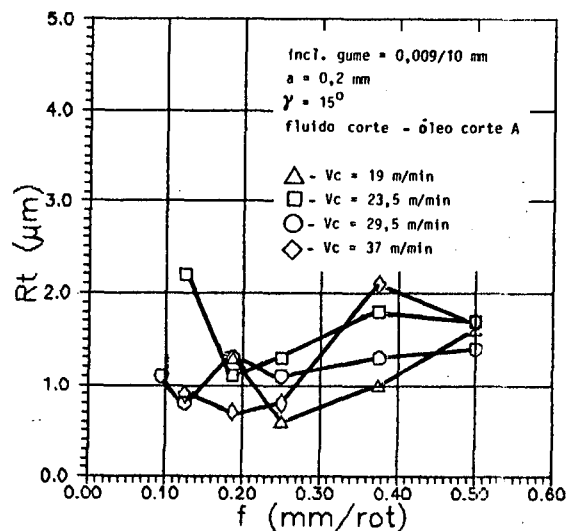
5.1.2. Influência do avanço

Segundo Chengzhou [29], na usinagem de furos com alargadores convencionais há um significativo aumento da rugosidade com o aumento do avanço. Da mesma forma, é de se esperar a mesma tendência com o uso de alargadores de gume único. Os resultados

dos ensaios mostraram um aumento da rugosidade com o aumento do avanço, para os fluidos de corte com baixo poder de lubrificação, como as emulsões de óleo. Entretanto, praticamente não ocorreu uma variação da rugosidade dentro dos limites de avanço de 0,1 a 0,5 mm/rot com o uso de óleos de corte como fluido de corte (fig. 5.2, gráficos 5, 6, 7 e 8). Estes resultados podem ser justificados pela existência das réguas de apoio nos alargadores de gume único, que promovem um alisamento da superfície já usinada e uma conseqüente diminuição da rugosidade. Pode-se perceber ainda que a efetividade das réguas de apoio é aumentada com melhores condições de lubrificação.

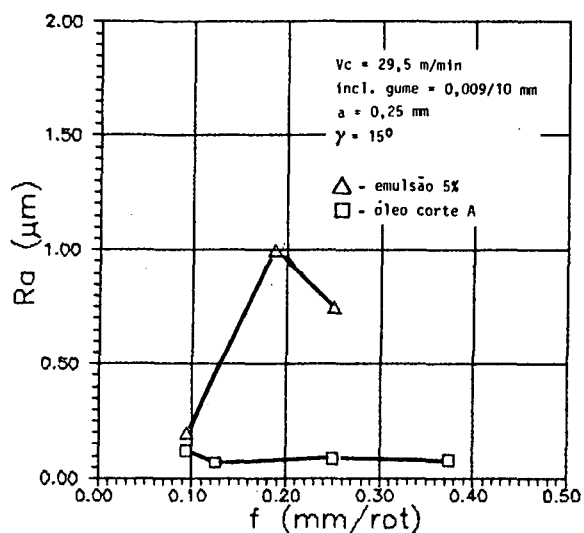


GRAF. 5 - Ra x f

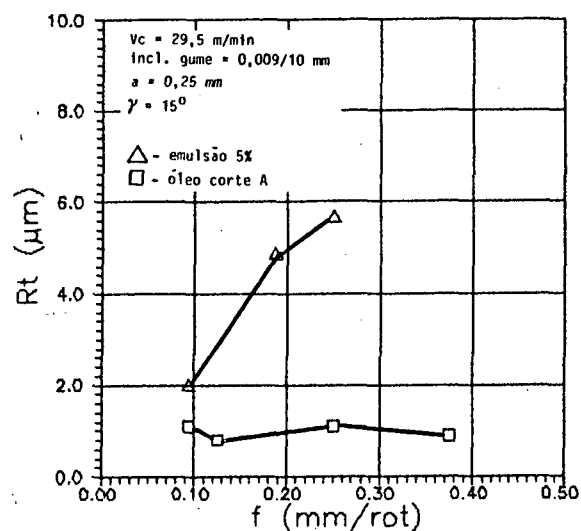


GRAF. 6 - Rt x f

Fig. 5.2 - Influência de f sobre Ra e Rt (continua)



GRAF. 7 - Ra x f



GRAF. 8 - Rt x f

FIG. 5.2 - Influência de f sobre Ra e Rt

5.1.3. Influência da inclinação do gume

Verifica-se que a inclinação do gume influi na qualidade superficial do furos. Quanto maior a inclinação do gume, maior a rugosidade, ou seja, pior a qualidade superficial (fig. 5.3, gráficos 9, 10, 11 e 12). Este é um resultado previsível, visto que com o aumento da inclinação do gume deve aumentar a rugosidade cinemática, da mesma forma que a mesma aumenta com a diminuição do raio das ferramentas nas operações de mandrilamento e torneamento (vide 2.7., equação 4).

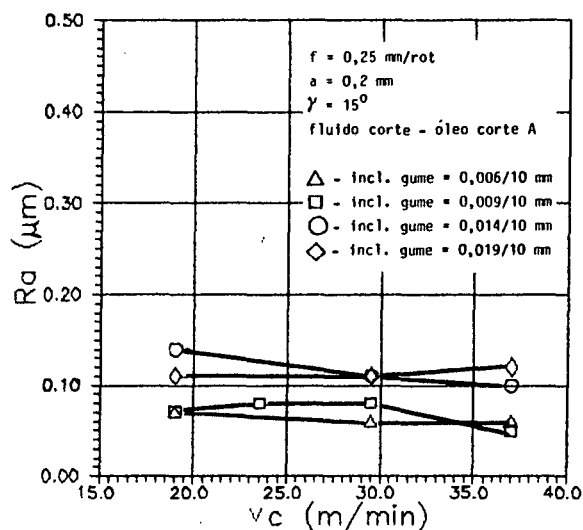
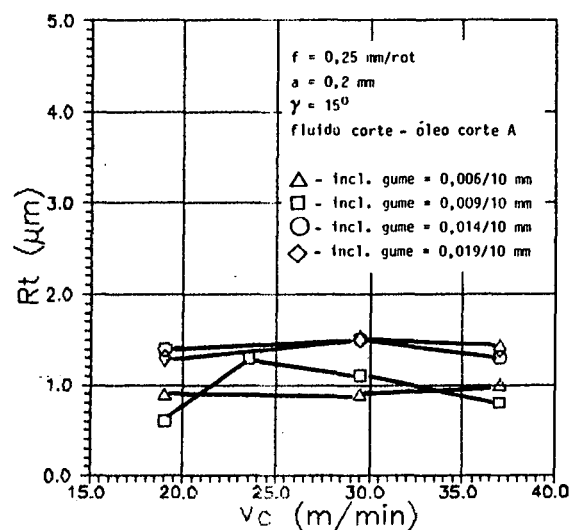
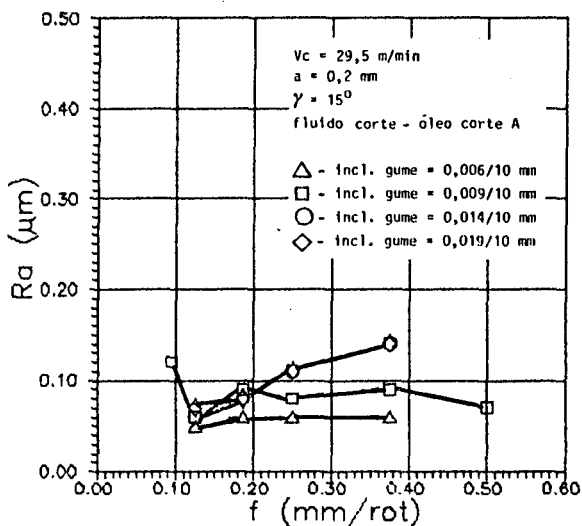
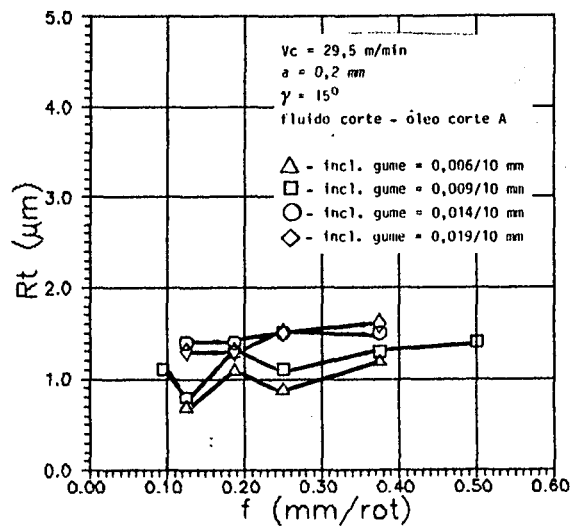
GRAF. 9 - Ra x v_c GRAF. 10 - Rt x v_c GRAF. 11 - Ra x f GRAF. 12 - Rt x f

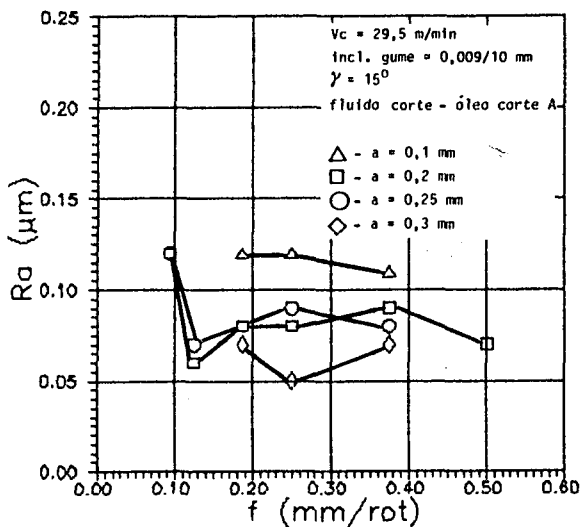
FIG. 5.3 - Influência da Inclinação do gume sobre Ra e Rt

5.1.4. Influência da sobremedida de usinagem

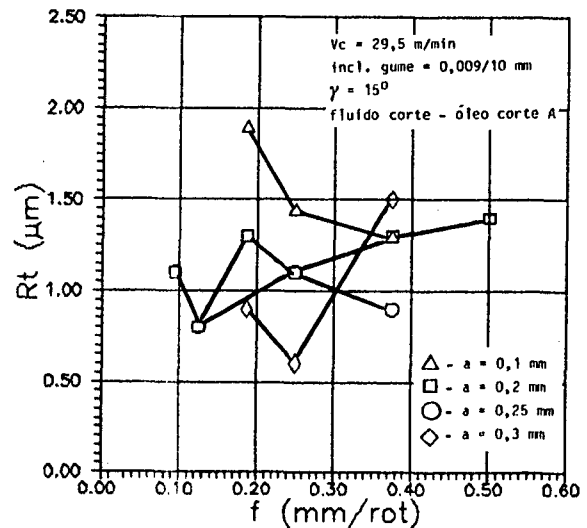
A variação da qualidade superficial para pequenas sobremedidas de usinagem ($a = 0,1 \text{ mm}$) foi muito grande nos ensaios realizados. Pode-se explicar este fato pela pequena

quantidade de material a remover, acontecendo em alguns pontos da superfície apenas um esmagamento do material, sem que houvesse um corte efetivo. Também é possível observar a existência de marcas da usinagem anterior (alargamento de preparação), mesmo após a operação de alargamento final, em alguns ensaios, evidenciando-se assim a inconveniência de profundidades de usinagem muito pequenas.

Os melhores resultados de rugosidade foram obtidos para sobremedidas de usinagem de 0,2 a 0,3 mm, onde há efetivamente um corte do material. Para profundidades ainda maiores, ocorreu um aumento de forças de usinagem e de vibrações audíveis, o que pode influenciar negativamente na vida da ferramenta, razão pela qual tais ensaios foram realizados em número bastante reduzido (fig. 5.4, gráficos 13 e 14).



GRAF. 13 - Ra x f



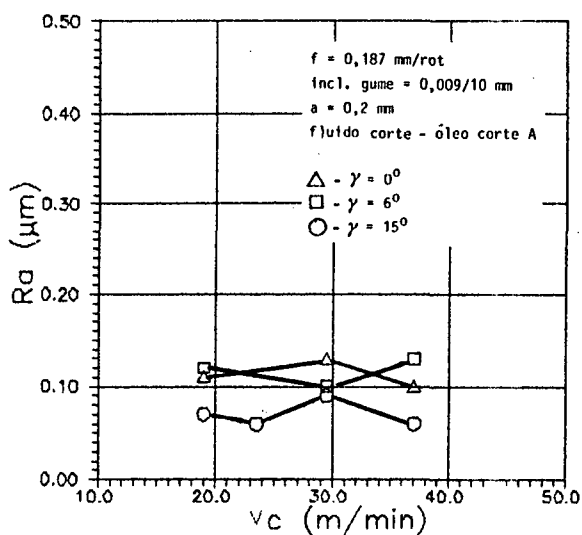
GRAF. 14 - Rt x f

FIG. 5.4 - Influência de "a" sobre Ra e Rt

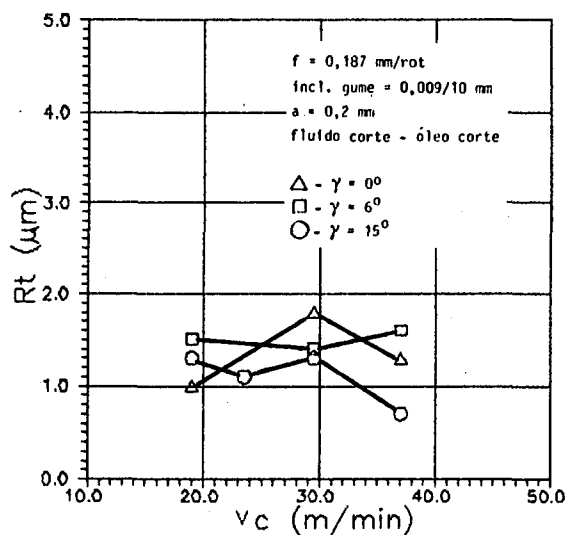
5.1.5. Influência do ângulo de saída

Na usinagem do alumínio, sendo este um material dútil, devem

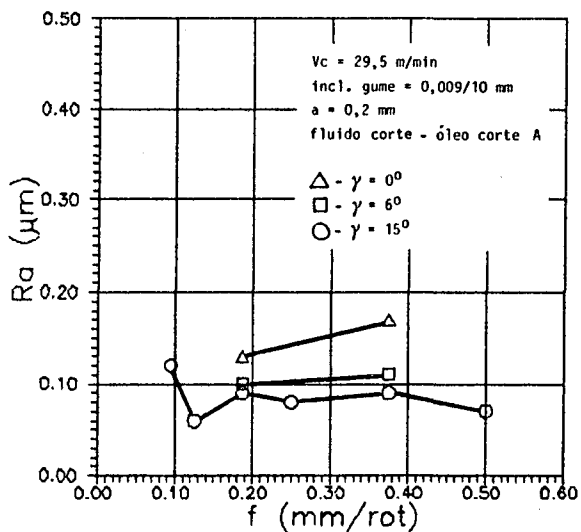
ser empregados ângulos de saída positivos de até 15° [10:24]. Nos ensaios de alargamento, com a diminuição do ângulo de saída, observou-se um aumento na rugosidade dos furos. Os gráficos 15, 16, 17 e 18 (fig. 5.5) mostram os resultados da influência do ângulo de saída sobre a rugosidade dos furos, para valores de $\gamma = 0^{\circ}$ (inserto de PKD), $\gamma = 6^{\circ}$ e $\gamma = 15^{\circ}$ (insertos de metal-duro).



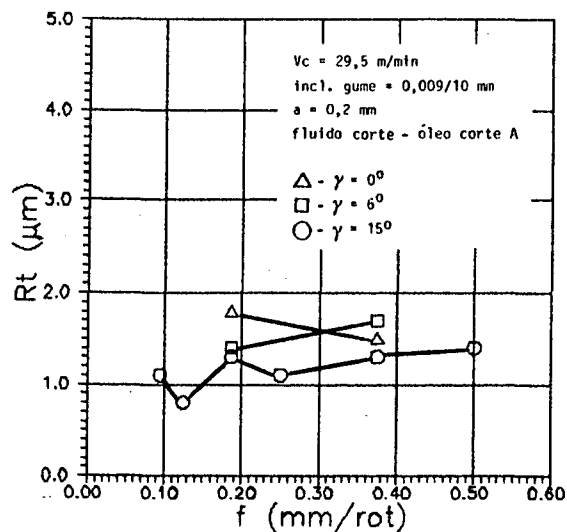
GRAF. 15 - $R_a \times V_c$



GRAF. 16 - $R_t \times V_c$



GRAF. 17 - $R_a \times f$

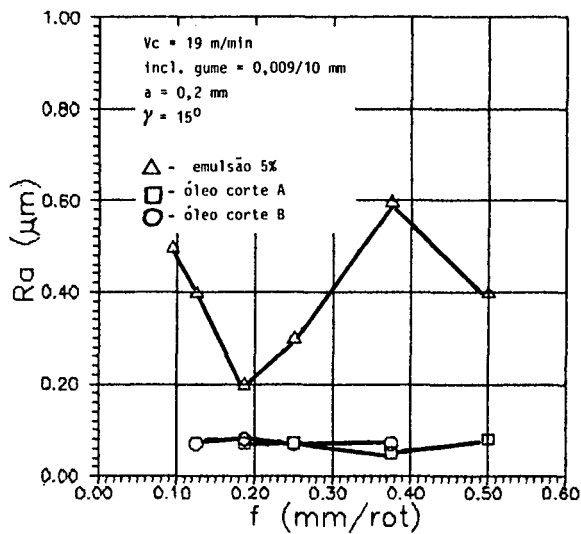


GRAF. 18 - $R_t \times f$

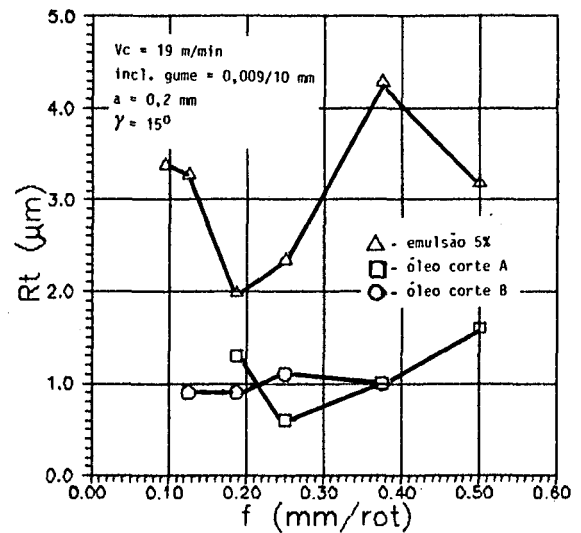
FIG. 5.5 - Influência de γ sobre R_a e R_t

5.1.6. Influência do fluido de corte

O fluido de corte mostrou-se um fator importante para a obtenção de furos com boa qualidade superficial. Com fluidos de corte com baixo poder de lubrificação, como emulsões de óleo e querosene, os resultados obtidos foram significativamente piores quanto à rugosidade do que com o emprego de fluidos de corte com maior poder de lubrificação, como os óleos de corte (fig. 5.6, gráficos 19, 20, 21 e 22).

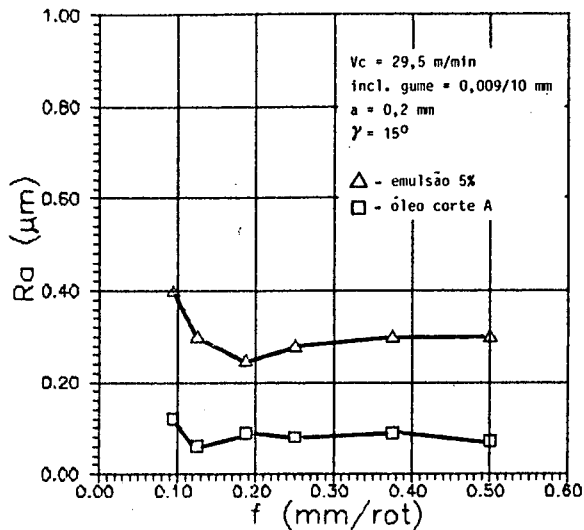


GRAF. 19 - Ra x f

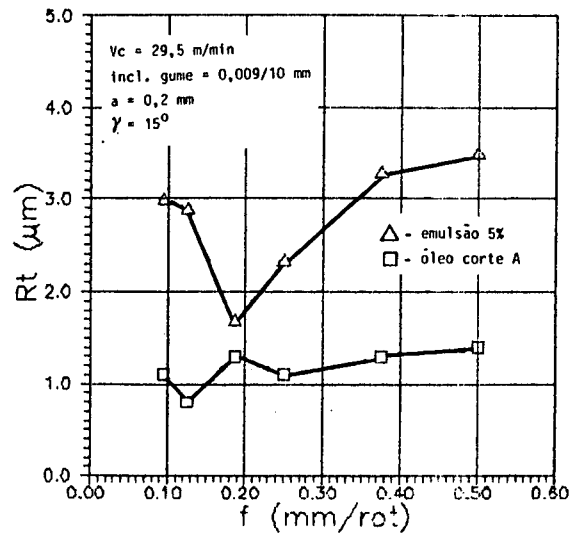


GRAF. 20 - Rt x f

Fig. 5.2 - Influência do fluido de corte sobre Ra e Rt (continua)



GRAF. 21 - Ra x f



GRAF. 22 - Rt x f

FIG. 5.6 - Influência do fluido de corte
sobre Ra e Rt

Mesmo com o emprego de emulsões com concentrações de até 20%, além da pior qualidade superficial, ocorreram furos com a superfície trepidada. Este fato pode ser explicado pela provável ocorrência do efeito "stick-slip", devido à má lubrificação das réguas de apoio. Com o emprego de óleo de corte obtiveram-se furos com a superfície espelhada, com rugosidades na ordem de 10 vezes menor do que as obtidas com o emprego de alargadores convencionais. A fig. 5.7 mostra furos com a superfície espelhada, obtidos através do alargamento com ferramentas de gume único e emprego de óleo de corte como fluido de corte.

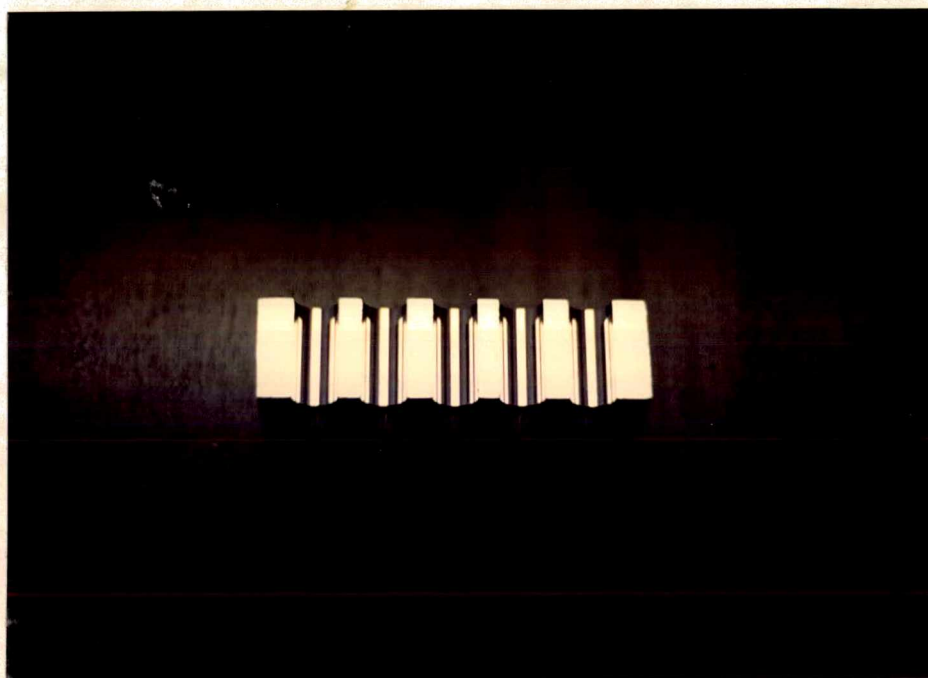


FIG. 5.7 - Furos com acabamento espelhado obtidos com alargadores de gume único

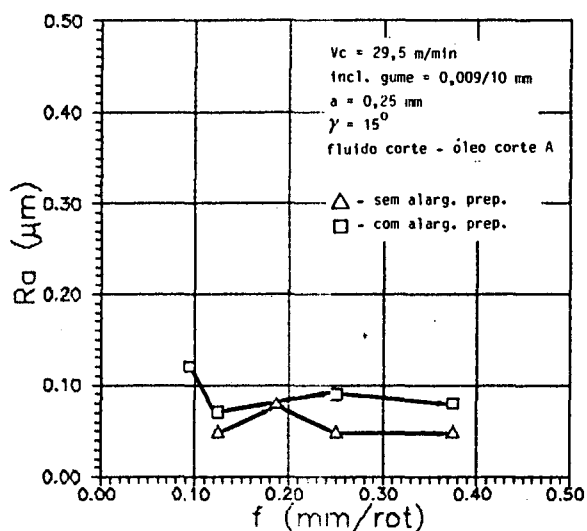
5.1.7. Influência do suporte pendular

O emprego de um suporte pendular conforme (tem b) de 4.3.8., levou a uma pequena piora na qualidade superficial, enquanto que para ensaios conforme o (tem c) de 4.3.8. a piora na qualidade superficial é bastante pronunciada. Pode-se explicar este fato pela menor estabilidade da ferramenta nos furos quando do uso de suporte pendular, já que o mesmo permite um jogo axial e radial. Este efeito é diverso do ocorrido com alargadores convencionais, mais estáveis quanto à própria construção (múltiplos gumes de corte).

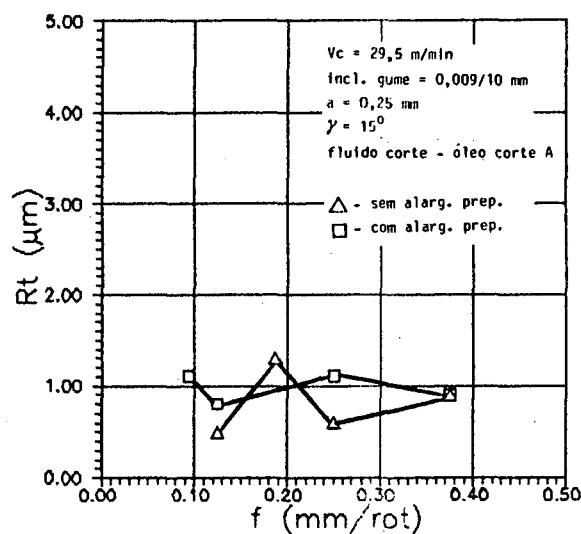
De um modo geral, pode-se concluir que o uso de suporte pendular com ferramentas de gume único não possibilita a produção de furos com melhor qualidade superficial.

5.1.8. Influência do alargamento de preparação

A operação de alargamento de preparação, que implica em maiores tempos de usinagem e maiores custos, não trouxe como consequência furos de melhor qualidade. Ensaio realizados com o alargamento final (com alargadores de gume único) logo após a furação com broca helicoidal trouxeram resultados similares aos obtidos com o uso de uma operação de alargamento de preparação com alargadores convencionais (fig. 5.8, gráficos 23 e 24).



GRAF. 23 - Ra x f



GRAF. 24 - Rt x f

FIG. 5.8 - Influência do alargamento de preparação sobre Ra e Rt

Nos ensaios com alargador de preparação e sem alargador de preparação manteve-se constante a sobremedida de usinagem. Isto foi feito considerando que a sobremedida dos furos feitos com broca helicoidal é maior do que aquela onde os furos foram feitos com alargador convencional, e que portanto a broca helicoidal utilizada nos furos de preparação deve ter um diâmetro menor do

que o alargador convencional de preparação, e menor no valor da diferença de sobremedida do furo resultante de um furo com broca e um furo com alargador convencional.

5.2. Circularidade

As medições de circularidade, feitas em furos executados sob diversas condições de usinagem, mostraram resultados semelhantes aos apresentados por Christoffel [4] e Striegl [24]. Segundo estes autores, o alargamento de furos com ferramentas de gume único do tipo empregado nos ensaios possibilita a obtenção de circularidades na faixa de 1 a 6 μm .

O fator de maior influência na circularidade foi o fluido de corte empregado. Enquanto que com o uso de emulsões de óleo as circularidades apresentaram valores mais elevados (de até 16 μm para furos onde a superfície ficou trepidada e de até 6 μm para furos sem trepidações na superfície), com óleos de corte foi possível alcançar valores de circularidade satisfatórios (de 1 a 4 μm).

Com a variação das demais variáveis do processo (velocidade de corte, avanço, sobremedida de usinagem, inclinação do gume e ângulo de saída) dentro dos limites empregados nos ensaios, não foram obtidos resultados conclusivos com relação à circularidade, a não ser que a mesma permaneceu dentro dos limites de 1 a 4 μm . Também com o uso de suporte pendular e eliminação de operação de alargamento de preparação não se verificaram variações perceptíveis quanto à circularidade.

Em ensaios de alargamento com alargadores convencionais

(múltiplos gumes), a circularidade situou-se dentro dos limites de 2 a $10\ \mu\text{m}$, em torno de duas vezes maior que a obtida com alargadores de gume único.

5.3. Forças de usinagem

A medição de forças de usinagem no processo de alargamento com ferramentas de gume único apresentou uma grande dispersão de valores de momento total de usinagem e de força de avanço, mesmo para ensaios feitos sob condições de usinagem constantes (vide anexo A). A análise dos resultados de forças de usinagem leva em conta a existência desta dispersão de valores, analisando apenas as tendências mostradas nos gráficos.

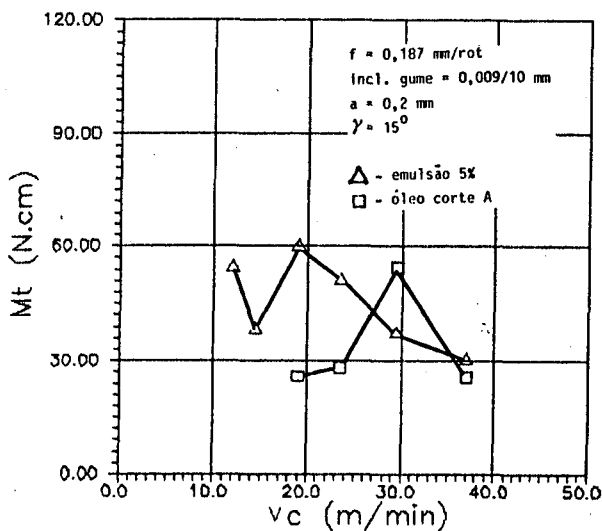
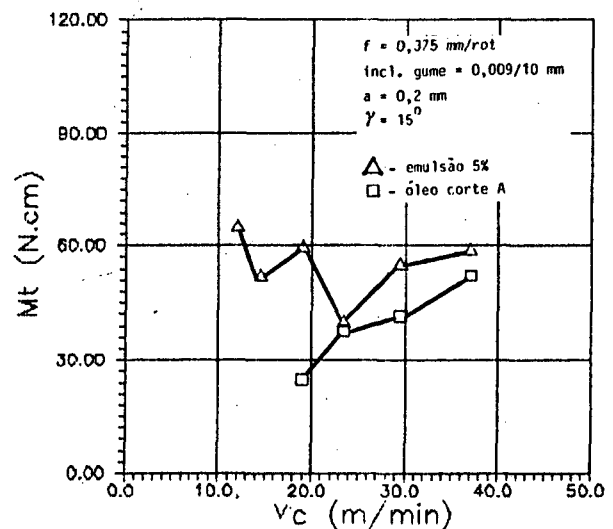
A construção de gráficos mais corretos implica na realização de um número bastante grande de ensaios, com vistas a uma análise estatística completa. Considerou-se que tal análise, além de onerosa, é desnecessária, visto que o estudo das forças de usinagem no presente trabalho tem importância secundária. O conhecimento da grandeza das mesmas serve para uma comparação com o processo de alargamento convencional e como auxílio à decisão sobre quais as melhores condições de usinagem, quando todos os outros parâmetros se equivalem, já que maiores forças de usinagem acarretam maiores esforços na ferramenta e vidas mais curtas.

5.3.1. Influência da velocidade de corte

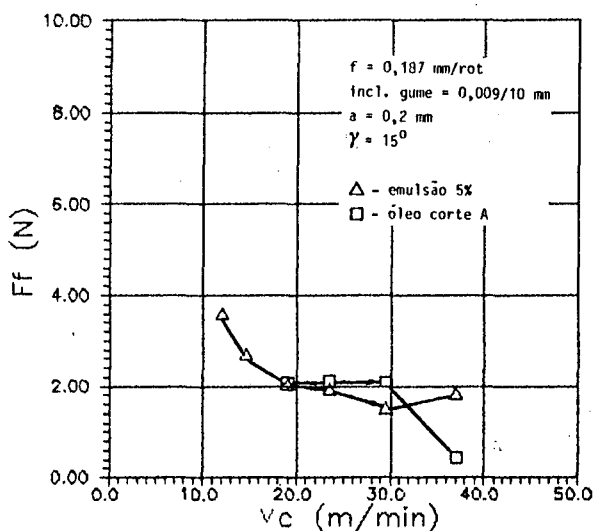
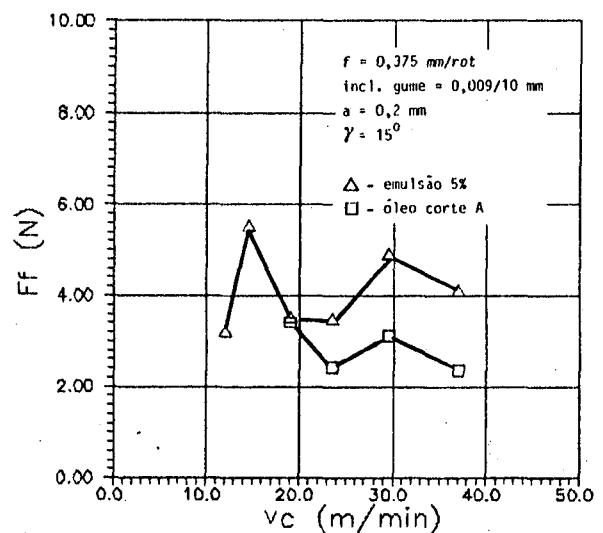
Os momentos totais de usinagem, obtidos para uma variação de velocidade de corte, apresentaram-se bastante irregulares, não

permitindo conclusões definitivas. Entretanto, é possível verificar que os mesmos mantêm uma tendência a valores constantes com o aumento da velocidade de corte (fig. 5.9, gráficos 25 e 26). São resultados que coincidem com a tendência que Chengzhou [29] encontrou no alargamento de alumínio puro (Al 98,4%, HV 33-36) com alargadores convencionais.

A grandeza dos momentos para o alargamento de Al 7075-T651 com alargadores de gume único apresentou a mesma ordem de grandeza que os momentos obtidos por Chengzhou [29] no alargamento de alumínio de alta pureza com alargadores convencionais, sob condições de usinagem semelhantes. Considerando-se que o alumínio puro apresenta menor resistência à usinagem que o alumínio aeronáutico, pode-se deduzir que os momentos são menores na usinagem com ferramentas de gume único, comparando-se com a usinagem com alargadores convencionais, mantendo-se constantes as condições de usinagem.

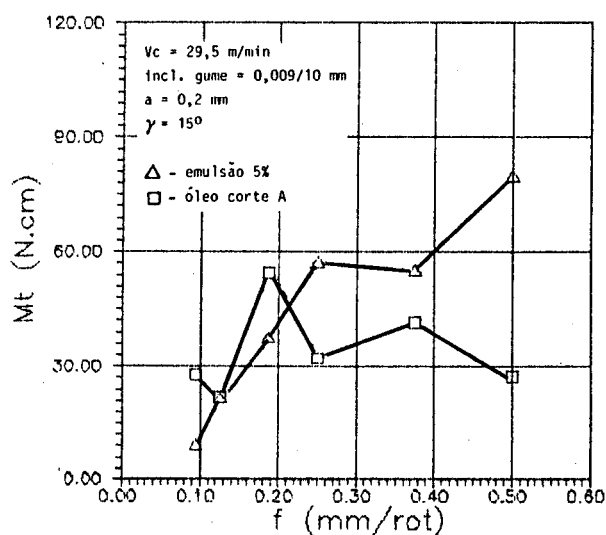
GRAF. 25 - Mt x v_c GRAF. 26 - Mt x v_c FIG. 5.9 - Influência de v_c sobre Mt

As forças de avanço apresentam um comportamento não conclusivo com a variação da velocidade de corte. Como tendência, pode-se verificar que os valores de força de avanço mantêm-se aproximadamente constantes ao longo do intervalo de velocidades de corte testadas (fig. 5.10, gráficos 27 e 28). Comparando-se os resultados dos ensaios realizados com alargadores de gume único com os obtidos por Chengzhou [29] com alargadores convencionais, verifica-se que as forças de avanço permanecem aproximadamente constantes com a variação da velocidade de corte. A tendência de diminuição com aumento da velocidade de corte no gráfico 27 não pode ser generalizada. Os valores de força de avanço obtidos com alargadores de gume único, para condições de usinagem semelhantes, são de 5 a 10 vezes menores do que os obtido com alargadores convencionais por Chengzhou [29].

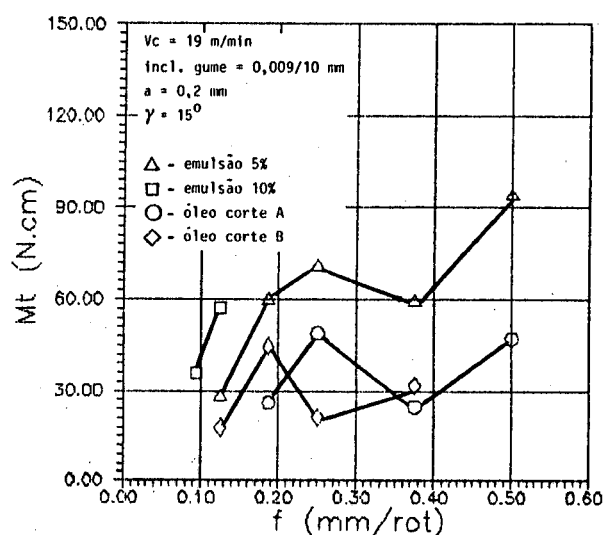
GRAF. 27 - $F_f \times v_c$ GRAF. 28 - $F_f \times v_c$ FIG. 5.10 - Influência de v_c sobre F_f

5.3.2. Influência do avanço

A variação da seção de cavaco com o aumento do avanço leva a uma alteração dos momentos totais de usinagem, no sentido de aumentá-los. (fig. 5.11, gráficos 29 e 30). Entretanto, os momentos verificados em ensaios onde o fluido de corte empregado foi uma emulsão de óleo, tiveram um aumento mais pronunciado do que os momentos verificados em ensaios onde o fluido de corte foi o óleo de corte. A maioria dos ensaios não mostra uma proporcionalidade entre o aumento dos momentos com o aumento de avanço, confirmando os resultados relatados por Chengzhou [29] no alargamento de alumínio puro com alargadores convencionais.



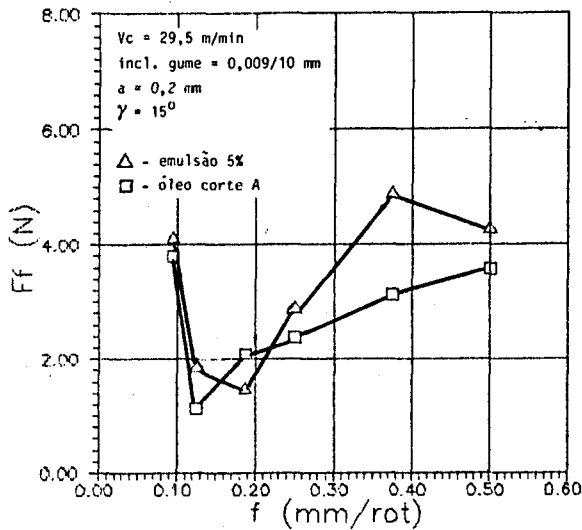
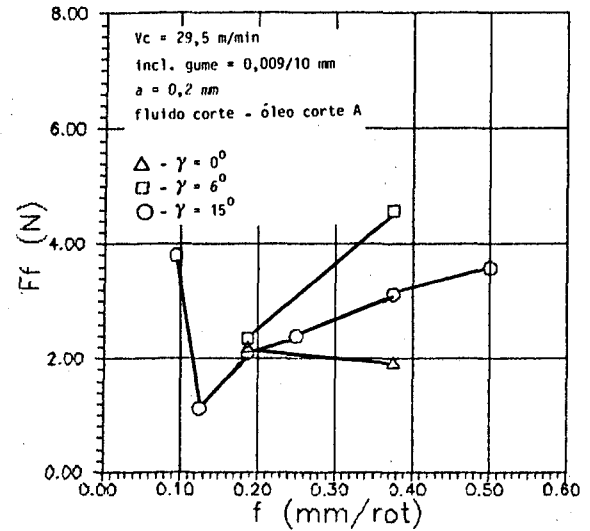
GRAF. 29 - Mt x f



GRAF. 30 - Mt x f

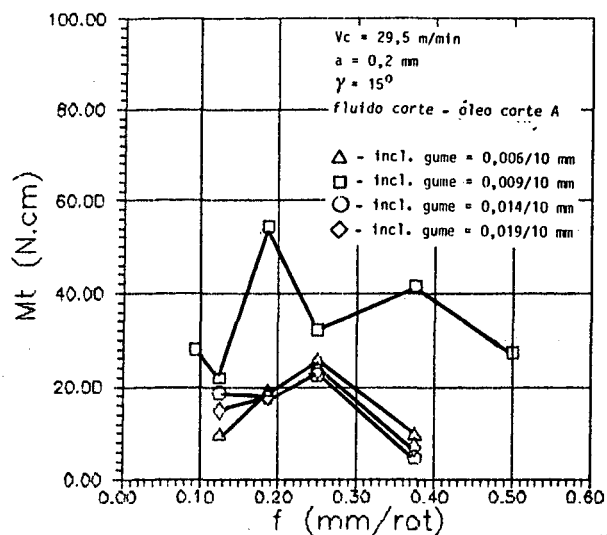
FIG. 5.11 - Influência de f sobre Mt.

A mesma tendência de aumento com o avanço, verificada para os momentos, acontece para as forças de avanço (fig. 5.12, gráficos 31 e 32).

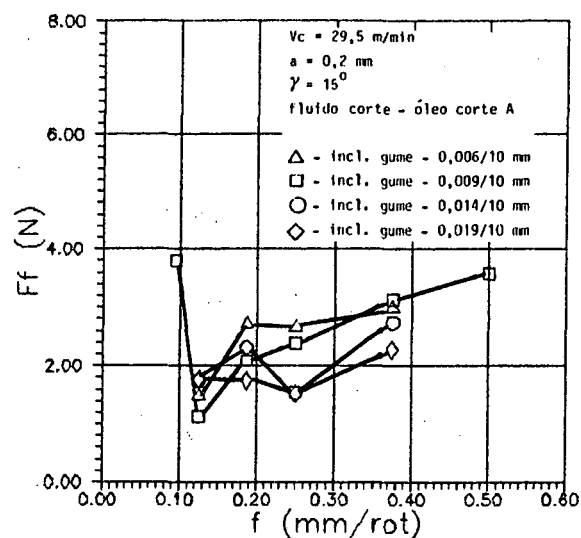
GRAF. 31 - $F_f \times f$ GRAF. 32 - $F_f \times f$ FIG. 5.12 - Influência de f sobre F_f

5.3.3. Influência da inclinação do gume

A influência da inclinação do gume sobre momentos e forças de avanço pode ser vista nos gráficos 33 e 34 (fig. 5.13). Pode-se verificar uma tendência de aumento, tanto nos momentos como nas forças de avanço, para uma diminuição na inclinação do gume. Este fato pode ser explicado pelo aumento das forças de atrito com a diminuição da inclinação, decorrente do aumento do contato do gume secundário com a parede do furo.



GRAF. 33 - Mt x f

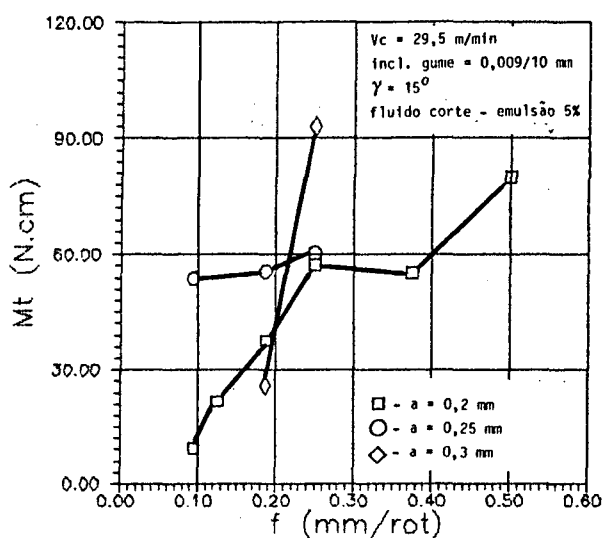


GRAF. 34 - Ff x f

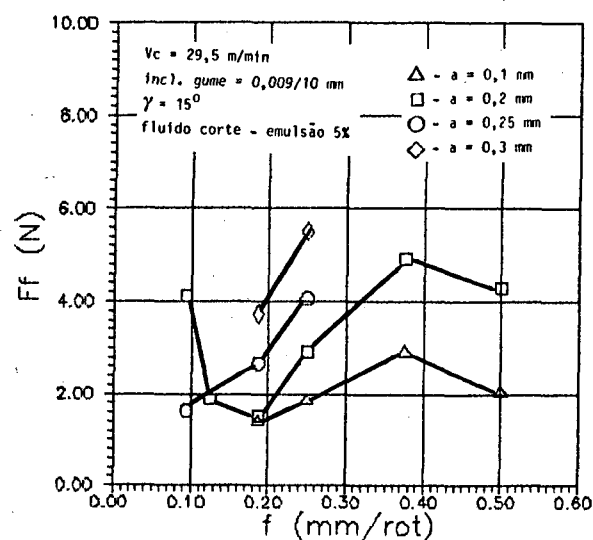
FIG. 5.13 - Influência da inclinação do gume sobre Mt e Ff

5.3.4. Influência da sobremedida de usinagem

O aumento da sobremedida de usinagem leva a um aumento da seção de usinagem (vide fig. 2.8). Em decorrência temos um aumento nos momentos e nas forças de avanço. Os resultados dos ensaios de alargamento com ferramentas de gume único são mostrados nos gráficos 35 e 36 (fig. 5.14). Isto também ocorre no alargamento com alargadores convencionais [29].



GRAF. 35 - Mt x f

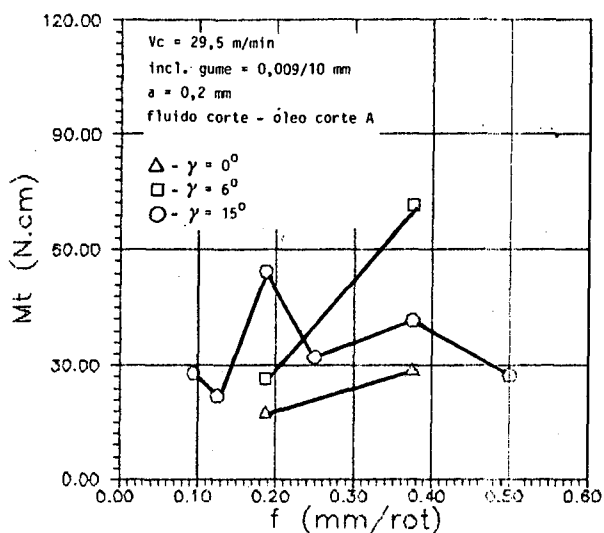


GRAF. 36 - Ff x f

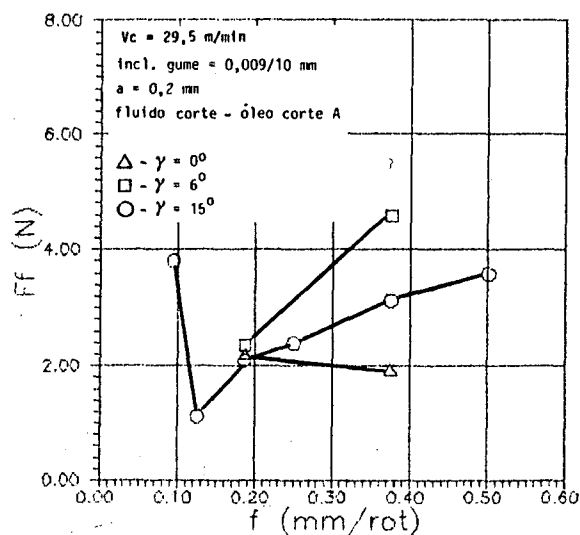
FIG. 5.14 - Influência de "a" sobre Mt e Ff

5.3.5. Influência do ângulo de saída

Os resultados das medições dos momentos totais de usinagem e forças de avanço obtidos nos ensaios com variação no ângulo de saída do inserto da ferramenta de gume único não permitem conclusões definitivas. Segundo Koenig [26], espera-se uma diminuição nos valores de forças com o aumento dos ângulos de saída, visto que a saída do cavaco e o corte são facilitados pelo aumento destes. Esta diminuição de forças ocorreu quando γ foi alterado de 6° para 15° , porém para γ de 0° ocorreram os menores valores de momento (fig. 5.15, gráficos 37 e 38). Uma explicação para tal fato pode ser o material do inserto, que para insertos com $\gamma = 0^\circ$ é o PKD, e não o metal-duro do qual são feitos os insertos com $\gamma = 6^\circ$ e $\gamma = 15^\circ$. Com ferramentas de PKD é possível produzir gumes mais afiados do que com metal-duro. Também o coeficiente de atrito do PKD com o cavaco é menor, o que tende a diminuir as componentes das forças de usinagem [30].



GRAF. 37 - Mt x f



GRAF. 38 - Ff x f

FIG. 5.15 - Influência de γ sobre Mt e Ff

5.3.6. Influência do fluido de corte

Da análise dos resultados de momentos e forças de avanço onde há alteração apenas do fluido de corte e mantém-se constantes todos os demais parâmetros, pode-se concluir que os fluidos de corte influem de maneira relevante na grandeza das forças de usinagem. Fluidos de corte com baixo poder de lubrificação, como as emulsões de óleo, levam a resultados de forças de usinagem maiores do que os fluidos de corte com alto poder de lubrificação, como os óleos de corte (fig. 5.16, gráficos 39, 40, 41 e 42). A diminuição das forças pode ocorrer devido à diminuição do atrito quando do uso de fluidos de corte com maior poder de lubrificação. Segundo Chengzhou [29], em operações de alargamento convencional (com alargadores de múltiplos gumes), o momento de atrito chega a representar 80% do momento total de usinagem, sendo a parcela do momento de corte responsável por apenas 20% do momento total.

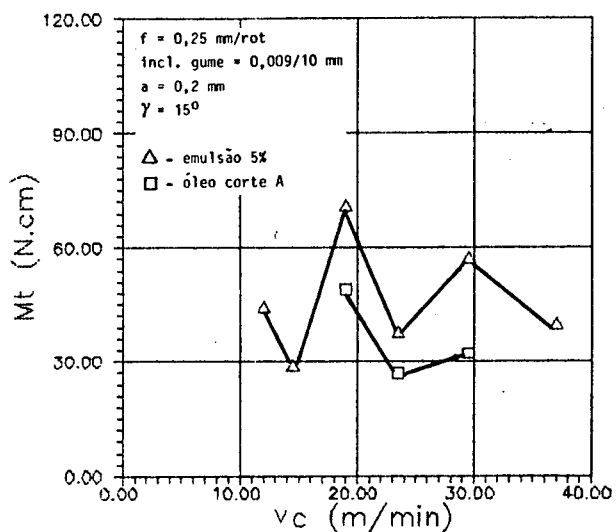
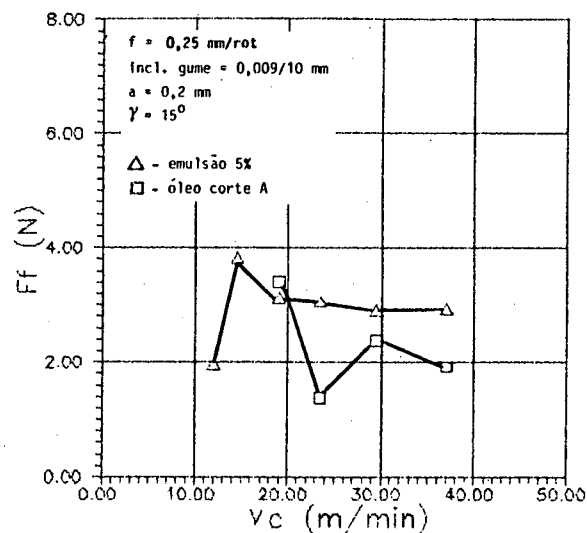
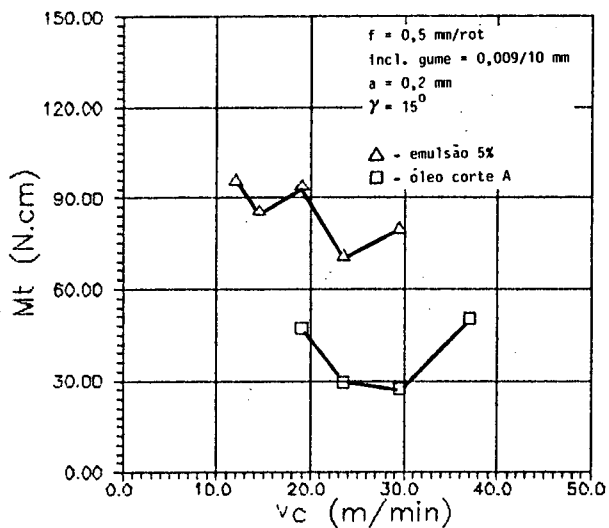
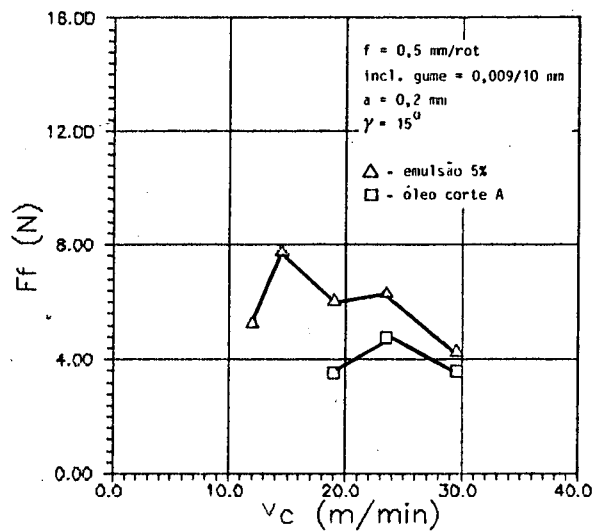
GRAF. 39 - Mt x v_c GRAF. 40 - Ff x v_c GRAF. 41 - Mt x v_c GRAF. 42 - Ff x v_c

FIG. 5.16 - Influência do fluido de corte

sobre Mt e Ff

5.4. Sobremedida dos furos

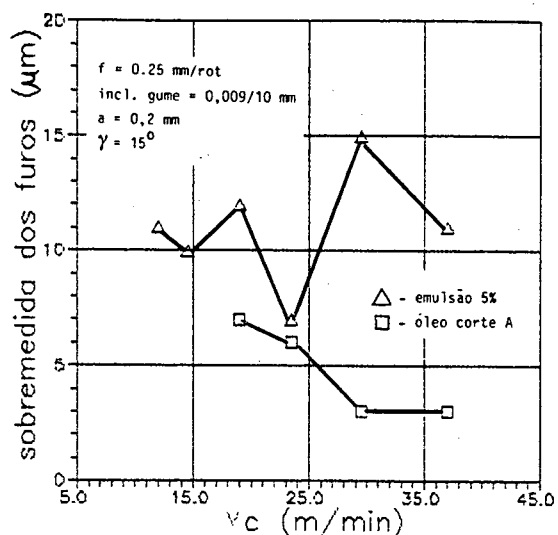
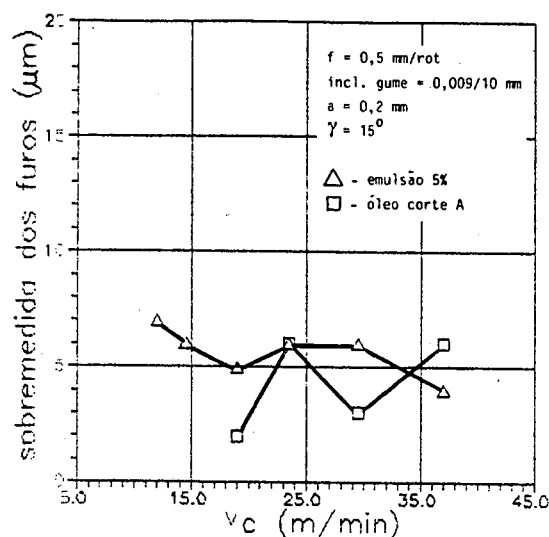
A sobremedida dos furos é definida como sendo a diferença entre o diâmetro dos furos e o diâmetro real da ferramenta. No

alargamento de alumínio é normalmente um valor positivo, ou seja, o diâmetro do furo resulta maior do que o da ferramenta. Nos ensaios realizados sob diversas condições de usinagem, a sobremedida dos furos apresentou um valor máximo de $15 \mu\text{m}$. Isto ocorreu, entretanto, para condições de usinagem não otimizadas. Em condições propícias, estes valores situaram-se em um patamar mais baixo.

Na usinagem de furos em Al 7075-T651 com alargadores convencionais são relatadas sobremedidas dos furos de $3 \mu\text{m}$ a mais de $25 \mu\text{m}$ [31].

5.4.1. Influência da velocidade de corte.

Através da análise dos resultados apresentados nos gráficos 43 e 44 (fig. 5.17), não é possível tirar conclusões definitivas sobre a relação entre os valores de sobremedida dos furos e a velocidade de corte. Aparentemente, porém, a sobremedida não é afetada pela velocidade de corte, dentro da faixa ensaiada (12 a 37 m/min).

GRAF. 43 - $\Delta_D \times v_c$ GRAF. 44 - $\Delta_D \times v_c$ FIG. 5.17 - Influência de v_c sobre a sobremedida dos furos

5.4.2. Influência do avanço

A figura 5.18 (gráficos 45 e 46) mostra a influência do avanço sobre a sobremedida dos furos. Os resultados de sobremedida de ensaios feitos com emulsões de óleo apresentam uma dispersão bastante grande, e não é possível verificar uma tendência dos valores de sobremedida com a variação do avanço. Entretanto, para ensaios realizados com óleo de corte, verifica-se uma leve tendência de queda na sobremedida dos furos à medida que o avanço é aumentado. Tais resultados são contrários à expectativa, visto que os demais ensaios mostram uma tendência de aumento na sobremedida dos furos com o aumento das forças de usinagem (com o aumento do avanço ocorre um aumento nas forças e, apesar disto, a sobremedida dos furos revela uma tendência de queda).

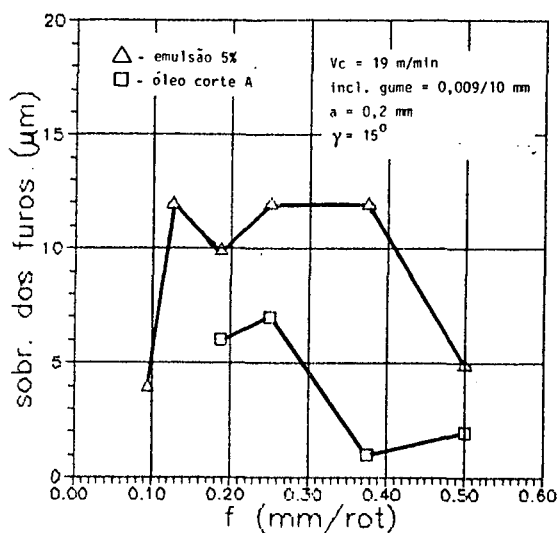
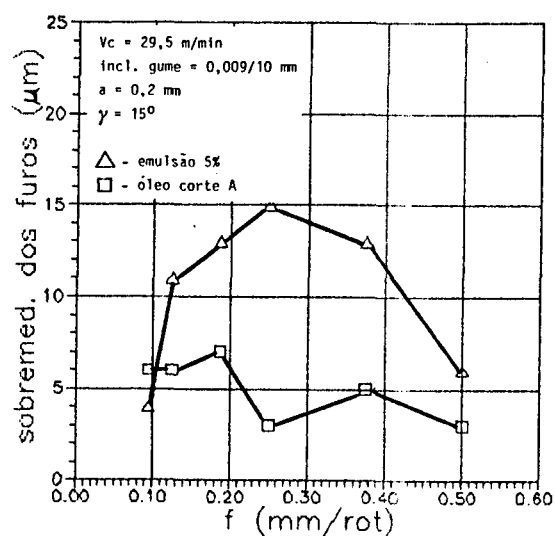
GRAF. 45 - $\Delta_D \times f$ GRAF. 46 - $\Delta_D \times f$

FIG. 5.18 - Influência de f sobre a sobremedida dos furos

5.4.3: Influência da Inclinação do gume

A sobremedida dos furos mostra sofrer uma influência da inclinação do gume, no alargamento com ferramentas de gume único. Nos gráficos 47 e 48 (fig. 5.19) pode-se verificar um aumento nas sobremedidas dos furos com a diminuição da inclinação do gume. Como a mesma também afeta os valores de momentos de corte (vide fig. 5.13), pode-se pensar em uma relação entre os valores de sobremedida e momento de corte. Os resultados levam a crer que um aumento nos momentos traz um acréscimo nas sobremedidas dos furos.

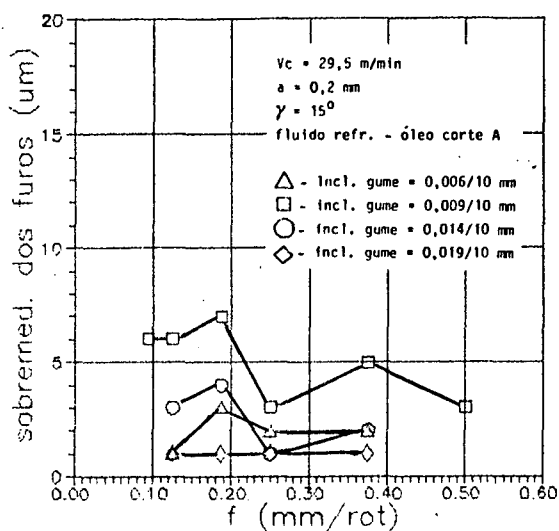
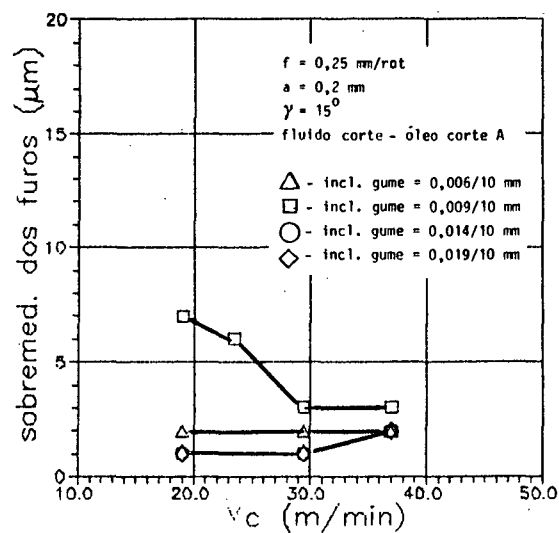
GRAF. 47 - $\Delta_D \times f$ GRAF. 48 - $\Delta_D \times v_c$

FIG. 5.19 - Influência da inclinação do gume sobre a sobremedida dos furos

5.4.4. Influência da sobremedida de usinagem

De uma maneira geral, os resultados do aumento da sobremedida de usinagem mostram uma tendência de aumento na sobremedida dos furos. Isto pode ser verificado nos gráficos 49 e 50 (fig. 5.20). Também este fato pode ser explicado pelo aumento do momento de corte, que ocorre com o aumento da sobremedida de usinagem.

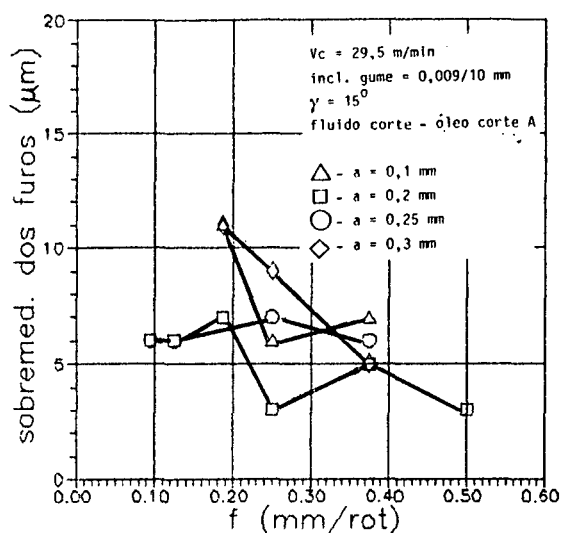
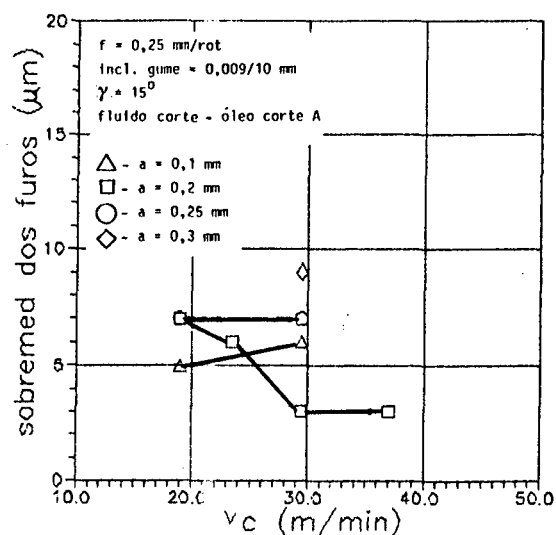
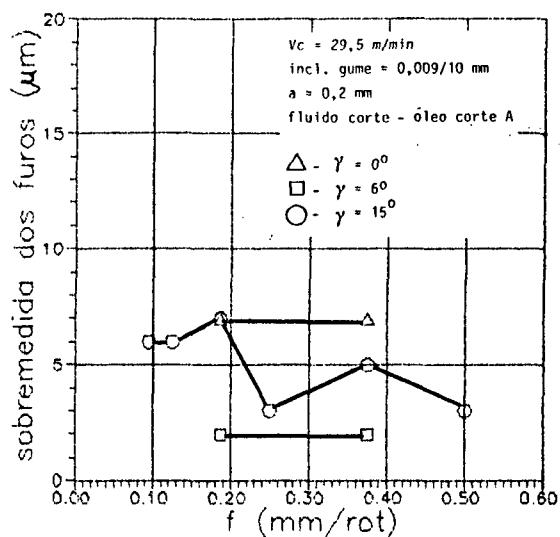
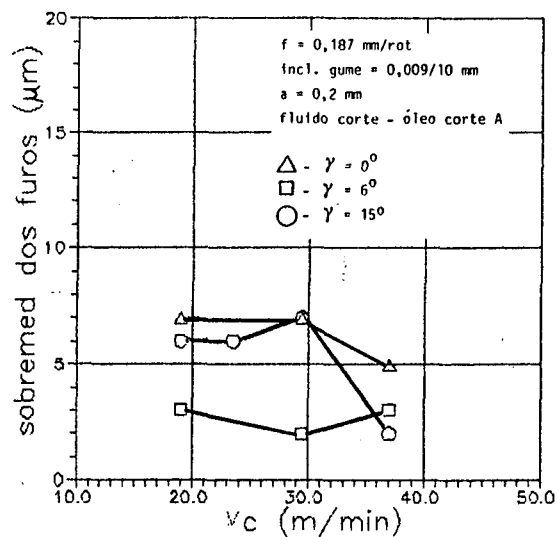
GRAF. 49 - $\Delta_D \times f$ GRAF. 50 - $\Delta_D \times V_c$

FIG. 5.20 - Influência da "a" sobre a sobremedida dos furos

5.4.5. Influência do ângulo de saída

Os maiores valores de sobremedida dos furos foram obtidos para $\gamma = 0^\circ$. Com $\gamma = 6^\circ$, as sobremedidas dos furos foram as menores, e com $\gamma = 15^\circ$ obtiveram-se valores intermediários de sobremedida dos furos. Os gráficos 51 e 52 (fig. 5.21) mostram tais resultados, onde se verifica que a faixa de variação das sobremedidas é bastante pequena ($5 \mu\text{m}$) para as alterações testadas nos ângulos de saída.

GRAF. 51 - $\Delta_D \times f$ GRAF. 52 - $\Delta_D \times v_c$ FIG. 5.21 - Influência de γ sobre a sobremedida dos furos

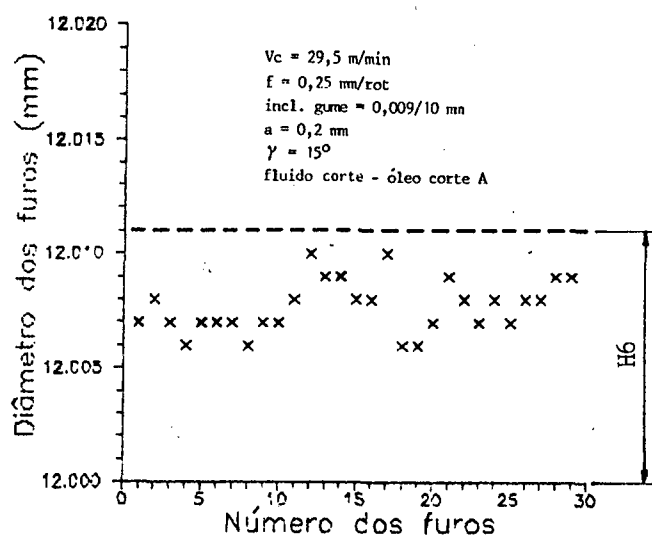
5.4.6. Influência do fluido de corte

Nos gráficos 43, 44, 45 e 46 das figuras 5.17. e 5.18., pode-se verificar a influência do fluido de corte sobre a sobremedida dos furos. Tanto os valores de sobremedida como a dispersão dos mesmos são maiores quando o fluido de corte empregado é uma emulsão de óleo. Para óleos de corte, a sobremedida e a dispersão dos valores de sobremedidas é menor. Tal fato reforça a idéia de que as forças de usinagem são diretamente proporcionais aos valores de sobremedida dos furos, visto que com o emprego de óleo de corte resultam momentos de usinagem menores do que com emulsões.

5.5. Tolerância dimensional

Em operações de alargamento com alargadores convencionais em alumínio aeronáutico, é normal a obtenção de furos com tolerâncias dimensionais da classe IT7 [31]. Com alargadores de gume único do tipo empregado nos ensaios é usual, segundo o fabricante da ferramenta [6:23], a usinagem de furos até a classe IT6 e, conforme Atkey [27], há exemplos de fabricação em série de furos da qualidade IT4.

Nos ensaios realizados, verificou-se uma pequena dispersão na medida dos furos obtidos com alargadores de gume único. A fig. 5.22 mostra um ensaio feito em condições de usinagem constantes, no qual o diâmetro do furo mantém-se com facilidade dentro da faixa H6, para a qual a ferramenta foi regulada (vide 4.3.10.). Pela dispersão dos valores apresentada, pode-se inclusive pensar na utilização deste tipo de ferramenta no alargamento de furos com tolerâncias dimensionais ainda mais estreitas.



GRAF. 53 - D x número de furos

FIG. 5.22 - Estudo de tolerância dimensional

O alargamento de trinta furos sob as mesmas condições, cuja variação de diâmetros é mostrada no gráfico 53 (fig. 5.22), foi realizado com uma interrupção para verificação do diâmetro da ferramenta e sua correção após o décimo furo.

Em todos os ensaios com óleo de corte, mesmo sob condições de usinagem diversas, a máxima dispersão de valores do diâmetro em um corpo de prova (10 furos) foi de 6 μm . Isto leva à conclusão de que é possível trabalhar com tolerâncias bastante justas, abaixo da classe IT6, desde que se faça um controle dimensional após um certo número de furos. Como a ferramenta permite ajustes, caso o diâmetro dos furos comece a se aproximar dos limites da tolerância, basta fazer uma correção no diâmetro da ferramenta conforme a necessidade.

5.6. Considerações econômicas

Uma análise econômica completa de uma ferramenta ou de um processo requer o conhecimento de diversos fatores não determinados no escopo do presente trabalho. Um exemplo destes fatores é a vida da ferramenta. Entretanto, é possível fazer-se uma análise aproximativa, levando em conta as alterações nos tempos principais e secundários, e fazendo estimativas quanto à vida da ferramenta e ao custo da mesma.

De acordo com Atkey [27], é possível diminuir os custos de furos de precisão com alargadores de gume único regulável por ser possível abdicar-se de operações posteriores de brunimento, polimento, retificação interna ou furação de precisão, já que precisões maiores podem ser obtidas com este tipo de ferramenta.

O emprego de velocidades de corte e de avanço mais elevadas também permite uma diminuição nos custos de fabricação (menores tempos de usinagem), visto que os custos da hora-máquina são cada vez mais altos. Os ensaios mostraram ser possível a redução do tempo de usinagem a valores inferiores à metade, com o incremento possível nas velocidades de corte e de avanço.

Fazendo-se uma comparação entre o custo de um alargador de gume único e um alargador convencional (múltiplos gumes), verifica-se que as ferramentas de gume único são aproximadamente dez vezes mais caras do que os alargadores convencionais de aço rápido (no mercado europeu. No caso do Brasil, onde ainda há necessidade de importação de alargadores de gume único regulável, estes chegam a atingir um custo aproximadamente trinta vezes superior ao de alargadores convencionais). É uma diferença substancial de preços que, entretanto, não reflete a realidade. Isto porque o alargador de gume único possui um inserto intercambiável que pode ser substituído após estar desgastado, e o custo deste inserto equivale-se ao de um alargador convencional. Outro fator importante é que os insertos são feitos em metal-duro, material que possibilita vidas de ferramenta bem mais longas do que o aço rápido do qual são feitos os alargadores convencionais em questão.

Com os dados disponíveis, é possível prever um comportamento dos custos no alargamento de furos com ferramentas de gume único regulável. Segundo Koenig [26], os custos de fabricação por peça K_F são compostos por:

- custos para preparação e tempos secundários como parcelas de custos fixos (1).
- custos da máquina-ferramenta e do operador como custo

principal (2).

- custo das ferramentas (3):

$$K_F = \underbrace{K_{ML} \cdot \left(\frac{tr}{m} + tn \right)}_{(1)} + \underbrace{K_{ML} \cdot th}_{(2)} + \underbrace{\frac{th}{T} \cdot (K_{ML} \cdot tw + K_{WT})}_{(3)} \quad (9)$$

O emprego de ferramentas de gume único regulável no alargamento de furos permite antever:

- Um aumento nos custos de preparação, devido à necessidade de regulagem do diâmetro e da inclinação do gume da ferramenta. Os tempos secundários não se alteram, em relação ao alargamento convencional. Deste modo, aumentam os custos fixos para operações de alargamento com ferramentas de gume único regulável.

- A manutenção dos custos de máquina-ferramenta e de operador a mesmos níveis do alargamento convencional. A curva de custo principal, portanto, não se altera.

- Um aumento no custo da ferramenta em baixas velocidades de corte, visto que o alargador de gume único tem um custo inicial maior do que o de alargadores convencionais de aço rápido. Entretanto, com o incremento nas velocidades de cortes, é de se esperar uma inversão nos custos de ferramenta. Pode-se prever tal comportamento devido às maiores vidas de ferramenta esperadas para alargadores de gume único, visto serem os mesmos de metal-duro. A possibilidade de troca de insertos apenas, após o desgaste dos mesmos, sem que haja necessidade de substituição da ferramenta propriamente dita, permite reduzir ainda mais a parcela de custo de ferramenta.

A fig. 5.23 traz uma comparação entre a previsão de custos de fabricação para o alargamento com alargadores de gume único regulável (de metal-duro) e alargadores convencionais de múltiplos gumes (de aço rápido), onde é previsto um aumento nas velocidades de corte e uma possível redução no custo de fabricação em velocidades mais altas, com o emprego das ferramentas em estudo.

A - Alargamento convencional

B - Alargamento com ferramentas de gume único

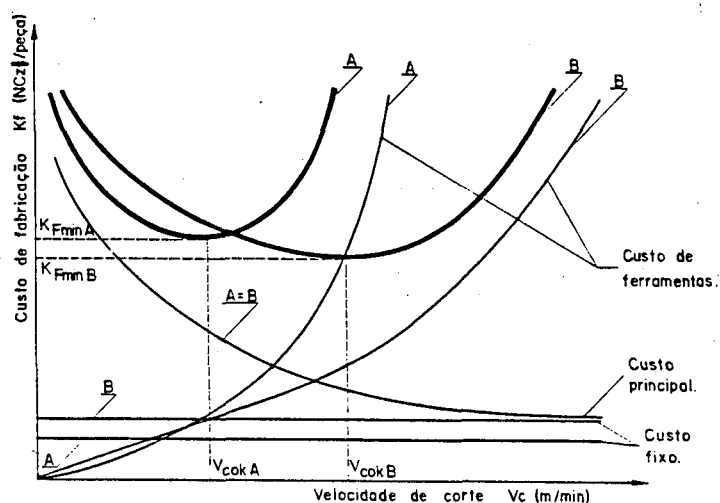


Fig. 5.23 - Comparação entre previsão de custos para alargamento convencional e alargamento com ferramentas de gume único regulável

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DO TRABALHO

6.1. Conclusões

A utilização de ferramentas de gume único regulável para operações de alargamento, onde as exigências quanto à tolerância dimensional e qualidade superficial são grandes, abre uma nova perspectiva para a obtenção de furos de precisão. Os ensaios realizados na liga de alumínio aeronáutico (Al 7075-T651) mostram uma série de vantagens e características do alargamento com este tipo de ferramenta, em relação ao alargamento com alargadores convencionais de múltiplos gumes.

A qualidade superficial dos furos alargados com alargadores de gume único regulável é bastante superior à obtida com alargadores convencionais (rugosidades Ra aproximadamente dez vezes menores), sendo possível a obtenção de furos com superfície espelhada.

Em virtude do aumento possível nas velocidades de corte e avanço, pode-se diminuir o tempo da operação de alargamento em mais de 50%, se for feita uma comparação com operações de alargamento convencionais. Com isto, ocorre um acréscimo no volume de produção.

Os desvios de circularidade existentes em furos alargados com ferramentas de gume único regulável atingem valores inferiores aos resultantes do alargamento convencional. A

ferramenta empregada nos ensaios possibilita também o trabalho em tolerâncias mais estreitas, devido à maior precisão dimensional dos furos obtidos com a mesma.

O uso de ferramentas de gume único regulável para alargamento de furos permite pequenas correções no diâmetro dos mesmos, de modo que são possíveis compensações do desgaste no gume da ferramenta. Como consequência da necessidade de regulagens, existe um aumento nos tempos de preparação do ferramental e exigência de mão-de-obra treinada.

6.2. Sugestões para continuidade do trabalho

Nos ensaios de alargamento com ferramentas de gume único regulável realizados, verifica-se a utilidade das mesmas na obtenção de furos de precisão. Entretanto, não são considerados os aspectos da vida da ferramenta no presente trabalho, o que impossibilita uma análise econômica aprofundada. Para tanto, propõe-se ensaios de longa duração para futuros trabalhos, com o objetivo de mapear o desgaste do gume da ferramenta e determinar a curva de vida da mesma. Deste modo, seria possível a comparação real dos custos dos alargadores de gume único regulável com os dos alargadores convencionais.

A literatura enfatiza as vantagens das ferramentas utilizadas neste trabalho para o alargamento de materiais com características diversas, sem que haja necessidade de troca da ferramenta. Apenas com a substituição do inserto intercambiável por outro de material e geometria diferente, é possível alargar os diversos materiais. Ensaios com outros materiais podem ser

objeto de estudo de novos trabalhos.

No alargamento de furos em alumínio aeronáutico, pôde-se observar uma grande dispersão nos valores de forças de usinagem. Não ficaram esclarecidas as causas destas dispersões, bastante superiores às observadas em ensaios de furação com brocas helicoidais. Cogitaram-se como motivos para tais resultados a grande influência que pode trazer uma variação na quantidade de fluido de corte na região de corte e/ou uma variação na seção de cavaco, visto que:

a) Conforme bibliografia consultada, as forças de usinagem sofrem grande influência das componentes de atrito, e as mesmas são atingidas por variações no tipo e quantidade de fluido de corte [29;30].

b) As seções de cavaco são bastante reduzidas, e pequenas variações nos diâmetros de preparação refletir-se-iam de maneira significativa sobre a mesma.

Em ensaios futuros com alargadores de gume único regulável devem ser estudadas as variações de forças de usinagem de maneira mais ampla.

A grande quantidade de ensaios necessários à uma análise estatística aprofundada impediu a obtenção de gráficos com baixas incertezas de resultado. A realização de uma análise estatística mais completa dos resultados de alargamento com ferramentas de gume único pode ser feita em futuras pesquisas.

Mesmo com o uso de velocidades de corte e avanço nos limites superiores das faixas recomendadas pela literatura, não se obteve nenhuma evidência de que estes seriam realmente os limites de utilização destas ferramentas. Para o futuro, podem-se planejar ensaios em velocidades superiores às aquelas recomendadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS. Tool and Manufacturing Engineers Handbook - Machining, 4. edition. Dearborn, One S.M.E. Drive, 1983, vol.1, página 9-107 a 9-133.
- [02] KRESS, D. Reiben oder Feinbohren. TZ fuer Metallbearbeitung, 76.Jahrg. (2):19-24, 1982.
- [03] GEHRING, R. Schnittkraefte beim Reiben. TZ fuer Metallbearbeitung, 74.Jahrg. (7):37-40, 1980.
- [04] CHRISTOFFEL, K. Einstellbar-Einschneidenreibahle mit Wendeschneidplatte Erzeugt Hohe Oberflaechenguete. Maschinenmarkt, 93 (44):52-58, 1987.
- [05] STEMMER, C.E. Ferramentas de Furar. Florianópolis, U.F.S.C. (Apostila).
- [06] BECK GmbH. Technologie des Reibens - Beschreibung und Einsatz des Ream-Beck-Systems RB 01. Catálogo do Fabricante.
- [07] SKF FERRAMENTAS S.A. Manual Técnico, São Paulo, 1987.
- [08] ROCEK, W. e BOLES LAU, M. Einfluss der Schneidenqualitaet von Reibahlen auf die Oberflaechenrauheit der Bohrungen. Werkstatt und Betrieb, 115 (12):785-786, 1982.
- [09] MILLER, P. C. Better Tools Upgrade Boring and Reaming. Tooling and Production, (10):30-32, 1986.
- [10] HATSCHEK, R. L. Machining Aluminium. American Machinist, Special Report 702 (3), 1978.
- [11] KISTLER INSTRUMENTE AG. 4 Komponenten Dynamometer, n^o 6.9273. Catálogo de Fabricante.

- [12] KISTLER INSTRUMENTE A.G. Piezoelectric Multicomponent Force Transducers and Measuring Systems, TRANSDUCER '78 CONFERENCE, 27/6/78.
- [13] QUEIROZ, A. A. Usinabilidade do Ferro Fundido Cinzento e Avaliação da Temperatura e Força de Corte como Sensores de Desgaste. Florianópolis, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina - U.F.S.C, ag., 1976. 138 f (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica).
- [14] AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Metals Handbook, 9. edition, Metals Park, Ohio, 1984.
- [15] GSEPEL. Manual da furadeira radial RFh75, setembro, 1976.
- [16] KISTLER INSTRUMENTE AG. Ladungsverstaerker mit Galvo-Ausgang, modelo 5006. Catálogo do fabricante.
- [17] HEWLETT-PACKARD COMPANY. Data Acquisition/Control Unit, model 3497A. Catálogo do fabricante.
- [18] CARL ZEISS. Horizontal Metroscopes - ULM 02-600. Catálogo do fabricante.
- [19] FEINPRUEF GmbH. Rugosímetro Perthometer M3A. Catálogo do fabricante.
- [20] FEINPRUEF GmbH. Circularímetro Formmeter MMQ2/Makrograph F1A. Catálogo do fabricante.
- [21] GODOY RAMSAY, J. M. Furação Profunda no Alumínio de Aviação com Brocas Normais. Florianópolis, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina - U.F.S.C., fev., 1987. 111 f (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica).

- [22] ROCHA, A. S. Determinação de um Modelo de Força de Usinagem para a Furação, a partir do Modelo de Força de Usinagem do Torneamento. Florianópolis, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina - U.F.S.C., fev., 1985. 117 f (Dissertação de Mestrado).
- [23] BECK GmbH. Einschneiden-Reibahle mit Wendeschneidplatte Ream-Beck RB D1. Catálogo do Fabricante.
- [24] STRIEGL G. Maschinen-Reibahle mit Wendeschneidplatte. Werkstatt und Betrieb, 119 (7):600-602, 1986.
- [25] SCHNEIDER, C. A. Apostila de Técnicas da Pesquisa Experimental. Florianópolis - U.F.S.C.
- [26] KOENIG, W. Fertigungsverfahren: Drehen, Fraesen, Bohren. Duesseldorf, VDI-Verlag, 1981. Band 1.
- [27] ATKEY, M. Reamer Cuts Down on Costs. Machinery and Production Engineering, (9):59-61, 1979.
- [28] EUROPA LEHRMITTEL. Tabellenbuch Metall, 35. Auflage. Wuppertal, Verlag Europa-Lehrmittel, 1985.
- [29] CHENGZHOU, C. The Effect of Cutting Conditions on Torque and Surface Roughness in Reaming. FIRST INTERNATIONAL METAL CUTTING CONFERENCE, 14-17/3/83, China.
- [30] SALJE, K. e STUEHMEIER, W. Fraesen von KF-Platten mit Hartmetall und PKD. Industrie Diamanten Rundschau, 21. Jahrg. (2):113-124, 1987.
- [31] ARAUJO, E. F. Alargamento com alargadores convencionais (título provisório). Florianópolis, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina - U.F.S.C. (Relatório Interno).

BIBLIOGRAFIA AUXILIAR

- [32] ALUMINIUM-ZENTRALE. Aluminium-Taschenbuch, 14. Auflage. Duesseldorf, Aluminium-Verlag, 1983.
- [33] BURANT, R. O. e SINNGLE, T. J. Drilling, Tapping Al-Si Alloys. American Machinist, (10):81-84, 1979.
- [34] CHRISTOFFEL, K. Werkzeugueberwachung beim Bohren und Fraesen. Aachen, WZL/RWTH, dez., 1984. 150 f (Dissertation).
- [35] CONSALTER, L. A. Arquivo de Dados Tecnológicos de Usinagem para a Determinação Automática de Condições de Corte em Tornos com Comando Numérico. Florianópolis, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina - U.F.S.C., ag., 1985. 131 f (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica).
- [36] DEUTSCHES INSTITUT FUER NORMUNG. Begriffe der Zerspantechnik - Kraefte, Energie, Arbeit, Leistungen. DIN: 8504, Oktober, 1982.
- [37] FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais, 5. reimpressão. Edgar Bluecher, vol.1, 751 p.
- [38] FERRARESI, D. Usinagem dos Metais. Apostila da ABM.
- [39] HEWLETT-PACKARD COMPANY. Manual do Proprietário e Guia de Programação HP-85, Julho, 1981.
- [40] KRESS, D. Polykristalliner Diamant zum Feinbearbeiten von Bohrungen in Aluminium. Werkstatt und Betrieb, 118 (5):253-256, 1985.
- [41] KRONENBERG, M. Grundzuege der Zerspansungslehre, 2. Auflage. Berlin, Springer-Verlag, 1963, Zweiter Band.

- [42] LOURENÇO FILHO, RUY DE C.B. Controle Estatístico de Qualidade. 5. Reimpressão. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1964. 223 p.
- [43] MAPAL - FABRIK FUER PRAEZISIONSWERKZEUGE DR. KRESS KG. Short Blade Reamers for maximum output. Catálogo do fabricante.
- [44] SPIEGEL, MURRAY R. Estatística. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1976. 580 p.
- [45] SPUR, G. e STOEFERLE, T. Handbuch der Fertigungstechnik - Spanen. Muenchen/Wien, Carl Hanser Verlag, 1979, Band 3/1.
- [46] STEMMER, C. E. Ferramentas de Corte. Florianópolis, Editora da U.F.S.C., 1987, 203 p.
- [47] WEINGAERTNER, W.L. Plasmaunterstuetzte Waermezerspannung. Aachen, WZL/RWTH, Jul., 1983, 134 f (Dissertation).

ANEXO A

ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PROCESSO

A execução de diversos furos sob condições idênticas com alargadores de gume único regulável permite o conhecimento de algumas características do processo. Entre elas, os desvios e dispersão de valores de rugosidade, forças de usinagem e diâmetro dos furos.

As variáveis de processo e demais características empregadas no alargamento dos furos submetidos à análise seguinte são:

$N = 29$ furos

$V_c = 29,4$ m/min

$f = 0,25$ mm/rot

$a = 0,2$ mm

Inclinação do gume = $0,009/10$ mm

Fluido de corte - óleo de corte A

Com alargamento de preparação

Sem utilização de suporte pendular

Diâmetro do alargador de gume único = $12,005$ mm

A tabela 1 mostra o diâmetro e sobremedida dos furos, a rugosidade R_t e R_a , forças de avanço e momentos totais obtidos nos ensaios.

TABELA 1

Núm. Furo	Diâm. Furo μm	Sobr. Furo μm	Rt μm	Ra μm	Ff N	Mt N.cm
1	12,007	2	0,9	0,08	3,47	69,89
2	12,008	3	1,3	0,11	1,76	73,19
3	12,007	2	1,2	0,09	1,94	61,35
4	12,006	1	0,6	0,07	3,11	49,87
5	12,007	2	0,8	0,05	3,11	53,19
6	12,007	2	1,0	0,07	1,08	27,81
7	12,007	2	1,3	0,12	2,62	28,62
8	12,006	1	0,8	0,07	1,59	6,15
9	12,007	2	1,0	0,09	1,23	29,41
10	12,007	2	1,2	0,07	1,92	--
11	12,008	3	0,6	0,04	2,76	54,57
12	12,010	5	0,9	0,07	3,37	69,16
13	12,009	4	1,0	0,09	3,27	22,30
14	12,009	4	0,6	0,06	1,43	19,33
15	12,008	3	0,7	0,07	2,88	34,00
16	12,008	3	1,1	0,05	2,37	50,90
17	12,010	5	1,1	0,09	3,11	24,85
18	12,006	1	0,6	0,06	2,21	55,48
19	12,006	1	0,5	0,05	1,94	--
20	12,007	2	0,5	0,04	5,56	95,67
21	12,009	4	0,5	0,04	2,84	100,75
22	12,008	3	0,5	0,04	7,40	91,42
23	12,007	2	0,4	0,04	6,13	80,80
24	12,008	3	0,6	0,04	1,23	76,00
25	12,007	2	0,5	0,05	3,74	60,56
26	12,008	3	0,6	0,05	5,64	120,55
27	12,008	3	0,5	0,04	4,54	52,50
28	12,009	4	0,8	0,06	6,23	83,35
29	12,009	4	0,5	0,04	5,78	18,96

a) Fórmulas de respaldo

$$\text{Média: } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{N}$$

$$\text{Amplitude: } R = X_{\text{máx}} - X_{\text{mín}}$$

$$\text{Desvio padrão: } s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

$$\text{Dispersão dos resultados: } DM(P) = \pm t \cdot s$$

Para uma amostra de tamanho $N = 29$, adotando-se $P=95\%$ (dispersão dos resultados enquadrando 95% dos valores), tem-se $t = 2,0$ [25].

b) Sobremedida dos furos (Δ_D)

$$\Delta_{D \text{ mín}} = 1 \mu\text{m}$$

$$\Delta_{D \text{ máx}} = 5 \mu\text{m}$$

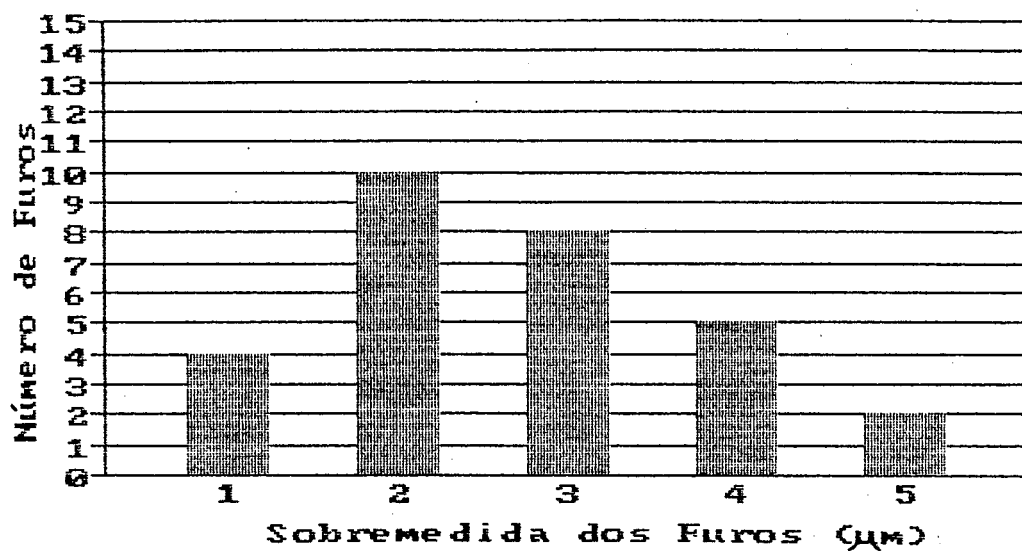
$$R = 4 \mu\text{m}$$

$$\bar{X} = 3 \mu\text{m}$$

$$s = 1 \mu\text{m}$$

$$DM(95\%) = \pm 2 \mu\text{m}$$

Histograma de distribuição de frequência



c) Rugosidade Rt

$$Rt_{\min} = 0,4 \mu\text{m}$$

$$Rt_{\max} = 1,3 \mu\text{m}$$

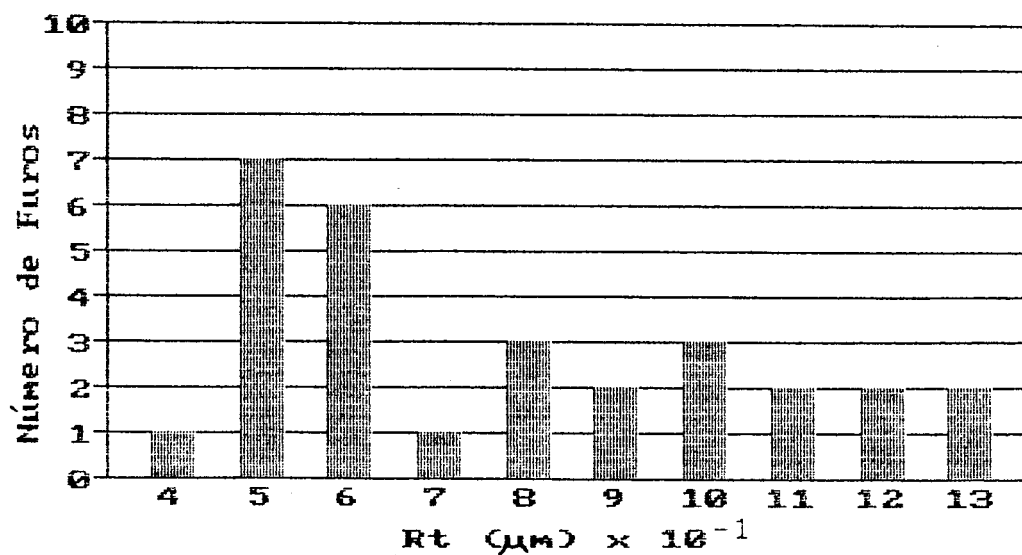
$$R = 0,9 \mu\text{m}$$

$$\bar{X} = 0,8 \mu\text{m}$$

$$s = 0,3 \mu\text{m}$$

$$DM(95\%) = \pm 0,6 \mu\text{m}$$

Histograma de distribuição de frequência



d) Rugosidade Ra

$$Ra_{\min} = 0,04 \mu\text{m}$$

$$Ra_{\max} = 0,12 \mu\text{m}$$

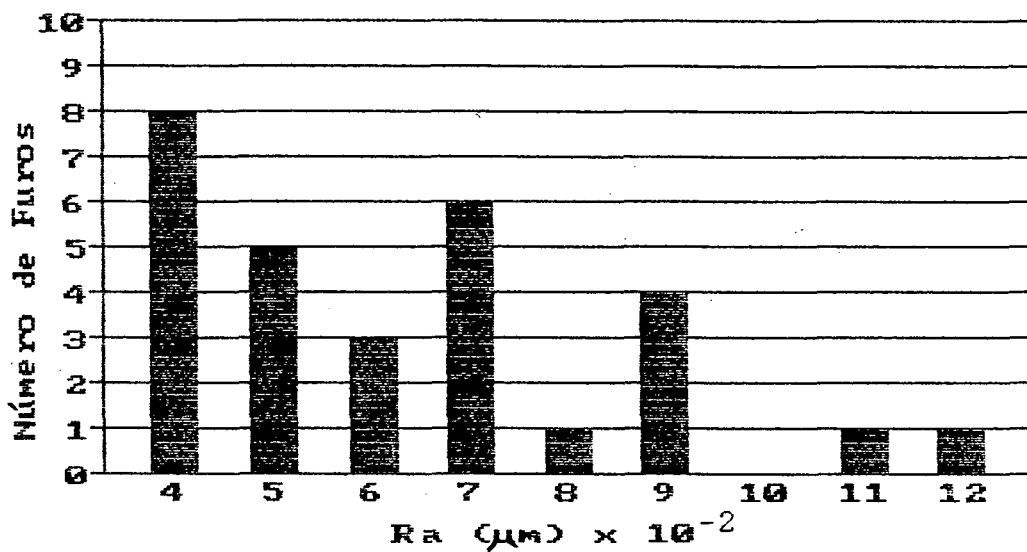
$$R = 0,08 \mu\text{m}$$

$$\bar{X} = 0,06 \mu\text{m}$$

$$s = 0,02 \mu\text{m}$$

$$DM(95\%) = \pm 0,04 \mu\text{m}$$

Histograma de distribuição de frequência



e) Força de avanço (Ff)

$$Ff_{\min} = 1,08 \text{ N}$$

$$Ff_{\max} = 7,40 \text{ N}$$

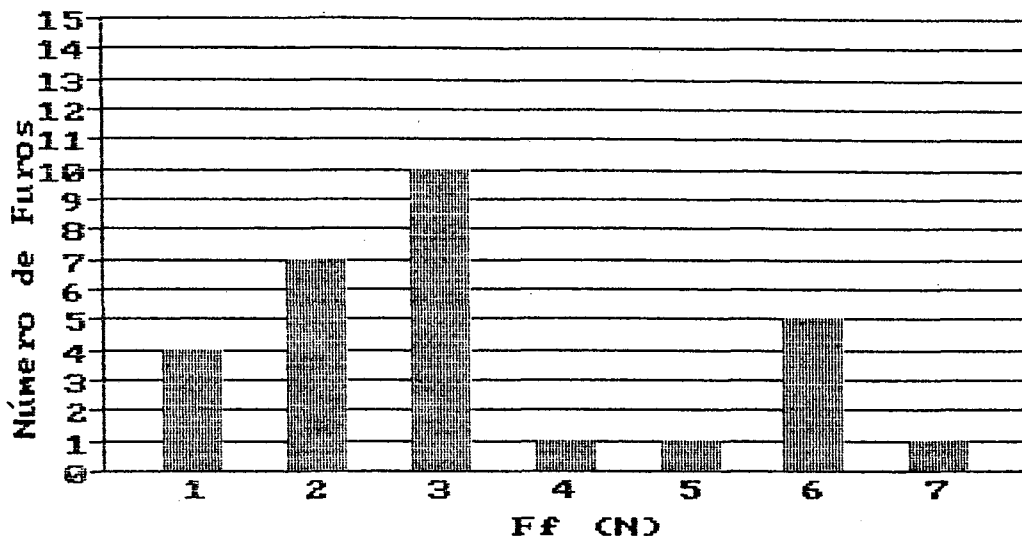
$$R = 6,32 \text{ N}$$

$$\bar{X} = 3,25 \text{ N}$$

$$s = 1,72 \text{ N}$$

$$DM(95\%) = \pm 3,44 \text{ N}$$

Histograma de distribuição de frequência



f) Momento total (Mt)

$Mt_{min} = 8,15 \text{ N.cm}$

$Mt_{max} = 120,55 \text{ N.cm}$

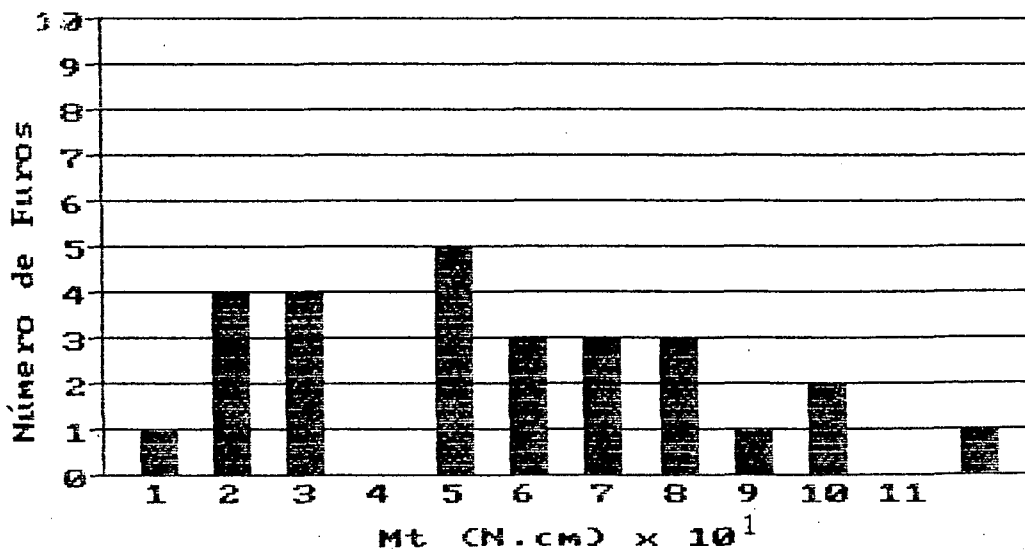
$R = 114,40 \text{ N.cm}$

$\bar{X} = 55,45 \text{ N.cm}$

$s = 28,82 \text{ N.cm}$

$DM(95\%) = \pm 57,64 \text{ N.cm}$

Histograma de distribuição de frequência



ANEXO B

Dados Técnicos Condições de Utilização		ENSAIO DE ALARGAMENTO											PROGRAMA - Furo 2.1		
Tipo de alargador	Back ARB10	Tipo de alargador/qualidade superficial ARB 15 - Rt - 1 a 4 µm <input checked="" type="checkbox"/> ARB 30 - Rt - 2 a 6 µm <input type="checkbox"/>											Corpo de Prova nº 38		
Ø de alargador (mm)	12												Insero nº 8		
Tolerância	H7	Material/ângulo de solda											Experimento nº 54		
Medidas da Haste	ZS Ø mm	Resistência > 900 N/mm ² = 0° <input type="checkbox"/>											Nº Scans 10		
	Compr. mm	Resistência de 700 a 900 N/mm ² = 6° <input type="checkbox"/>											Escala Amplif. 20		
	MK	Resistência < 700 N/mm ² = 15° <input checked="" type="checkbox"/>											Gume nº 2		
ISO - SK		Sobremedida de usinagem a = 0,1 a 0,5 <input checked="" type="checkbox"/> (em mm) min max											Reg. do Gume nº 1		
Horizontal															
Vertical	<input checked="" type="checkbox"/>														
Rotativo	<input checked="" type="checkbox"/>														
Estático															
Furo passante/cego	passante	Nº furo	Vc m/min	f mm/rot	Ø Al mm	Incl µ/mm	Ø Furo mm	Rt µm	Ra µm	SF %	SM %	Cro µm	Ff N	Mt N.cm	
Profund. alarg. mm	28	1	17,8	0,125	12,007 11,998	8/10	12,011	0,65	0,07	30	33		1,57	38,07	
Qualidade Superficial Ra µm Rt µm		2	17,8	0,25	"	"	12,010	1,0	0,06	13	27		4,01	58,65	
Refrig. int./ext.	ext.	3	17,8	0,375	"	"	12,008	0,7	0,05	10	15		4,82	61,39	
Fluido refrig. Pressão bar Vazão l/min	óleo c.A.	4	28,3	0,125	"	"	12,010	0,5	0,05	3	1	2,4 3,0	2,92	25,16	
Suporte pendular Tipo	não	5	28,3	0,25	"	"	12,011	0,8	0,06	7	3		3,94	40,05	
		6	28,3	0,375	"	"	12,010	0,65	0,05	6	2		4,46	44,91	
Material da peça Resist. N/mm ²	Al 7075	7	35,8	0,125	"	"	12,010	0,6	0,04	13	13		1,33	36,62	
Dureza HB		8	35,8	0,25	"	"	12,010	2,8	0,12	23	28	2,8 2,0	2,17	18,78	
Dureza HC		9	35,8	0,375	"	"	12,011	0,95	0,07	28	40		4,52	48,41	
Máquina-Ferramenta Nº de rotações rpm Avanço mm/rot	Fur.Read.	10	35,8	0,25	"	"	12,010	0,95	0,07	-	-		-	-	
Operações em uma fixação †											Sim <input checked="" type="checkbox"/>	Não <input type="checkbox"/>			
OBSERVAÇÕES/CROQUIES							Correções: Erro Sistemático				Cavacos				
Regulagem 1 (antes do furo 1) - 12,0063/11,9979							Ff : A1 = 0,00057117 B1 = 2,1754				Vida da ferramenta				
Obs: a) Sem alargador de preparação b) Broca de preparação Ø 11,58 (furo com Ø 11,78)							Mt : A1 = 0,00047017 B1 = -1,1721				Executor do Ensaio: Ralf + Aloisio				
							Obs :				Local de Ensaio : USIMAQ				
Cidade: Florianópolis					Data: 14/04/89			Folha de							