

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Yoshio Yamada

..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 12/02/2010

.....
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Melhoria da Produtividade na Obtenção de Furos em Liga de Alumínio Aeronáutico com Ferramentas de Aço Rápido

Autor: Yoshio Yamada
Orientador: Nivaldo Lemos Coppini

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

Melhoria da Produtividade na Obtenção de Furos em Liga de Alumínio Aeronáutico com Ferramentas de Aço Rápido

Autor: Yoshio Yamada

Orientador: Nivaldo Lemos Coppini

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Engenharia da Fabricação

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2010
S.P. – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Y14m	Yamada, Yoshio Melhoria da produtividade na obtenção de ligas de alumínio aeronáutico com ferramentas de aço rápido / Yoshio Yamada. --Campinas, SP: [s.n.], 2010. Orientador: Nivaldo Lemos Coppini. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. 1. Usinagem. 2. Processo de fabricação. 3. Aços para ferramentas. 4. Máquina de furar e alargar. 5. Brocas (Ferramentas). I. Coppini, Nivaldo Lemos. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.
------	---

Título em Inglês: Improvement of the productivity in getting holes in aviation aluminum alloys with high speed tools

Palavras-chave em Inglês: Machining, Manufacturing processes, Tool-steel, Stick machine and extend, Drill bits

Área de concentração: Engenharia de Fabricação

Titulação: Mestre Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Flávio José da Silva, Olívio Novaski

Data da defesa: 12/02/2010

Programa de Pós Graduação: Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DA FABRICAÇÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADEMICO

**Melhoria da Produtividade na Obtenção de
Furos em Liga de Alumínio Aeronáutico com
Ferramentas de Aço Rápido**

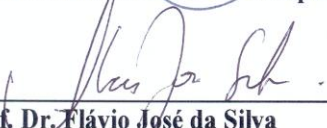
Autor: Yoshio Yamada

Orientador: Nivaldo Lemos Coppini

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini, Presidente
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP



Prof. Dr. Flávio José da Silva
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES



Prof. Dr. Olívio Novaski
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

Campinas, 12 de fevereiro de 2010.

Dedicatória:

Dedico este trabalho a minha querida esposa e a meus filhos.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

A Deus por ter me dado a oportunidade de realizar este trabalho;

Aos meus pais pelo incentivo em todos os momentos da minha vida;

Ao professor Dr. Nivaldo Lemos Coppini orientador deste trabalho, pela ajuda, auxílio incentivo, amizade e paciência;

A todos os professores e colegas do departamento, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho;

Aos colegas de pós-graduação, especialmente ao colega Davi Neves pela ajuda e auxílio prestado

Ninguém ignora tudo, ninguém sabe tudo. Por isso aprendemos sempre.
Paulo Freire

Resumo

YAMADA, Yoshio, Melhoria da Produtividade na Obtenção de furos em Liga de Alumínio Aeronáutico com Ferramentas de Aço Rápido, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2010. 104 p. Dissertação (Mestrado)

O objetivo deste trabalho consiste em aperfeiçoar o processo de fabricação de furos realizados pela empresa X em um de seus produtos. Além da otimização deverá ser mantida a qualidade dimensional através do controle do diâmetro, da cilindridade, da circularidade e do acabamento superficial de furos cilíndricos obtidos pelo processo de alargamento, com ferramentas de aço rápido em de liga de alumínio Al 7175 T66, para se obter furos com alta qualidade superficial e precisão de forma, que atendam as especificações de projeto de componentes da indústria aeronáutica. É estudada a influência das variáveis do processo: velocidade de corte, avanço, sobre as variáveis de resposta: força de avanço e momento torsor. O processo de alargamento estudado é realizado em 04 operações sendo 02 operações de furação e 02 operações de alargamento com ferramentas de aço rápido, na primeira etapa os ensaios foram realizados com os parâmetros de usinagem do processo produtivo para caracterizar o processo, na segunda etapa foi implementada uma elevação dos parâmetros de usinagem com uma redução do tempo de produção.

Na terceira etapa os ensaios foram realizados para avaliar a influência do pré-furo e do pré-alargamento na qualidade final, acarretando em uma maior redução do tempo de processo comparado com o processo otimizado.

Pretende-se obter tal furo com a realização de apenas uma etapa de furação e uma de alargamento. Para isso, é necessária a observação não só da qualidade das peças em relação

aos requisitos exigidos pelos clientes, mas também do tempo de ciclo de produção. As condições otimizadas e resultantes foram: velocidade de corte 100 m/min., avanço 0,2 mm/rot., com operação de pré-furação e sem operação de pré-alargamento. Com estas condições reduziu-se o tempo de produção por peça de 1,42 min. para 0,63 min.

Palavras Chave

Usinagem, Rotação, Avanço.

Abstract

YAMADA, Yoshio. Improvement of the Productivity in Getting Holes in Aviation Aluminum alloys with High Speed Steel Tools. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2010, p. 104. Dissertação (Mestrado)

The purpose of this study is to optimize the manufacturing process of holes made by Company X in one of their products. Besides the optimization, should be maintained the dimensional quality by controlling the diameter, roundness, circularity, and surface finish of cylindrical holes obtained by the widening process, with high-speed steel reamers in a aluminum alloy 7175-T66, to obtain holes with high surface quality and precision of form that meet the design specifications of aviation industry components. It is studied the influence of process variables: cutting speed, feed, about the response variables: feed force and torsion moment. The widening process studied is realized in four operations, consisting of two drilling operations and two widening operations with high-speed steel tools. In the first stage, the tests were carried out with machining parameters of the company to characterize the process. In the second stage, was implemented an increase in machining parameters with a reduction in the production time. In the third stage, the tests were realized to evaluate the influence of pre-drilling and pre-widening on the final quality, resulting in a further reduction of processing time compared with the optimized process.

We intend to obtain this hole with the realization of only one drilling stage and one widening stage. For this, it's necessary not only the observation of the quality of the pieces in relation to the requirements demanded by the customers, but also the cycle time of production. The optimized conditions and resulting were: cutting speed of 100 m/min., feed of 0.2 mm/rev.,

with pre-drilling operation and without pre-widening operation. With this conditions, reduced the production time per piece of 1.42 min. to 0.63 min.

Key Words: Machining, Rotation, Feed

Sumário

Dedicatória:	iv
Agradecimentos	v
Resumo.....	vii
Introdução.....	1
Capítulo 2	3
Estado da Arte	3
2.1 – O Processo de Alargamento	3
2.2. – Características do Processo	7
2.2.1 - Tolerâncias	8
2.2.2 - Material de trabalho e dureza.....	9
2.2.3 - Máquinas.....	9
2.3 – Alargadores	10
2.3.1 - Geometria dos Alargadores.....	11
2.3.2 - Materiais para Alargadores	12
2.3.3 - Seleção de Alargador	14
2.4 - Classificação dos alargadores	16
2.4.1 - Quanto ao tipo de operação.....	16
2.4.2 - Quanto ao tipo de dentes (canais)	17
2.4.3 - Quanto à fixação	18
2.4.4 - Quanto ao sentido de corte.....	19
2.4.5 - Quanto ao uso	19
2.4.6 - Quanto à regulagem	20
2.4.7 - Quanto à geometria dos furos	20
2.4.8 - Quanto ao número de arestas	21

2.4.9 - Quanto à forma de entrada	23
2.5 - Tipos de Alargadores	24
2.5.1 - Aplicações dos alargadores de canais retos	24
2.5.2 - Aplicações dos alargadores de canais helicoidais.....	25
2.5.3 - Aplicações de um alargador frontal	26
2.5.4 - Aplicações de Alargadores Ajustáveis.....	27
2.5.5 - Aplicações dos Alargadores Especiais.....	29
2.6 – Reafiação	31
2.7 – O alumínio e suas ligas.....	31
2.7.1 – Principais Características	31
2.8 - Revestimentos para Alargadores.....	41
2.8.1 - Carboneto de titânio (TiC)	42
2.8.2 - Nitreto de titânio (TiN)	42
2.8.3 - Carbonitreto de titânio (TiCN).....	43
2.8.4 - Nitreto de alumínio-titânio (TiAl).....	43
2.9 - Qualidade da Peça Usinada.....	43
2.10 - Erros geométricos	45
2.10.1 - Erros de forma.....	45
2.10.2 - Rebarbas.....	45
2.10.3 - Erros de posicionamento dos furos	45
2.10.4 - Erros de circularidade	46
2.10.5 - Erros de cilindricidade	47
2.11 - Qualidade da superfície gerada	47
2.12 - Parâmetros de corte no alargamento	49
2.12.1 - Velocidade de corte.....	49
2.12.2 - Avanço	50
2.12.3 - Fluido de Corte	51
Capítulo 3	58
Materiais e Método.....	58
3.1 – Introdução.....	58
3.2 – Material	59
3.3 – Máquinas e Equipamentos	60
3.4 - Instrumentos de Medição	61

3.4.1 - Medição da Força de Avanço e Momento Torsor.	61
3.4.2.-Medição da Precisão Dimensional.....	62
3.5 – Ferramentas de Corte	62
3.6 - Delineamento dos ensaios.....	66
3.6.1 - Primeiro Bloco de Ensaios.....	66
3.6.2 - Segundo bloco de Ensaios.	66
3.6.3 – Terceiro bloco de Ensaios.	68
Capítulo 4	72
Resultados e Discussões.....	72
4.1 – Primeiro Bloco de Ensaios	72
4.1.1 – Esforços de usinagem – Força de Avanço e Momento torsor.....	72
4.1.2 – Avaliação da Rugosidade, Cilindricidade e Circularidade.....	74
Os resultados obtidos no primeiro bloco de ensaios (vide tabela 5.2) satisfazem a empresa X no que se refere à qualidade exigida para a confecção do furo. Entretanto, deseja-se melhorar a produtividade, pois, esta operação representa um gargalo de produção.	74
4.2 – Segundo Bloco de Ensaios	75
4.2.1 – Produtividade das Brocas Helicoidais.....	75
4.2.2 – Produtividade dos Alargadores	77
4.2.2.1 - Esforços de usinagem no alargador de 7,063 mm	77
4.2.2.2 – Rugosidade, Cilindricidade e Circularidade dos Alargadores	79
4.3 - Terceiro Bloco de ensaios.....	80
4.4 – Análise da Produtividade Após Otimizações	85
Capítulo 5	87
Conclusões e Sugestões para trabalho futuro.....	87
Sugestões para futuros trabalhos na área de alargamento são:.....	88
Referências Bibliográficas	89
Anexos.....	94

Lista de Figuras

Figura 2. 1 - Ângulos em alargadores (SKF, 1987 e GUHRING, 2002).	5
Figura 2. 2 - Nomenclatura de alargadores (SKF, 1987 apud BORILLE, 2005).	12
Figura 2. 3 - Tipos de canais em alargadores (SKF, 1987).	17
Figura 2. 4 - Tipos de fixação de alargadores (STEMMER, 1995).	18
Figura 2. 5 - Alargadores de máquina e manual (STEMMER, 1995).	20
Figura 2. 6 - Alargamento cilíndrico e cônico (STEMMER, 1995).	21
Figura 2. 7 - Alargador de aresta única e de múltiplas arestas (STEMMER, 1995).	22
Figura 2. 8 – Alargador com passos diferentes entre os dentes (STEMMER, 1995).	23
Figura 2. 9 - Formas de entrada de alargadores (STEMMER, 1995 e SKF, 1987).	24
Figura 2.10 – Alargadores de mandril de canal reto (METALS HANDBOOK, 1989).	25
Figura 2. 11 - Alargador de canais helicoidais para furo com rasgo enchavetado, de estria helicoidal convencional (a), com rasgo enchavetado (b) e com ângulo de inclinação modificado(c). (METALS HANDBOOK, 1989).	26
Figura 2. 12 - Alargadores de corte frontal (a), alargador de corte frontal furos cegos (b) (METALS HANDBOOK, 1989).	27
Figura 2. 13 - Alargador ajustável de lâmina inserida e detalhes típicos de projeto (METALS HANDBOOK, 1989).	28
Figura 2. 14 - Dois tipos de ferramentas conjugadas broca-alargadora (METALS HANDBOOK, 1989).	30
Figura 2. 15 - Três tipos de alargadores de diâmetro múltiplo (METALS HANDBOOK, 1989).	30
Figura 2.16 – Principais elementos de liga e classificação das ligas de alumínio (TOTTEN, 2003).	33

Figura 2. 17 - Relações que envolvem a qualidade de uma peça usinada (KÖNIG, 1991 apud STOETERAU, 1999).	44
Figura 2. 18 - Erros comuns na geometria de furos (KÖNIG, 1997 e SME, 1983).	46
Figura 2.19 – Erro de cilindridade (BEZERRA, 1998 apud ALMEIDA, 2008)	47
Figura 2. 20 - Perfil de rugosidade e parâmetro Ra.	48
Figura 2. 21 - Forças no processo de alargamento. (BORILLE, 2005)	56
Figura 3. 1 – Fluxograma do planejamento e execução dos ensaios.	59
Figura 3. 2 - Máquina-ferramenta e ambiente de ensaios.	61
Figura 3. 3 - Ferramentas de aço-rápido utilizadas.	63
Figura 3. 4 – Conjunto Alargador + Porta Ferramenta	63
Figura 3.5 – Broca helicoidal de diâmetro 6,0 mm e diâmetro de 6,8 mm	64
Figura 3.6 – Alargador de diâmetro 7,063 mm e de diâmetro de 7,142 mm	65
Figura 3.7– Ilustração do alargamento	69
Figura 4.1 – Influência do diâmetro da ferramenta nos esforços de usinagem	73
Figura 4.2. - Influência da velocidade de corte e do avanço no alargamento do furo final.	84

Lista de Tabelas

Tabela 2. 1 - Ângulos de inclinação da hélice (FERRARESI, 1973).	18
Tabela 2. 2 - Número de arestas em alargadores de acabamento (FERRARESI, 1973 apud)	22
Tabela 2. 3 - Fluido de corte utilizada no alargamento de vários metais (METALS HANDBOOK, 1989).....	54
Tabela 3. 1 - Composição Química do Alumínio 7175 T66.	60
Tabela 3. 2 - - Parâmetros de corte praticados pela empresa X	66
Tabela 3. 3 - Parâmetros de ensaio das brocas	67
Tabela 3. 4 - Parâmetros de ensaio dos alargadores.....	67
Tabela 3. 5 - Condições de ensaio	70
Tabela 3. 6 - Parâmetros de corte	71
Tabela 4.1 – Força de Avanço e Momento Torsor.....	74
Tabela 4.2 – Parâmetros de corte praticados pela empresa X.....	75
Tabela 4.3 – Esforços de usinagem para as brocas helicoidais	78
Tabela 4.4 – Esforços de usinagem para os Alargadores	80
Tabela 4.5 – Erros de Cilindricidade e Circularidade do Pré-Alargamento.....	82
Tabela 4.6 – Erros de Cilindricidade e Circularidade do alargamento Final	82
Tabela 4.7 – Ensaio do terceiro bloco com destaque em vermelho identificando as restrições que não atendem as vantagens enumeradas	85
Tabela 4.8 – Comparação das condições de usinagem para: (a) empresa X; (b) valores otimizados sem pré-alargamento, (c) valores otimizados com broca escalonada.	87

Lista das Equações

Equação 2.148

Equação 2.257

Nomenclatura

Letras Latinas

HR_C – <i>Hardness Rockwell</i> – Dureza Rockwell	[kgf/mm ²]
R_a – Rugosidade	[micra]
F_{f1} – Força de avanço por dente	[N]
F_{c1} – Força total de corte por dente	[N]
F_f – Força de avanço	[N]
F_p – Força passiva	[N]
F_c – Força de Corte	[N]
M_t – Momento Torsor	[N.cm]
HB – <i>Hardness Brinell</i> – Dureza Brinell	[kgf/mm ²]
D – Diâmetro da Ferramenta	[mm]
S – Rotação	[rpm]
f – Avanço	[mm/rot.]
V_c – Velocidade de Corte	[m/min.]

Letras Gregas

γ₀ – Ângulo de saída ortogonal da ferramenta	[°]
κ_r – Ângulo de posição da ferramenta	[°]
γ'_p – Ângulo de saída dorsal da aresta lateral da ferramenta	[°]
γ_f – Ângulo de saída da ferramenta	[°]

Abreviações

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CVD – Deposição Química de Vapor

PVD – Deposição Física de Vapor

CCM – Centro de Competência em Manufatura

CNC – Controle Numérico Computadorizado

Capítulo 1

Introdução

Um fabricante de válvulas hidráulicas, utilizadas em trem de pouso de aeronave produz, por alargamento, furos de pequeno diâmetro com tolerância H7 em ligas de alumínio. Esta empresa passará a ser denominada de Empresa X ao longo deste trabalho. A sequência de operações realizadas para obtenção do furo de diâmetro de 7,142 mm com rugosidade de 1,6 μm , circularidade de 0,019 mm e cilindridade de 0,019 mm consiste de: realização de um pré-furo com $\varnothing$ 6,0 mm, logo em seguida uma broca de $\varnothing$ 6,8 mm é utilizada. Posteriormente é realizado um pré-alargamento para o diâmetro de 7,063 mm, e finalmente, para obtenção do diâmetro final do furo utiliza-se um alargador de diâmetro de 7,142 mm. As velocidades de corte praticadas são de 37 m/min. para furação e 13 m/min. para alargamento. A introdução de um novo equipamento no processo produtivo da empresa X gerou a necessidade de reavaliar a sequência de fabricação, bem como os parâmetros de usinagem.

Esta reavaliação, entretanto, foi realizada nos laboratórios do CCM – Centro de Competência em Manufatura do ITA – Instituto Tecnológico da Aeronáutica. Este trabalho tem como objetivo avaliar este processo de alargamento e procurar melhorar seus parâmetros visando maior produtividade.

A empresa citada acima sofreu uma atualização tecnológica no chão de fábrica. Máquinas mais modernas com rotações mais elevadas e maiores velocidades de avanço substituíram modelos já superados. O processo de furação e alargamento em ligas de alumínio precisou ser revisto. Em uma primeira etapa, este trabalho caracteriza o processo utilizado até o momento da

implantação do novo equipamento. Em uma segunda fase, são estudadas alterações nos parâmetros de usinagem que não envolvem modificação no ferramental utilizado.

Este trabalho está dividido em capítulos, a saber.

O capítulo 2 apresenta uma revisão conceitual que enfoca a operação de alargamento, e os alargadores, incluindo parâmetros de corte e geometria, o uso de fluidos de corte, e mecanismos de desgaste.

O capítulo 3 descreve-se o procedimento experimental, o material do corpo de prova e os equipamentos utilizados no ensaio.

No capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados obtidos no procedimento experimental.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho e sugeridos trabalhos futuros de alargamento em ligas de alumínio aeronáutico.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1 – O Processo de Alargamento

O processo mecânico de usinagem para obtenção de superfície cilíndrica interna coaxial com eixo de rotação do movimento de corte da ferramenta denomina-se furação. A furação é uma das mais antigas operações de usinagem que se tem registro. Há evidências sobre uma broca egípcia do ano de 4.000 a.C. que se constituía de uma haste de madeira e uma ponta de sílex ou outra espécie de pedra dura. Hieróglifos datados de 2700 a.C. apresentam instruções para obtenção de furos (TONSHOLF, 1994). A broca helicoidal, inventada por Moses Twist Drill and Machine Company, em 1820 (TOMITA, 1999), é a mais utilizada na indústria manufatureira e segue se desenvolvendo; sua forma básica de construção helicoidal continua válida até hoje. As hélices da broca desempenham um papel importante na remoção dos cavacos na medida em que o furo é executado. Sempre que a precisão dimensional e acabamento são fundamentais, a furação é a operação inicial que antecede o alargamento, o mandrilamento ou a retificação, para um campo de diâmetro até ordem de 100 mm. O processo de furação com brocas helicoidais consiste em uma operação de desbaste cuja tolerância de fabricação varia entre a qualidade ISO IT11 a IT14. O alargamento é um processo de usinagem para ajustar e finalizar a dimensão dos furos existentes com precisão por meio de ferramentas multicortantes (alargadores) (METALS HANDBOOK – 1989). É uma técnica segura e perfeita para o acabamento de furos longos e de diâmetros pequenos (KRESS e ERDEL, 1997), podendo-se chegar a uma tolerância de qualidade

IT7. Quando são necessários melhores acabamentos superficiais e ou tolerâncias mais justas é fundamental o uso de alargadores.

Considerando a peça parada (NORMA ABNT 6162) o alargador gira e avança contra a mesma e, como o sobre metal é relativamente pequeno, o volume de material removido pelos cavacos é reduzido. O alargamento pode ser executado no mesmo tipo de máquinas utilizadas para furação. Os alargadores tendem a seguir o centro do furo que está sendo alargado e, em determinados casos, pode ser necessário uma operação de pré-alargamento antes do alargamento final para manter as tolerâncias de projeto (LUGSCHEIDER et al., 1997).

O processo de alargamento é definido segundo a Norma DIN 8589 (apud WEINERT et al., 1998), como um tipo de furação que utiliza uma ferramenta de alargar para produzir pequenas espessuras de cavaco e criar superfícies internas com alta qualidade dimensional e de forma.

O resultado dessa operação depende de vários fatores de extrema importância quando da determinação e da construção da ferramenta: aplicação manual ou mecânica, profundidade e qualidade do furo passante ou não passante, espessura da parede da peça, furo interrompido, estado do furo pré-trabalhado, acabamento da superfície, dimensões e tolerâncias do furo, resistência mecânica e usinabilidade do material (GABOR, 1982).

Alargadores padrões são usados para produzir furos cilíndricos. Sua aresta de corte retificada divide-se em aresta de corte principal e aresta de corte secundária. O processo de corte utiliza a aresta de corte principal que se localiza na região chanfrada e alcança toda a extensão do chanfro. A aresta de corte secundária consiste na parte cilíndrica que serve como guia e permite a calibração do furo (LUGSCHEIDER et al., 1999). A seguir a figura 2.1 ilustra os principais ângulos presentes nos alargadores e suas apresentações segundo NBR 7487.

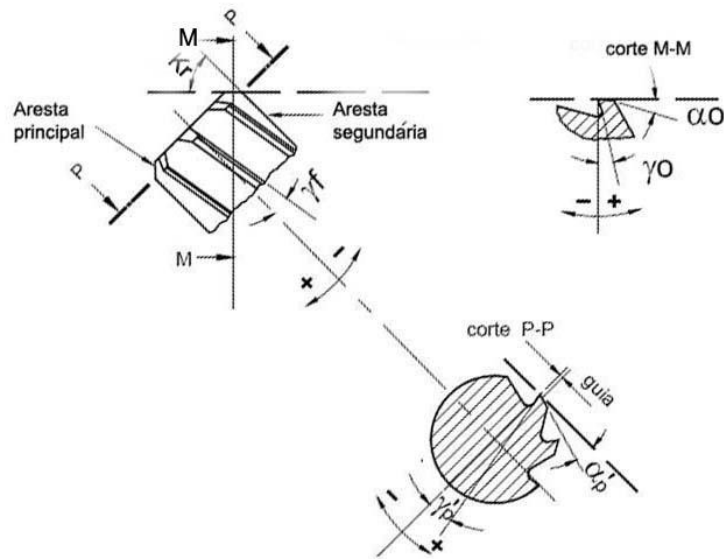


Figura 2. 1 - Ângulos em alargadores (SKF, 1987 e GUHRING, 2002).

- a) Ângulo de saída ortogonal da ferramenta (γ_0).
- b) Ângulo de posição da ferramenta (κ_r).
- c) Ângulo de saída dorsal da aresta lateral da ferramenta (γ'_p).
- d) Ângulo de saída da ferramenta (γ_f).
- e) Ângulo de folga da ferramenta (α_0).
- f) Ângulo de folga dorsal da aresta lateral da ferramenta (α'_p).

Sob situações de falha do processo e desalinhamentos, em função da flexibilidade da ferramenta, o alargador tem uma tendência a flexionar na direção do eixo inicial do furo à medida que o processo de alargamento evolui. Esta deflexão tende a alterar os parâmetros do processo gerando imperfeições ocasionadas pelo surgimento de forças adicionais no sistema (BHATTACHARYYA et al., 2006).

O modelamento do processo de alargamento e a habilidade de prever forças de corte atuantes conduzirão a uma maior compreensão de como produzir furos de alta qualidade. Friedman et al. estudou o fenômeno de geração de lóbulos (circularidade) em furos alargados e sugeriu um passo diferencial das arestas do alargador para auxiliar na redução deste problema.

Sakuma e Kiyota (1986) realizaram um estudo experimental para investigar a precisão do furo utilizando alargadores de metal duro com múltiplas arestas. Eles tentaram descrever o comportamento dinâmico do alargador e relacionar a dinâmica do alargador à geração de furos com vários lóbulos. Nos estudos, Sakuma e Kiyota também enfatizaram a importância de entender as posições relativas do eixo de ferramenta, o eixo do fuso, e o eixo do furo inicial, em termos dos efeitos na qualidade final do furo alargado. Bayly et al. desenvolveram um modelo quase-estático de alargamento para explicar a dinâmica do processo e seu efeito nos padrões de geração de lóbulos visto em furos alargados. Embora estes estudos auxiliem a nossa compreensão do processo de alargamento, eles possuem certas limitações. A maioria dos estudos é experimental e que utilizam modelamento que não empregam parâmetros do processo de alargamento. Além disso, na geração de modelos de esforços para avaliar as falhas do processo, os erros de desalinhamento entre o eixo da peça e o eixo da ferramenta e os erros de inclinação entre o furo e o alargador que podem ser normalmente vistos na prática, não são considerados (BHATTACHARYYA et al. 2006).

Segundo Ferraresi (1972) atingem-se maiores precisões com o uso de fluidos lubrificantes ou refrigerantes adequados.

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

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

2.2. – Características do Processo

Embora os aços com dureza na faixa de 15 a 30 HRC sejam os materiais mais submetidos à operação de alargamento, os metais ferrosos mais dúcteis bem como em aços com dureza superior a 52 HRC podem ser alargados (METALS HANDBOOK, 1989 apud BEZERRA, 1989)

O processo de alargamento tem grande aplicação na indústria automotiva que recentemente observou um desenvolvimento significativo em termos de tecnologia de veículo usando ligas de alumínio-silício em blocos de motores. A utilização correta dos parâmetros de usinagem assegura uma produção de furos com qualidade nestas ligas o que é normalmente difícil devido à sua baixa dureza.

A circularidade e a cilindridade dos furos alargados podem ser melhoradas por meio de alargamento com taxas de avanço entre 0,20 e 0,40 mm/rev. Usinagem com alargador com um ângulo de hélice entre 0° e 7° produz furos com melhor circularidade e cilindridade com baixo consumo de potência. Alargadores com um ângulo de hélice de 0° originaram furos com um acabamento imperfeito, embora a precisão do diâmetro do furo seja muito melhor. Alargadores com número maior de arestas de corte geram uma melhor precisão no diâmetro do furo, superfície final e circularidade à custa de furos com uma cilindridade mais pobre e potência mais alta, quando se usina ligas de alumínio-silício (BEZERRA et al., 2001).

A maioria dos furos alargados está dentro da faixa de 3,2 a 32 mm de diâmetro, porém há casos de furos com diâmetros de 0,1 mm até cerca de 150 mm ou mesmo superior a esse valor (METALS HANDBOOK, 1989).

No alargamento horizontal de furos, várias vezes mais longo que a aresta de corte do alargador, as dificuldades em manter o acabamento e as dimensões são eventualmente intensificadas por meio do desalinhamento do equipamento. Isto pode ser minimizado pelo uso de alargador com pequena aresta de corte.

A maioria das operações de alargamento é destinada à remoção de quantidade mínimas de cavacos. Por ser uma operação de usinagem, a formação do cavaco é um fator importante para eficiência da operação. Quando uma profundidade de corte maior que 0,5 mm no diâmetro deve ser removidas de um furo de grandes dimensões utiliza-se geralmente uma operação de

mandrilamento, ou mesmo um alargamento especial como o uso de alargadores canhão ou de desbaste (METALS HANDBOOK, 1989 apud ALMEIDA, 2008).

Se muito pouco de material é removido, o alargador irá apenas atritar-se na peça ao invés de cortá-lo resultando em danos a ferramenta e a superfície da peça. Para metais dúcteis, a taxa de remoção de 0,2 mm sobre o diâmetro por passe é próximo do mínimo, dependendo do comprimento do furo e rigidez da máquina. Se a ferramenta for de metal duro, em razão da diferença na formação de cavacos, esta quantidade pode ser reduzida a 0,13 mm. Para a remoção menor do que a 0,13 mm o brunimento é a opção mais viável (METALS HANDBOOK, 1989).

2.2.1 - Tolerâncias

Tolerâncias de IT 7 sobre o diâmetro são comuns no alargamento de produção; tolerância menor que IT 7 podem ser obtidas, mas requer controle mais rígido das dimensões do alargador, avanço e velocidade de corte e igualmente das demais variáveis operacionais. Para alargamento de alta precisão, é recomendável reduzir levemente a conicidade do alargador e alinhar a bucha guia com o alargador de modo que uma folga mínima pode ser obtida (METALS HANDBOOK, 1989).

A ocorrência de vibrações durante o alargamento tem um efeito prejudicial na vida da ferramenta assim como no acabamento do furo. As vibrações podem ser consequências de diversos fatores, tais como: (BEZERRA, 1989 apud ALMEIDA, 2008).

- avanço excessivo ou insuficiente;
- rigidez insuficiente do equipamento ou na fixação da ferramenta;
- fixação inadequada da peça;
- velocidade de corte;
- comprimento excessivo do alargador ou do fuso da máquina; e
- folga excessiva no cabeçote flutuante.

2.2.2 - Material de trabalho e dureza

A dureza dos aços carbono e aços de baixa-liga têm um efeito mais pronunciado que a composição dos mesmos sobre a facilidade de serem alargados.

Metais dúcteis como o alumínio e o latão podem ser alargados com velocidades de cinco a dez vezes maiores que aquelas utilizadas para os aços recozidos (METALS HANDBOOK, 1989). O item 2.7 faz uma abordagem do alumínio e suas ligas, onde o material utilizado neste trabalho está enquadrado.

2.2.3 - Máquinas

A operação de alargamento não requer o uso de máquinas especiais podendo ser executada em furadeira, tornos, fresadoras e centros de usinagem, ou mesmo à mão (SWIFT KG, 2003).

A metodologia de centro de usinagem é amplamente aplicada aos sistemas de produção na indústria de transformação em rápido desenvolvimento. O centro de usinagem automatizado pode simultaneamente operar processos como alargamento e furação. Estes produtos têm geralmente importantes características de qualidade com alta precisão. No entanto, um centro de usinagem é incapaz de medir a capacidade do processo por conta própria. Por causa do desenvolvimento do centro de usinagem automatizado o tempo de processamento e o custo é reduzido, ainda que os procedimentos sejam muito mais complexos do que no passado.

Segundo Yuk et al um centro de usinagem com alta capacidade de processamento pode fabricar produtos com maior qualidade e com menores perdas. Eles geralmente têm características de qualidade numérica, por exemplo, abertura, localização, distância do eixo, espessura, profundidade, largura e comprimento que são medidos por máquina tridimensional por coordenadas (YUK et al 2007).

Quanto às máquinas ferramentas, o Metals Handbook, 1989, faz os seguintes comentários:

- em geral todo tipo de equipamento capaz de rotacionar uma ferramenta ou uma peça de trabalho tem sido utilizado para o alargamento. Peças grandes são rotacionadas em um torno mecânico e os alargadores são avançados na luneta ou no cabeçote móvel do torno.

A maioria do alargamento de produção é feita em furadeira, em torno revólver ou em máquina de operação múltipla;

- em muitas aplicações o alargamento é uma operação suplementar realizada em conjunto com outras operações. Sob essas condições, a máquina é selecionada, principalmente para a operação primária;
- para o alargamento de produção de furos menores que 32 mm de diâmetro, máquinas que rotacionam a ferramenta e mantêm a peça estacionária (furadeira de coluna, por exemplo) são usualmente as mais práticas e econômicas. As buchas guias podem ser utilizadas nessas máquinas para manter tolerâncias de 0,057 mm ou menores para furos longos;
- para uma precisão máxima, entretanto, é preferível que a dimensão e a forma da peça permitam rotacioná-la e manter a ferramenta estacionária. Isto também se aplica aos alargamentos de furos maiores que 32 mm de diâmetro ou que tenham uma razão comprimento / diâmetro superior à 8:1.
- a dimensão e forma da peça são frequentemente os maiores problemas na escolha de uma máquina para o alargamento e para furação ou outras operações que antecedem o alargamento. Em muitos casos, embora apenas furos relativamente pequenos sejam alargados, se a peça é grande ou pesada demais para ser rotacionadas em máquinas, tais como nos tornos revólveres. Em outros casos, a dimensão ou o peso da peça pode permitir que a mesma se submeta à rotação, mas o formato assimétrico da peça de trabalho faz que a rotação seja impraticável. Para qualquer condição, o alargador deve ser rotacionado em máquinas tais como a furadeira de coluna ou as broqueadeiras. Furos relativamente pequenos em peças relativamente grandes são frequentemente alargados por máquinas portáteis, operadas manualmente.

2.3 – Alargadores

Para melhorar o acabamento da superfície originada da furação com broca helicoidal empregam-se alargadores que são ferramentas utilizadas na operação de alargamento. Os alargadores possuem canais paralelos ou em hélice ao eixo da ferramenta que proporcionam dentes para o corte e ranhuras para a saída dos cavacos (METALS HANDBOOK, 1989).

As ferramentas para o processo multicortantes são alargadores cujas lâminas estão em um único conjunto e encontram-se simultaneamente em contato com a peça. O processo de usinagem é subdividido em duas operações básicas: primeiramente, o corte pelas arestas principais de corte e, posteriormente, alisamento pelas arestas laterais, as quais se apóiam em uma determinada extensão contra a superfície do furo já usinado e conduzem à ferramenta. Desta forma, as cunhas cortantes dispõem de uma superfície lateral que tem forte influência no resultado da usinagem durante o processo de alargamento. Por outro lado, o projeto dos alargadores de corte único apresenta uma separação das funções de corte e de guia em elementos diferentes: lâmina e guia são especialmente importantes. Comprovou-se, por meio de experimentos, que com uso de alargadores de corte único é possível atingir velocidades de corte superiores, da ordem de 400m/min. (KRESS, 1975 apud WEINERT et al., 1998; KRESS, 1982 apud SCHOROETER, 1989; KRESS, 1987; ERDEL, 1989; e WEINERT et al., 1989).

2.3.1 - Geometria dos Alargadores

A terminologia utilizada para os alargadores foi bem discutida por STEMMER (1995), FERRARESI (1975) e SCHROETER (1989). Os alargadores distinguem-se: os de desbaste e os de acabamento. Os alargadores de desbaste são utilizados como preparação para os alargadores de acabamento, garantindo melhores condições que os pré-furos brutos e aqueles executados por brocas helicoidais. De maneira geral, os alargadores são compostos por uma haste que pode ser cilíndrica ou cônica e, segundo catálogos de fabricantes, os mesmos podem ser fixos em mandris por parafusos laterais (tipo Weldon). A figura 2.2 apresenta a terminologia usada em mandris hidráulicos, por interferência térmica ou diretamente em adaptadores (HSK).

A figura 2.2 ilustra a terminologia usada para os alargadores, segundo a NBR 7487.

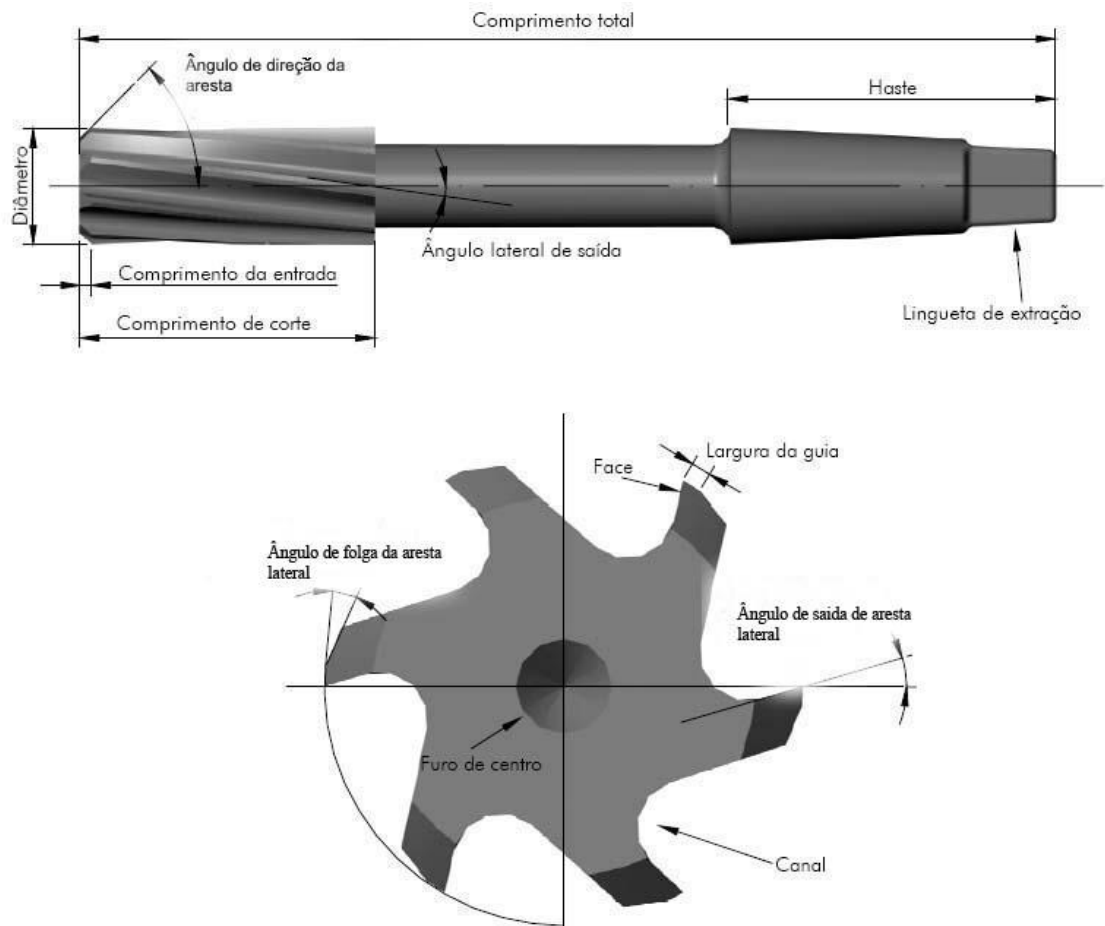


Figura 2. 2 - Nomenclatura de alargadores (SKF, 1987 apud BORILLE, 2005)

2.3.2 - Materiais para Alargadores

Existe uma série de materiais que podem ser empregados na fabricação de ferramentas de corte, tais como: aços ferramenta, aços rápido, metal duro. Esses materiais podem ser empregados tanto na forma de insertos expansíveis como integralmente. Os principais requisitos para um material de alargador são:

- tenacidade;
- resistência à compressão;
- resistência à abrasão;
- resistência térmica (dureza a quente e choque térmico) e

- resistência ao choque e a fadiga.

O metal duro é um importante material para ferramentas utilizado na indústria moderna devido à combinação de dureza à temperatura ambiente e dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade, combinação possível de se obter pela variação de sua composição química.

Os seus constituintes fundamentais são misturados na forma de pó e submetidos a um processamento que compreende compressão, sinterização e retificação, resultando em um produto consolidado e denso, com as características de resistência mecânica, dureza e tenacidade adequada para o emprego em ferramentas de corte (BORK, 1995). Em geral, as hastes dos alargadores são fabricadas de aço rápido ou de aço ferramenta de mais baixa liga, enquanto os insertos são de metal duro nas arestas de corte. Em razão da carga imposta sobre a ferramenta na operação de alargamento ser menor que na furação, alargadores requerem menos tenacidade que as brocas. Em contrapartida, os alargadores de aço rápido devem alcançar níveis de dureza superiores a 65 HRC, conseqüentemente, melhorias substanciais são obtidas tanto no acabamento superficial quanto na vida da ferramenta (METALS HANDBOOK, 1989).

Muitos alargadores padrões e especiais são fabricados de metal duro inteiriço. Embora mais caro que o aço rápido, o metal duro frequentemente possui uma vida dez vezes ou mais quando se alarga aço com dureza próxima de 20 HRC. Em usinagem de aços com dureza superior a 40 HRC, os alargadores de metal duro são sempre indicados (METALS HANDBOOK, 1989). Ohgo et al. (1994) verificaram que os alargadores de metal duro tiveram vida maior que os de aço rápido na usinagem do ferro fundido cinzento, com pequena ou mesmo na ausência de fluido de corte. Na usinagem de bronze, Il'in et al. (apud BEZERRA, 1998) obtiveram um melhor acabamento da superfície, incluindo maior produtividade e menor custo de usinagem, utilizando alargadores de canal reto com lâminas de metal duro inseridas quando comparados aos alargadores de aço rápido.

Existe a possibilidade de se obter propriedades distintas nos metais duros, pela mudança específica dos carbonetos e das proporções do ligante (KÖNIG, 1981).

Existem no mercado três classes de metal duro P, M e K, a classe P, que são WC + Co com adições de TiC, TaC e às vezes NbC são em geral, aplicados a usinagem dos aços e materiais produzem cavacos longos a classe K, que são os WC + Co puros, são comumente empregados na usinagem do ferro fundido e ligas não ferrosas que produzem cavacos curtos finalmente, a classe M, que é intermediária entre as duas primeiras (MACHADO et al., 1997).

Para que haja o máximo desempenho na operação de alargamento utilizando ferramentas de metal duro é necessário que o sistema máquina/ferramenta/peça de trabalho esteja o mais rígido possível. Seu uso torna-se questionável quando o comprimento não guiado e não sustentado do alargador for maior que seis vezes o seu diâmetro.

Quando há vibrações durante as operações de alargamento, a vida da ferramenta de metal duro é reduzida drasticamente sendo indispensável a sua substituição pelos aços rápidos (METALS HANDBOOK, 1989). A afinidade química do material da ferramenta com a peça de trabalho pode ser crítica, principalmente na área da seção de corte. Se a tendência for promover uma zona de aderência estável e forte, a força de usinagem poderá aumentar; caso contrário, a área da seção de corte poderá ser reduzida, diminuindo a força de usinagem.

2.3.3 - Seleção de Alargador

Qualquer alargador deve ser compatível com a máquina na qual será usado. À parte disto, seleção de alargador é escolhida principalmente por um ou mais fatores:

- composição e dureza do material;
- diâmetro do furo;
- configuração do furo;
- comprimento do furo;
- quantidade de cavaco removido;
- tipo de fixação, quando usado;
- precisão e exigências de acabamento;
- quantidade de produção;
- custo inicial; e
- custo de recuperação.

Segundo Metals Handbook, 1989, a seleção de um alargador deve seguir as recomendações abaixo:

- quando mais de um tipo de alargador pode produzir resultados aceitáveis, a escolha pode depender de disponibilidade ou da prática, considerando a padronização das ferramentas;
- composição química e dureza do material da peça são mais prováveis em afetar a escolha do material do alargador que o tipo de alargador. Entretanto, existem exceções como, por

exemplo, os alargadores ocos que foram menos satisfatórios que os alargadores sólidos no caso de alargamento de materiais metálicos duros e tenazes;

- para furo maior que o 50 mm de diâmetro, alargadores sólidos feitos de aço rápido são raramente utilizados, principalmente pelo seu custo elevado. Desta forma, alargadores ocos são mais vantajosos para furos desta dimensão;
- quando o comprimento do furo é menor que duas vezes o seu diâmetro, vários tipos de alargadores podem ser utilizados. Porém, com um aumento da relação de comprimento-diâmetro, em geral, ocorrem problemas de precisão. Nesses casos, é comum utilizar alargadores especiais;
- quando o sobre metal é grande, um alargador sólido ou especial é usualmente preferido. Alargadores ocos não são adequados para remoção de grandes quantidades de sobremetais. Em algumas aplicações de remoção pesada, o alargamento é feito em dois estágios, usando um alargador oco para a segunda fase;
- quando grandes quantidades de cavaco são removidas, um alargador inteiriço especial normalmente é preferido. Não é prática utilizar alargador expansível para remoção de grande quantidade de cavaco;
- o tipo de fixação determina se há ou não necessidade de um alargador guiado; requisitos de precisão e acabamento estão relacionados com vários outros fatores. Nos casos de alta precisão, a peça deverá ser rotativa, se possível. Portanto, a haste do alargador deve se encaixar com a máquina selecionada. A precisão depende da rigidez de montagem e do método de condução do alargador. Alargadores auto-guiados são geralmente escolhidos para alta precisão e acabamento fino no alargamento de furos compridos;
- para o alargamento de algumas peças que podem ser produzidas com uma afiação do alargador, o método de afiação mais simples é a escolha lógica. Para a produção em larga escala, tipos ajustáveis devem ser considerados a fim de minimizar a afiação e o tempo improdutivo;
- o custo do alargador deve ser considerado levando-se em consideração o custo inicial, o custo de manutenção e o custo a ser recuperado. Custo inicial alto é frequentemente compensado pelo baixo custo de manutenção e alta produção. Alargadores com lâminas de metal duro inseridas são mais dispendiosos que os alargadores sólidos de aço, mas podem usinar um número muito maior de furos. É prática comum retrabalhar um alargador gasto

para uma dimensão menor do que vendê-lo como sucata. A economia do retrabalho depende principalmente se há ou não equipamento disponível. Comprar tal equipamento depende da quantidade de ferramentas a serem retrabalhadas. Alargadores gastos podem, em alguns casos, ser vendidos às ferramentarias onde eles serão retrabalhados para a revenda. Neste caso, o custo recuperado será muito maior do que a venda dos mesmos como sucata;

- o tipo de fixação determina se há necessidade de um alargador guiado
- requisitos de precisão e acabamento estão relacionados com vários outros fatores. Nos casos de alta precisão, a peça deverá ser rotativa, se possível. Portanto, a haste do alargador deve se encaixar com a máquina selecionada. A precisão depende da rigidez de montagem e do método de condução do alargador. Alargadores auto guiados são geralmente escolhidos para alta precisão e acabamento de furos compridos; e
- a extensão na qual um alargador pode ser retrabalhado é também governado pelo projeto do alargador. Um alargador grande pode ser retrabalhado progressivamente até dimensões menores, mas essa prática é limitada pelo projeto do alargador. O limite de redução do diâmetro do alargador pelo retrabalho é normalmente regido pela profundidade do canal. Quando o diâmetro é pequeno demais, uma redução adicional requer um aprofundamento das estrias, o que se torna inviável, e o alargador é normalmente sucateado.

2.4 - Classificação dos alargadores

Os alargadores podem ser classificados conforme apresentados a seguir:

2.4.1 - Quanto ao tipo de operação

Os alargadores podem ser de desbaste ou de acabamento. Os alargadores de desbaste são empregados no alargamento de furos em bruto, como os obtidos por fundição ou forjamento, com o objetivo de melhorar as tolerâncias e o acabamento. A sua forma é semelhante à das brocas helicoidais, mas sem a presença da aresta transversal, e o número de arestas varia de 3 a 4 (FERRARESI, 1973 e STEMMER, 1995).

Os alargadores de acabamento proporcionam furos calibrados, com exigências quanto ao acabamento e à tolerância de forma e de medida. Outros processos de acabamento, como a furação de precisão e a retificação, são capazes de proporcionar superfícies de qualidade superior. Deste modo, justifica-se a utilização de alargadores de acabamento na produção em série, já que um alargador pode ser aplicado em um grande número de furos (FERRARESI, 1973), cujos trabalhos podem ser feitos em centros de usinagem (ECKHARDT, 1993).

2.4.2 - Quanto ao tipo de dentes (canais)

Os alargadores podem ser de dentes retos ou helicoidais, conforme mostra a figura 2.3. Os primeiros apresentam menor custo e maior facilidade de afiação e seu uso proporciona melhores resultados nos trabalhos de precisão (KÖNIG, 1997, STEMMER, 1995 e SCHROETER, 1989).

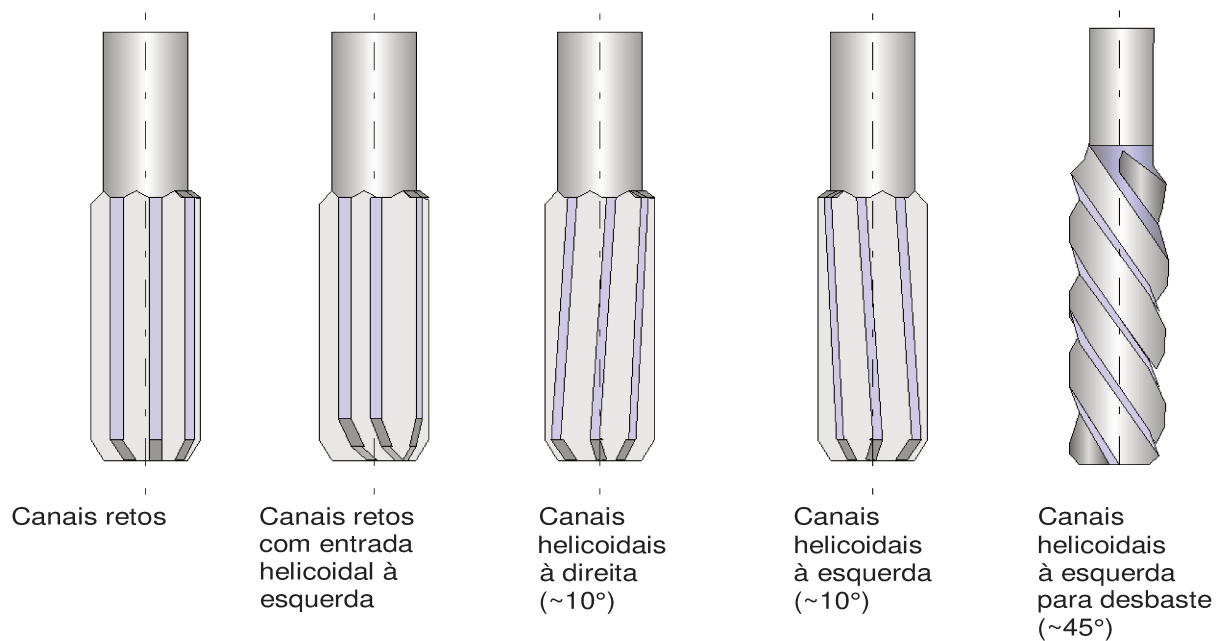


Figura 2. 3 - Tipos de canais em alargadores (SKF, 1987).

Os alargadores de dentes helicoidais devem ser utilizados no caso de alargamento de furos com interrupções na parede (rasgos de chaveta, furos e fendas) tendo suas hélices orientadas à

direita ou à esquerda. A hélice é dita a direita quando, olhando-se o alargador de cima, na direção normal ao seu eixo, esta se desenvolve para a direita (STEMMER, 1995 e FERRARESI, 1973).

O sentido da hélice em relação ao sentido de rotação da ferramenta exerce influência no valor da força de avanço da ferramenta (sentidos concordantes reduzem a força de avanço). Por conseguinte, é aconselhável adotar sentido discordante para os metais leves e os aços de baixo carbono e sentido concordante para os aços com durezas elevadas. Na usinagem de ferro fundido e bronze devem ser empregados dentes retos (FERRARESI, 1973). A tabela 2.1 apresenta os valores de ângulo de inclinação da hélice para alargadores de acabamento.

Tabela 2. 1 - Ângulos de inclinação da hélice (FERRARESI, 1973).

Material	Ângulo de hélice [°]	Sentido da hélice	Sentido da rotação
Metais leves	20	Esquerda	Direita
Aço (σ_t 40 kg/mm ²)	8	Esquerda	Direita
Aço (σ_t 50 – 90 kg/mm ²)	6	Direita	Direita
Aço (σ_t 90 kg/mm ²)	9	Direita	Direita
Ferro fundido e bronze	0	Reta	Direita

2.4.3 - Quanto à fixação

Os alargadores podem ter haste cônica ou cilíndrica, conforme ilustrado na figura 2.4

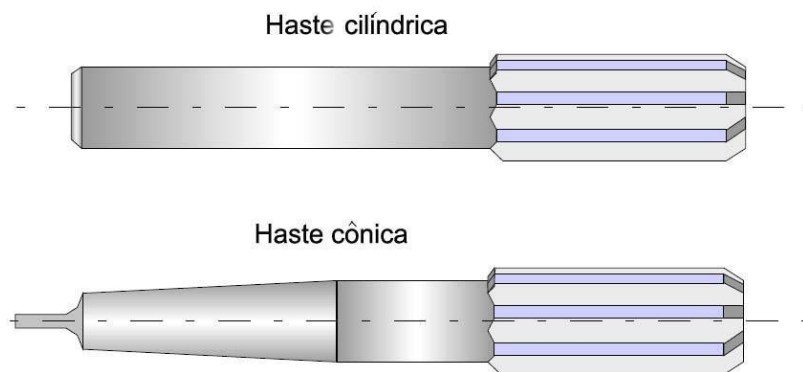


Figura 2. 4 - Tipos de fixação de alargadores (STEMMER, 1995).

2.4.4 - Quanto ao sentido de corte

Os alargadores podem ser de corte à direita ou à esquerda. O sentido de corte é verificado examinando o alargador de topo, posicionando-o horizontalmente em relação ao observador. Se o dente inferior corta da esquerda para a direita, o corte é à direita. Nesse caso, o alargador observado de topo corta em sentido anti-horário. Caso contrário, o corte é à esquerda (ATENPOHL, 1994).

Geralmente os alargadores são de corte à direita. Dessa maneira, o uso de uma hélice esquerda faz com que o cavaco seja empurrado para frente, evitando danos à superfície já usinada. Além disso, ocorre um empuxo axial que fixa melhor a ferramenta no cone e elimina eventuais folgas do equipamento máquina.

A pressão adicional exercida e o sentido de hélice contrário ao sentido de corte reduzem a tendência da ferramenta em desenvolver um maior avanço quando uma região de corte mais fácil é encontrada. Se a máquina utilizada não estiver em condições normais de funcionamento recomenda-se o emprego desse tipo de alargador.

O corte com alargadores à direita com hélice à direita faz com que o cavaco seja puxado para cima e, se penetrar entre as paredes do furo e as guias do alargador podem provocar arranhões. A força é no sentido de arrancar a ferramenta do mandril, o que faz com que esse tipo de alargador seja utilizado somente no alargamento de furos cegos, nos quais o cavaco jogado para frente não teria lugar para se alojar (KÖNIG, 1997, STEMMER, 1995 e MILLER, 1986).

As ferramentas de alargar só devem ser giradas na direção do corte, mesmo ao retirá-las do furo; girá-las para trás pode provocar a quebra dos seus dentes (STEMMER, 1995 apud BORILLE, 2005).

2.4.5 - Quanto ao uso

A figura 2.5 mostra que os alargadores podem ser manuais ou de máquina. Os alargadores manuais possuem um chanfro secundário de entrada para servir como guia e facilitar a entrada da ferramenta no furo, não realizando corte. O chanfro secundário abrange cerca de um quarto do comprimento do alargador (STEMMER, 1995). Em geral, o número de dentes nos alargadores

manuais é maior quando comparado ao alargador de máquina de igual diâmetro (FERRARESI, 1973).

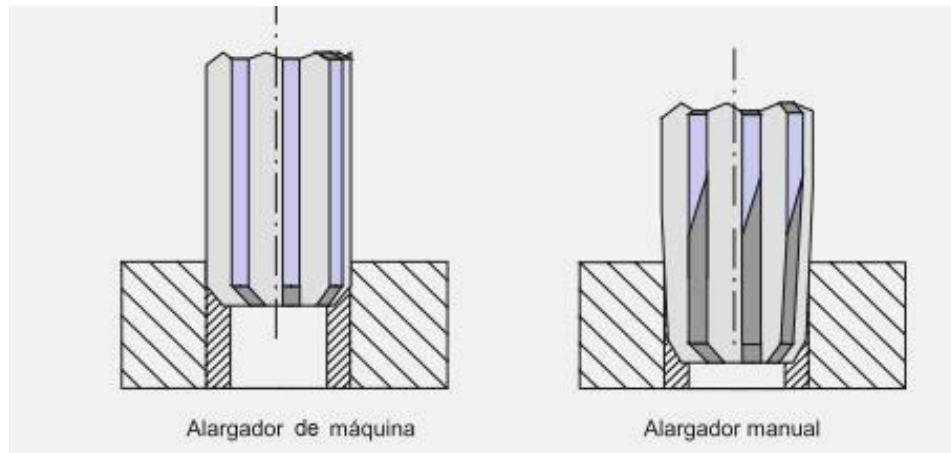


Figura 2. 5 - Alargadores de máquina e manual (STEMMER, 1995).

2.4.6 - Quanto à regulagem

Podem ser fixos ou ajustáveis. Nos alargadores fixos a ferramenta corta sempre com o mesmo diâmetro. Nos ajustáveis, é possível variar o diâmetro dentro de certa faixa de valores, através de uma regulagem radial dos dentes (SCHROETER et al., 2001 e SCHROETER, 1989).

2.4.7 - Quanto à geometria dos furos

Os alargadores podem ser cônicos ou paralelos conforme ilustrado na figura 2.6. Os alargadores cônicos são utilizados para tornar cônicos furos para pinos ou cones Morse. Podem ser de desbaste, semi-acabamento ou de acabamento, sendo que os de desbaste possuem rasgos para a quebra de cavaco (STEMMER, 1995).

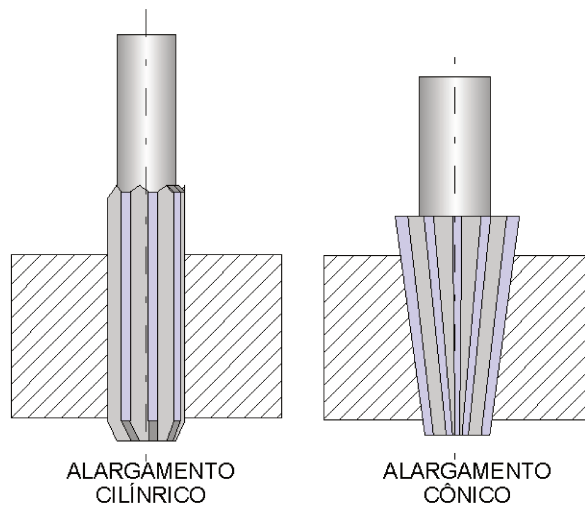


Figura 2. 6 - Alargamento cilíndrico e cônico (STEMMER, 1995).

2.4.8 - Quanto ao número de arestas

Os alargadores podem ser de corte único (um dente) ou de corte múltiplo (vários dentes) geralmente, possuem um número par de dentes (ASTME, 1959 apud BORILLE, 2005). Com a finalidade de diminuir as forças de corte por aresta e melhorar o acabamento da superfície é desejável um grande número de arestas, figura 2.7.

No entanto, o aumento do número de arestas eleva o atrito nas paredes internas do furo, prejudicando o processo e favorecendo o “engripamento” da ferramenta. Isso torna a formação do cavaco desfavorável e dificulta a sua saída, já que o aumento do número de arestas conduz à redução do tamanho dos canais de saída do cavaco (FERRARESI, 1973 apud BORILLE, 2005).

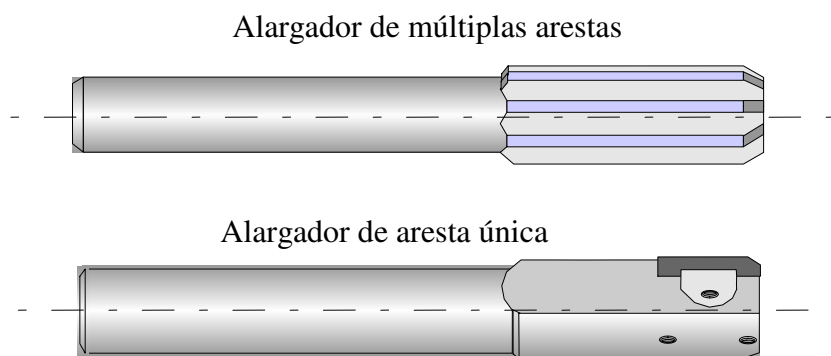


Figura 2. 7 - Alargador de aresta única e de múltiplas arestas (STEMMER, 1995).

Nos alargadores de aresta única, as funções de guia da ferramenta e de corte são realizadas por dois elementos distintos, as guias e a aresta, respectivamente. Em geral, a aresta é montada na forma de inserto intercambiável e ajustável. A presença de apenas uma aresta mantém os valores de avanço (por rotação) baixos. Entretanto, a produtividade é compensada pelo aumento da velocidade de corte, podendo chegar a $V_c=500$ m/min. para os aços (SHROER apud WEINERT et al., 2002).

Existe uma condição ótima para o número de arestas de um alargador para cada diâmetro. A Tabela 2.2 apresenta o número de arestas recomendado para alargadores de acabamento (FERRARESI, 1973). Quando se deseja obter furos com bom acabamento e tolerâncias pequenas é recomendado o uso de alargadores com número ímpar de arestas (MILLER, 1986).

Tabela 2. 2 - Número de arestas em alargadores de acabamento (FERRARESI, 1973 apud BORILLE, 2005).

Diâmetro [mm]	Número de arestas (aço, ferro fundido e bronze).	Número de arestas (alumínio)
até 12	4 – 6	4
12 – 20	6 – 8	4 – 6
20 – 30	8 – 10	6 – 8
30 – 40	10 – 12	6 – 8
40 – 50	12 – 14	8 – 10
50 – 60	14 – 16	8 – 10
60 – 100	16 – 20	10 – 12

Para evitar o aparecimento de vibrações durante o corte, a divisão das arestas ao longo da superfície do alargador não deve ser constante, isto é, a distância entre dois dentes sucessivos na

periferia do alargador deve ser variada conforme exibe a figura 2.8 (KÖNIG, 1997 e STEMMER, 1995). A ocorrência de uma eventual vibração periódica teria dependência do número de dentes e da rotação, e conduziria ao aparecimento de marcas de trepidação na parede interna do furo. No caso de ferramentas de passo variado é necessário que as arestas sejam, duas a duas, diametralmente opostas, de forma a permitir a medição do diâmetro em qualquer posição (STEMMER, 1995 e FERRARESI, 1973).

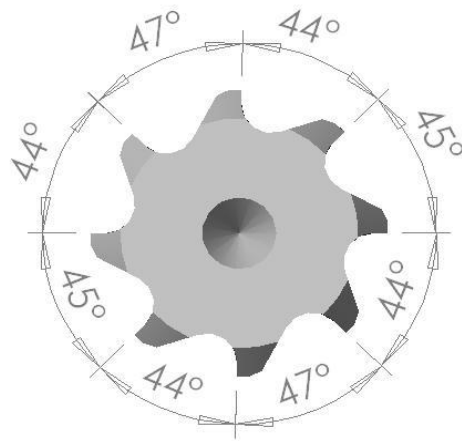


Figura 2. 8 – Alargador com passos diferentes entre os dentes (STEMMER, 1995).

2.4.9 - Quanto à forma de entrada

Os alargadores podem ter a entrada conforme mostrado na figura 2.9, sendo que o diâmetro de entrada de um alargador deve ser em torno de 93 a 98% do diâmetro nominal (STEMMER, 1995). Podem ter um segundo chanfro, com ângulo entre 1 e 10 graus localizado imediatamente após o primeiro chanfro.

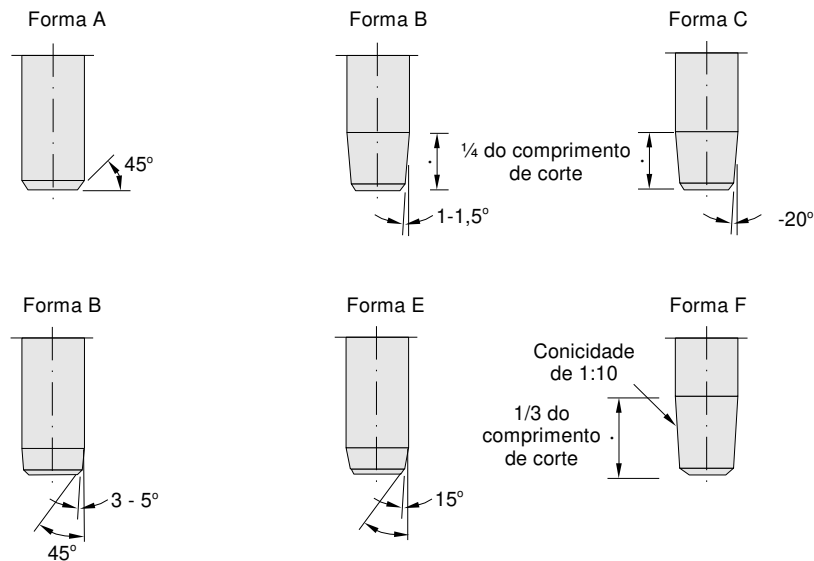


Figura 2. 9 - Formas de entrada de alargadores (STEMMER, 1995 e SKF, 1987).

2.5 - Tipos de Alargadores

Os alargadores padrões incluem os principais tipos (METALS HANDBOOK, 1989):

- alargador de mandril de canal reto;
- alargador de mandril de canal helicoidal;
- alargador de corte frontal;
- alargador de expansão;

Também há numerosos tipos de alargadores especiais, incluindo os alargadores ferramenteiros, alargador cônico, escareadores de tubos, ferramentas conjugadas broca-alargadora e alargadores de diâmetro múltiplo.

2.5.1 - Aplicações dos alargadores de canais retos

Alargadores de canais retos são geralmente alargadores inteiriços projetados para uso em máquinas como furadeira de coluna e torno revólver. Eles estão disponíveis com haste cônica ou reta, figura 2.10 e, portanto, podem ser mantidos em buchas bipartidas ou de anéis, ou por parafusos de pressão.

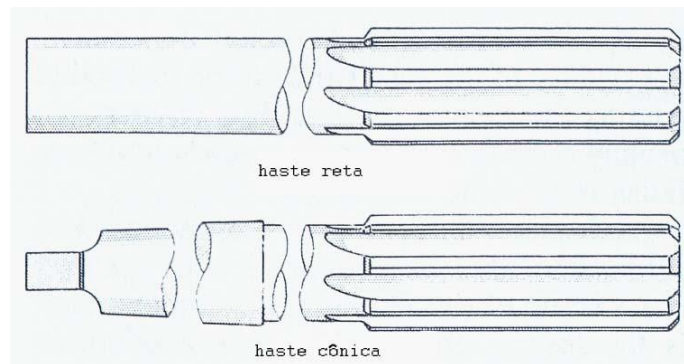


Figura 2.10 – Alargadores de mandril de canal reto (METALS HANDBOOK, 1989).

Normalmente os alargadores de canais retos são afiados com um chanfro de 45° e são usados em alargamento de grande maioria dos metais. Porém, rasgos de chaveta e outras irregularidades em furos, requisitos de tolerâncias, furos cegos, sobre metal a ser removido, ou mesmo a dureza do material podem exigir o uso de outro tipo de alargador.

2.5.2 - Aplicações dos alargadores de canais helicoidais

Alargador de canal helicoidal difere de alargador de canal reto somente pelo fato dos seus canais serem fresados sob a forma de hélice. Eles são usados nas mesmas máquinas e estão disponíveis com haste cônica ou reta, nas mesmas dimensões do alargador de canal reto. A figura 2.11 ilustra um alargador de canal helicoidal.

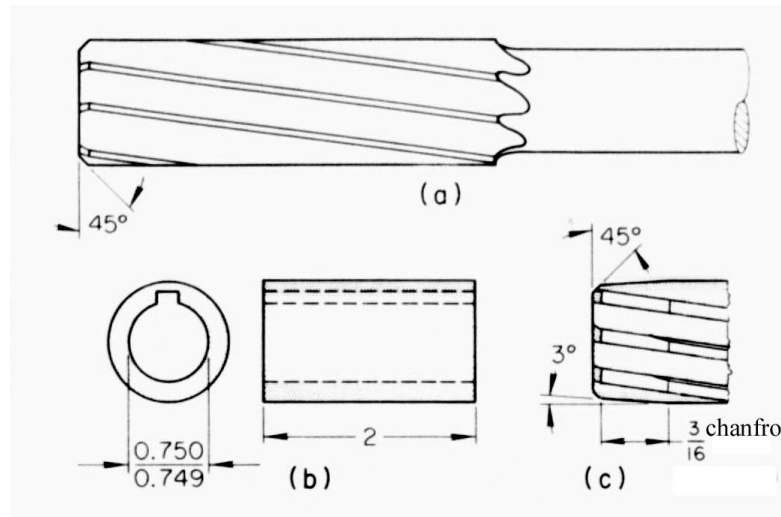


Figura 2. 11 - Alargador de canais helicoidais para furo com rasgo enchavetado, de estria helicoidal convencional (a), com rasgo enchavetado (b) e com ângulo de inclinação modificado(c). (METALS HANDBOOK, 1989).

2.5.3 - Aplicações de um alargador frontal

Um alargador de corte frontal, com canal reto ou helicoidal, não possui chanfro na extremidade para usar como guia; ao contrário, sua extremidade possui arestas de corte e ângulos retos ao eixo do alargador assemelhando-se a fresa de topo conforme exemplificado na figura 2.12.

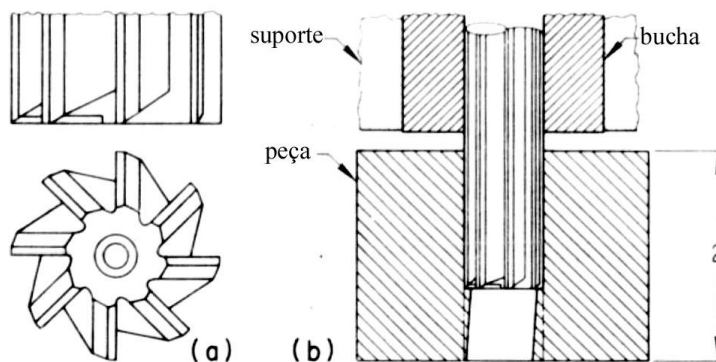


Figura 2. 12 - Alargadores de corte frontal (a), alargador de corte frontal furos cegos (b) (METALS HANDBOOK, 1989).

Os alargadores de corte frontal são usados em acabamento de furos cegos que têm pouco ou nenhum raio na base. Uma aplicação importante é a correção de desvios de paralelismo em furos passantes. Um alargador com extremidade chanfrada para guia normalmente seguirá o furo já realizado. Um alargador de corte frontal, quando guiado por uma bucha, pode corrigir o paralelismo por vários centésimos de milímetros (METALS HANDBOOK, 1989).

A principal desvantagem dos alargadores de corte frontal é que os mesmos produzem comparitivamente superfícies ásperas. Quando esses alargadores são usados para correção de desvios de furos, eles são normalmente empregados como alargadores de desbaste, e um alargador convencional é usado para o acabamento.

2.5.4 - Aplicações de Alargadores Ajustáveis

São constituídos de lâminas de aço rápido ou metal duro montadas em ranhuras de profundidade variável, permitindo modificar o diâmetro dentro de uma faixa de valores. Embora vários tipos de alargadores possam ser ajustáveis, incluindo o alargador de lâmina flutuante e os alargadores ocios expansíveis, o termo alargador de expansão é geralmente usado para se referir a um limitado número de tipos. Dois dos tipos mais comuns são os alargadores de lâmina inserida e de lâmina ajustável com pino de expansão conforme visto na figura 2.13.

Alargador de lâminas inseridas, os quais são confeccionados com ou sem regulagem de medida, são porta-ferramenta nos quais os rasgos são fresados para receber as lâminas. No tipo

ajustável, as lâminas são deslizadas em rasgos por uma porca de ajustagem para mudar o diâmetro de corte e são fixadas pela porca de pressão e pelo parafuso de pressão.

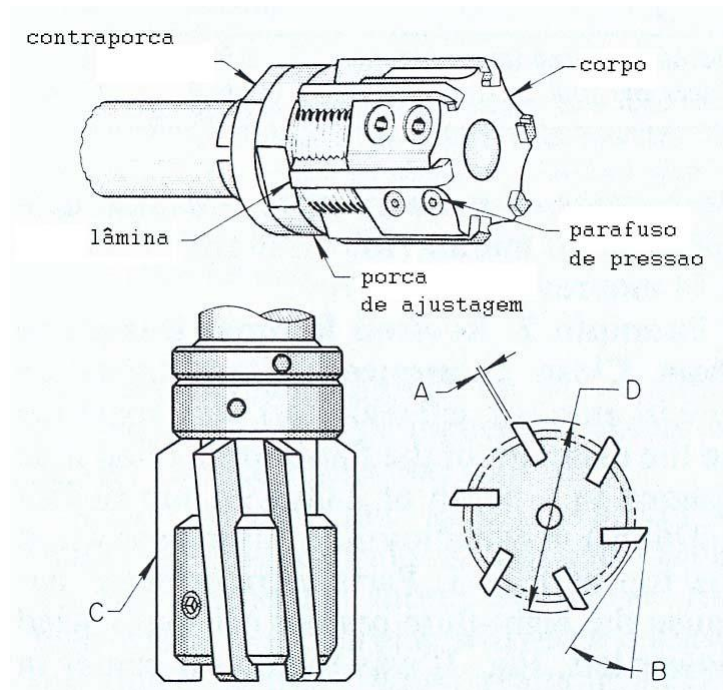


Figura 2. 13 - Alargador ajustável de lâmina inserida e detalhes típicos de projeto (METALS HANDBOOK, 1989).

Alargadores de lâmina inserida estão disponíveis com canais retos ou helicoidais. Eles são especialmente adequados para aplicações de alto volume de remoção, nos quais variações no material da peça de trabalho, na temperatura, na rigidez da máquina dificultam a manutenção da medida do furo.

Em muitas operações de alta produção os alargadores de lâminas inseridas e com pino de expansão são mais econômicos que os alargadores sólidos, porque as lâminas podem ser reafiadas várias vezes antes das suas substituições, e o corpo do alargador mantém-se intacto. Além disso, esses alargadores possuem outras duas vantagens sobre os alargadores sólidos:

- os materiais das lâminas podem ser trocados de acordo com a necessidade usando o mesmo corpo e

- na reafiação e projeto da ferramenta, detalhes como ângulo de conicidade, largura dos guias cilíndricos e folga radial são mais facilmente modificados por um alargador com lâmina inserida que por um alargador sólido.

2.5.5 - Aplicações dos Alargadores Especiais

Vários tipos de alargador projetados para aplicações especiais estão prontamente disponíveis, entre estes estão alargadores com canal de lubrificação, alargador ferramenteiro, cônico, de ponte, de tubo, conjugado broca-alargadora e alargador de diâmetro múltiplo.

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

Alargador ferramenteiro possui geometria cônica e um grande ângulo de hélice de aproximadamente de 0.013 mm/mm. Eles são empregados para alargamento de furos de pinos guias em partes de moldes.

Alargador cônico é usado para tornar cônico o furo para pino cônico ou cone Morse. Os tipos de desbaste têm rasgos para quebra-cavacos. São padronizados pela norma DIN 1896, para cones métricos (STEMMER, 1992).

Alargadores de ponte são utilizados para alargamento de furos em produtos como chapa e membros estruturais para a construção naval. Eles estão disponíveis com canais retos ou em hélice.

A ferramenta conjugada broca-alargadora permite eliminar uma operação secundária de furação para furos rasos. Dois tipos são mostrados na figura 2.14. As ferramentas em questão são confeccionadas por fresamento de dois canais em hélice por toda a extensão do comprimento das mesmas. A seção de broca é levemente menor em diâmetro que a seção do alargador e os seus estendem-se apenas sobre o comprimento de sua seção. A seção de alargador consiste de um a três canais fresados em cada espaço entre ranhuras à esquerda pela fresa nos canais da broca. Esse tipo de ferramenta está sujeito às mesmas dificuldades na reafiação como aquelas encontrados nas brocas escalonadas. Tais dificuldades podem ser superadas usando a ferramenta mostrada em figura 2.14 b. Com esta, os dois canais e arestas de cortes da broca prolongam-se

para trás por meio da seção do alargador; as arestas de corte do alargador estão em adição a estas e começam a uma distância adequada satisfatória da ponta de broca.

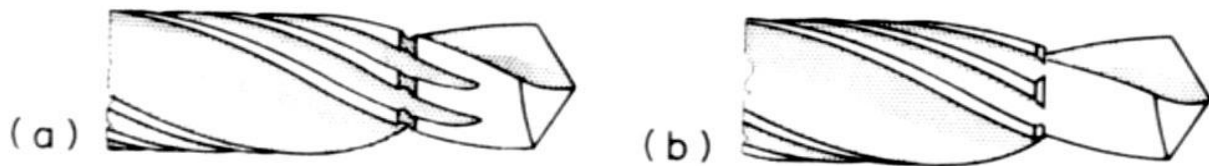


Figura 2. 14 - Dois tipos de ferramentas conjugadas broca-alargadora (METALS HANDBOOK, 1989).

Alargadores com múltiplo diâmetro são usados quando dois ou mais furos concêntricos de diferentes diâmetros devem ser alargados. Caso sejam usados alargadores distintos para cada furo serão necessárias várias intervenções por parte do operador, fato este que dificulta a manutenção do alinhamento dos furos. A figura 2.15 mostra três tipos de alargadores de múltiplo diâmetro.

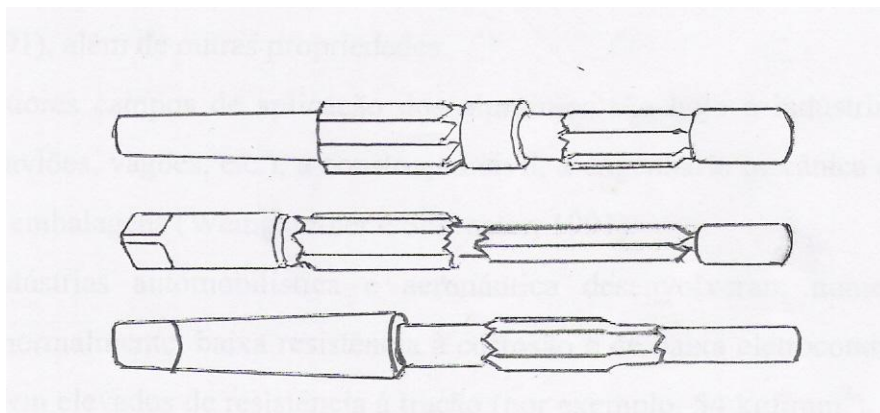


Figura 2. 15 - Três tipos de alargadores de diâmetro múltiplo (METALS HANDBOOK, 1989).

2.6 – Reafiação

Para se obter o máximo rendimento dos alargadores devem ser aplicados os mesmos princípios de afiação das ferramentas de corte. Um dos fundamentos é não permitir que a ferramenta perca o corte demasiadamente devido as operações de reafiação periódicas. Esta é limitada à entrada, devendo-se observar que cada corte seja retificado igualmente, caso contrário, a ferramenta poderá produzir furos acima do limite especificado. Recomenda-se que a reafiação de entrada seja feita em afiadoras de ferramentas a fim de manter a concentricidade das arestas. Caso contrário, ou seja, em operações de reafiação executadas manualmente, não há meios de preservar as arestas de corte idênticas (STEMMER, 1992, ROCEK et al., 1982 e STEMMER apud SCHOROETER, 1989).

Os alargadores de canal reto apresentam menor custo e maior facilidade de afiação e seu uso traz melhores resultados nos trabalhos de precisão (KÖNIG, 1997, STEMMER, 1995 e SCHROETER, 1989).

2.7 – O alumínio e suas ligas

2.7.1 – Principais Características

O alumínio e suas ligas constituem um dos materiais metálicos mais versáteis, econômicos e atrativos para uma vasta série de aplicações. Seu emprego como metal estrutural só é inferior a dos aços. Uma de suas principais características é sua elevada relação resistência/peso que o torna bastante útil na construção de estruturas móveis como veículos e aeronaves.

O alumínio e suas ligas possuem elevada condutividade térmica e elétrica, além de alta resistência à oxidação progressiva, já que os átomos da sua superfície se combinam com o oxigênio da atmosfera formando uma camada de óxido protetor que impede a progressão da deterioração do material. Além disso, o alumínio com determinados tratamentos térmicos e/ou elementos de liga, se torna resistente à corrosão em meios mais agressivos. O alumínio também encontra aplicações em peças decorativas graças à sua superfície brilhante e refletiva.

2.7.2 - Sistema de classificação

O sistema de classificação da “The Aluminum Association Inc.”, associação dos produtores norte-americanos. Os principais elementos de liga das ligas de alumínio incluem combinações dos seguintes elementos:

Cobre (Cu);

Magnésio (Mg);

Silício (Si);

Manganês (Mn) e

Zinco (Zn)

As ligas de alumínio podem ser divididas em conformadas ou trabalhadas, que podem ser divididas em dois grupos:

Ligas, destinadas à fabricação de produtos semi-acabados, como laminados planos (placas, chapas e folhas), laminados não planos (tarugos, barras e arames) perfis extrudados e componentes forjados.

Ligas fundidas, ligas destinadas a fabricação de componentes fundidos. Somando-se as ligas conformadas e as ligas fundidas, existem mais de 600 ligas reconhecidas industrialmente.

Estes dois grupos se subdividem em:

Ligas não tratáveis, isto é não são endurecidas por meio de tratamento térmico

Ligas tratáveis termicamente – São endurecidas por meio de tratamentos térmicos.

É importante destacar que o termo “tratamento térmico” é, no seu sentido mais amplo, qualquer operação de aquecimento ou resfriamento realizada para modificar as propriedades mecânicas, estrutura metalúrgica ou estado de tensões internas de um produto metálico. Nas ligas de alumínio, o tratamento térmico é restrito a operações específicas utilizadas para aumentar a resistência e dureza de ligas endurecíveis por precipitação (conformadas ou fundidas).

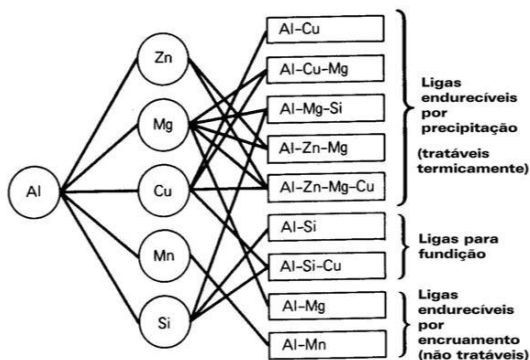


Figura 2.16 – Principais elementos de liga e classificação das ligas de alumínio (TOTTEN, 2003).

2.7.3 - Ligas Al-Zn

Entre as ligas da série 7XXX (Al-Zn) destacam-se os subgrupos Al-Zn-Mg e Al-Zn-Mg-Cu. Assim como as ligas Al-Cu e Al-Mg-Si são ligas endurecíveis por precipitação, ou seja, mediante tratamento térmico controlado em condições específicas, geralmente de solubilização e envelhecimento, apresentam ganhos significativos de dureza. Encontram sua principal aplicação na fabricação de aviões, uma vez que essas ligas da série 7XXX são aquelas que atingem níveis elevados de resistência mecânica entre as ligas de alumínio (HATCH, 1990).

Apesar de sua elevada resistência mecânica, as ligas Al-Zn-Mg foram estudadas por muito tempo, principalmente com o intuito de superar a desvantagem significativa causada por sua baixa resistência à corrosão sob tensão. Embora a liga 7076 tenha sido introduzida na fabricação de aeronaves em 1940, somente com o desenvolvimento da liga 7075, introduzida em 1943, esse tipo de liga ganhou maior presença na indústria aeronáutica. Uma nova versão, com maior resistência mecânica, a liga 7178 apareceu em 1951.

A liga de alumínio com maior resistência mecânica já produzida comercialmente, a 7001, foi introduzida em 1960. Entretanto, dificuldades de produção, baixa tenacidade e baixa resistência mecânica na têmpera T73 inviabilizaram seu uso extensivo.

Mais recentemente, ligas 7X49 e 7X50, assim como novas versões de mais alta pureza da liga 7075 têm sido empregadas em maior escala devido à sua alta resistência mecânica e maior

ductilidade. Quando essas ligas Al-Zn-Mg são razoavelmente superenvelhecidas nas têmperas T7X, a resistência mecânica atingida é inferior à da têmpera T6, mas consegue-se praticamente a imunidade à corrosão sob tensão (HATCH, 1990).

As ligas 7X49, 7X50, 7175 e 7475 nas têmperas T6X e, particularmente, nas têmperas T7X, assim como as ligas 2124, 2419 e 2048 nas têmperas T8X, apresentam uma combinação favorável de propriedades. Elas têm alta resistência mecânica, alta resistência à corrosão sob tensão e, quando submetidas a tratamentos térmicos e mecânicos especiais, alta resistência ao crescimento instável de trincas, ou seja, tenacidade à fratura (HATCH, 1990).

Nos últimos anos as ligas Al-Zn-Mg têm recebido muita atenção. Essas ligas contêm teores reduzidos de zinco e magnésio com pequenas adições de manganês, cromo, titânio e zircônio. O cobre é eliminado ou limitado a teores muito baixos. Esse controle de composição química reflete-se na completa solubilização dos elementos de liga em temperaturas de tratamento térmico em contraste com as ligas de uso aeronáutico e alta resistência mecânica.

Os níveis de resistência mecânica ótimos são atingidos mesmo com taxas de resfriamento lentas. A menor sensibilidade ao resfriamento destas ligas permite que, quando usadas na fabricação de peças espessas, sejam reduzidas as distorções e as tensões residuais. Isso é possível quando apenas zircônio (excluindo-se o cromo e o manganês) é adicionado para controlar o crescimento de grão (HATCH, 1990).

A liga 7039 foi desenvolvida para aplicações em blindagem e a liga 7005, extrudada, foi desenvolvida para aplicações estruturais em meios de transporte. As ligas 7016 e 7029 foram introduzidas para aplicações em que se exige bom acabamento superficial em peças brilhantes como pára-choques. Estas ligas contêm cobre em níveis moderados (0,5 a 1,0 %) e nenhum inibidor de recristalização. Entretanto, neste caso são necessários cuidados especiais para evitar crescimento de grão e é necessário um processamento ótimo para evitar a corrosão sob tensão (HATCH, 1990).

Nas tabelas 7.1 e 7.2 são mostradas a composição química e propriedades mecânicas de algumas ligas do sistema Al-Zn-Mg (HATCH, 1990).

2.7.4 - Tratamentos térmicos de ligas de alumínio

Considerando-se os tratamentos térmicos das ligas de alumínio, deve-se inicialmente diferenciar as ligas termicamente tratáveis (séries 2XXX, 6XXX, 7XXX e a maioria da série 8XXX), as que podem endurecer por meio de tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, daquelas cujo aumento de dureza só pode ser obtido mediante trabalho mecânico e, conseqüentemente, encruamento (séries 1XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX).

A solubilização consiste em aquecer o material a uma temperatura bem elevada, em geral próxima do ponto de fusão, de tal modo que, nesta temperatura, com os coeficientes de difusão dos elementos de liga no alumínio já suficientemente aumentados, seja possível a migração desses átomos, proporcionando a dissolução completa, depois de certo tempo de permanência nesta temperatura, das fases secundárias inicialmente presentes na liga.

Esta etapa do tratamento térmico é fundamental para assegurar que o envelhecimento subsequente, realizado em temperatura bem mais baixa e tempo mais prolongado, ocorram de modo controlado, de tal maneira que os precipitados sejam formados de forma controlada, no que se refere principalmente ao tamanho dos mesmos e conseqüentemente sua coerência com a matriz.

Quando é feito um resfriamento rápido em água, mantém-se à temperatura ambiente a solução sólida supersaturada. Posteriormente, a manutenção do material à temperatura ambiente (envelhecimento natural) ou a uma temperatura mais elevada (envelhecimento artificial) leva à formação de precipitados endurecedores.

No envelhecimento natural a cinética de precipitação é mais lenta do que no envelhecimento artificial, no qual o controle de temperatura e tempo permite a obtenção de valores de dureza mais elevados. No envelhecimento artificial é possível atingir o máximo de dureza para um determinado tempo de tratamento, após o qual o crescimento excessivo dos precipitados e a conseqüente perda de coerência dos mesmos com a matriz levam à queda de dureza denominada superenvelhecimento.

Como foi dito anteriormente, o tratamento de solubilização e envelhecimento (T6) gera resultados apenas nas chamadas ligas termicamente tratáveis, que podem apresentar aumento de dureza mediante tratamento térmico. Entretanto, todas as ligas de alumínio podem ter sua dureza reduzida por meio de tratamento térmico de recozimento (O), que leva à recuperação e

recristalização do material anteriormente encruado (endurecido) por algum tipo de trabalho mecânico.

As denominações de têmpera T42 e T62 também podem ser aplicadas a produtos trabalhados e termicamente tratados a partir de qualquer têmpera, quando esses tratamentos resultam em propriedades mecânicas compatíveis com essas têmperas.

O tratamento de solubilização e envelhecimento tem por objetivo a obtenção de precipitados finos que, ao mesmo tempo em que seja grande o suficiente para agirem como obstáculos ao movimento das discordâncias endurecendo a liga, sejam, por outro lado, pequenos o suficiente para manter a coerência com a matriz, fundamental para manter o efeito de endurecimento. A solubilização, ao garantir a obtenção de uma solução sólida (dissolução dos elementos de liga) mantida à temperatura ambiente de modo instável por meio de resfriamento rápido, permite um melhor controle do crescimento dos precipitados durante o posterior envelhecimento.

Com o tempo ocorre perda parcial de coerência, através do surgimento de discordâncias de interface entre o precipitado e a matriz, que está associada a uma pequena queda de dureza. Prolongando o envelhecimento para tempos excessivos, ocorre a perda total de coerência, havendo a formação de uma interface entre o precipitado e a matriz, aliviando totalmente as tensões, provocando amolecimento significativo.

Além disso, como os precipitados incoerentes, estáveis e muito grandes encontram-se muito afastados uns dos outros devido ao coalescimento, deixa um longo caminho livre para a movimentação das discordâncias, o que também favorece o amolecimento típico do superenvelhecimento.

2.7.4.1 - Tratamento térmico de homogeneização

Trata-se do processo de aquecimento do metal para chegar à temperatura de trabalho. A homogeneização está diretamente relacionada à liga do metal, ao processo que será adotado e ao produto, conseguindo-se com isso, trabalhar melhor o metal, ou seja, aquece, amolece e trabalha. A estrutura metalúrgica original do metal, dependendo do aquecimento aplicado, pode ser alterada, pois quanto maior for este aquecimento, mais energia os átomos recebem e mais instáveis eles se tornam.

Se houve algum tipo de tratamento térmico anterior a homogeneização, por exemplo, a solubilização, melhor será atingida a homogeneização e menos alterações estruturais sofrerá o metal (isso é claro, levando-se sempre em consideração o tempo e a temperatura envolvidos).

No caso de peças fundidas, se não houve nenhum tipo de tratamento térmico prévio na liga de uma peça, e necessita-se homogeneizar o metal para trabalhar, normalmente parte-se de uma estrutura "Bruta de Fusão", ou seja, como saiu da fundição. Esta estrutura bruta de fusão pode fragilizar uma peça, pois ela não é a melhor estrutura metalúrgica para se trabalhar, podendo gerar dificuldades de trabalho e com o tempo fragilização da peça. Essa é uma das razões do porque as peças simplesmente fundidas e não tratadas, são mais difíceis de serem trabalhadas, não apresentam constância e seus percentuais de refugo, rejeito ou necessidade de retrabalho, podem ser maiores.

2.7.4.2 - Recozimento

O recozimento pode ser necessário antes das operações de conformação mecânica a frio, devido à ocorrência de encruamento durante essas operações. É utilizado em todos os tipos de ligas de alumínio, tanto as endurecíveis por precipitação como as que não endurecem por precipitação, entretanto, no caso das primeiras, deve haver um controle de temperaturas mais cuidadoso, para evitar a ocorrência de precipitação durante um tratamento de recozimento para recristalização, por exemplo.

O tipo de recozimento a ser realizado numa liga evidentemente depende de sua história termomecânica prévia e do tipo de microestrutura resultante dessas operações anteriores. O encruamento resultante de uma têmpera F (de fabricação) em geral pode ser eliminado mediante aquecimento a uma temperatura da ordem de 345 °C e a manutenção a esta temperatura por um tempo adequado para garantir uniformidade térmica.

Muito comum existir a necessidade de realizar o recozimento do metal, entre operações de laminação a frio, pois sucessivas laminações podem endurecer o metal e este endurecimento pode fragilizar o mesmo. O endurecimento do metal após conformação a frio chama-se de encruamento. O recozimento trata-se do aquecimento do metal após um eventual encruamento.

Também está ligada diretamente a liga a ser trabalhada e ao processo prévio que sofreu este metal antes do recozimento. O processo de recozimento é realizado para aliviar tensões e garantir

o dimensional em peças fundidas. O recozimento pode ser utilizado em todas as ligas de alumínio. O recozimento só se aplica às ligas fundidas quando é necessário um rigoroso controle dimensional ou quando o material será submetido posteriormente a alguma operação de conformação não convencional (HATCH, 1990).

2.7.4.3 - Solubilização

O processo térmico de solubilização é o aquecimento do metal alumínio (peça, barra, tarugo, placa, etc.) a uma temperatura muito elevada, no entanto, ainda inferior a temperatura de fusão da liga, a fim de colocar em solução sólida a maior quantidade possível de átomos de soluto.

Numa linguagem mais coloquial, desejam-se dissolver o máximo possível todos os elementos presentes na liga de alumínio, sendo que esta deve permanecer no estado sólido. Essa dissolução dos elementos presentes na liga necessita de um determinado tempo e temperatura para ser concluída, e esse tempo deve ser o suficiente para que também haja a total dissolução de todas as fases do metal.

Testes experimentais e laboratoriais podem determinar qual é o tempo ideal para que ocorra a total dissolução de todos os elementos, isso depende da liga, da geometria da peça e das espessuras de parede da peça (no caso de haver mais de uma).

Deve-se tomar o cuidado para não oxidar demasiadamente a superfície da peça (no caso de não haver atmosfera controlada), aumentar demasiada ou descontroladamente o tamanho de grão do material (o grão também aumenta em função do tempo em temperatura) e consumir energia desnecessária na solubilização.

O melhor método para uma correta definição do tempo, da velocidade de aquecimento e da temperatura ideal para cada liga e cada peça, tendo assim uma correta solubilização, é a metalografia em corpos de prova tratados, em tempos crescentes, em uma dada temperatura a ser testada, para cada tipo diferente de liga de alumínio. Isso é muito útil em peças que possuem geometrias muito diferenciadas. O processo de solubilização é vital para um perfeito envelhecimento posterior e é um fator preponderante para atingir as características mecânicas desejadas.

Logo após a solubilização sob temperatura e tempo corretos o material deve ser temperado, ou seja, resfriado rapidamente. Esta etapa do processo térmico de solubilização é de suma importância e requer máxima atenção, pois se deseja que a solução sólida supersaturada, que anteriormente estava em alta temperatura, permaneça a temperatura ambiente. O meio usualmente utilizado para resfriar o material é a água. O resfriamento ao ar permite a formação de precipitados descontroladamente, pois não proporciona ao metal o choque térmico necessário para uma melhor resposta. Isso é muito importante para o tratamento térmico posterior de envelhecimento.

2.7.4.4 - Endurecimento por precipitação – Envelhecimento artificial

Logo após a solubilização e o resfriamento rápido (têmpera), inicia-se o processo de envelhecimento, seja ele natural (a temperatura ambiente e sem a influência de fornos) ou artificial (a uma temperatura mais elevada, controlada no interior de fornos).

O envelhecimento (seja artificial ou natural) é o processo térmico pelo qual passa o metal alumínio após ser solubilizado e resfriado rapidamente. Proporciona uma correta difusão dos átomos de soluto (aquilo que foi dissolvido na solubilização) e permite a formação de finos precipitados endurecedores. Em tamanho e quantidade suficientes para impedir a movimentação das discordâncias e, por consequência, endurecer a liga.

Se for a temperatura ambiente, trata-se do envelhecimento natural, se for a uma temperatura com tempo controlado trata-se de envelhecimento artificial. A temperatura para o envelhecimento da liga de alumínio conforme Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT 6063), por exemplo, é de 175° Celsius e o tempo nesta temperatura, pode chegar a 8 horas, sendo que isso pode mudar ligeiramente em função da geometria e da espessura da peça.

O processo de envelhecimento natural é realizado sob temperaturas bem inferiores e tempos superiores se comparado ao processo de envelhecimento artificial. Além de não se controlar completamente a formação dos precipitados que endurece o material, os tempos para a geração destes precipitados são mais longos, ou seja, a formação dos precipitados é lenta e demorada, se comparado ao envelhecimento artificial.

Se o processo de envelhecimento não for corretamente controlado pode não se formar a quantidade e a distribuição correta dos precipitados, não se atingindo a resistência mecânica desejada, ou também, pode se gerar um excesso no tamanho dos precipitados, fato que também não proporciona as melhores características mecânicas. Este segundo caso, é conhecido como superenvelhecimento.

2.7.4.5 - Tratamentos Termomecânicos – Envelhecimento

Termomecânico

Constituem-se nos tratamentos nos quais a deformação plástica é realizada antes, após, ou intercalada com o tratamento térmico de envelhecimento. As práticas de tratamentos termomecânicos mais simples correspondem aos tratamentos T3, T8 e T9.

A taxa e o grau de endurecimento por precipitação aumentam muito com a deformação anterior ao envelhecimento devido à introdução de discordâncias que atuam como sítios para a nucleação preferencial de precipitados, entretanto, a resposta a esse tipo de tratamento varia muito de liga para liga, sendo algumas mais propensas do que outras ao ganho da dureza proporcionada por essa sequência de tratamentos.

Algumas ligas da série 2XXX como a 2024, 2124 e 2219 são particularmente sensíveis a esse tipo de tratamento, obtendo ganho significativo de dureza quando submetidas ao tratamento T8, esse ganho de dureza está relacionado à nucleação sobre as discordâncias introduzidas pela deformação, geralmente realizadas por processo de estiramento ou de laminação.

A deformação além de favorecer a nucleação de precipitados, com a introdução de discordâncias, acelera todo o processo de precipitação. Deste modo, sendo assim, o material deformado atinge o superenvelhecimento mais rapidamente do que o mesmo material não deformado (HATCH, 1990).

No caso das ligas endurecíveis por precipitação (séries 2XXX, 6XXX e 7XXX) recomenda-se como tempo de tratamento (na temperatura indicada) 2 a 3 h. No caso das demais ligas, apenas o suficiente para o atendimento da temperatura de tratamento.

2.8 - Revestimentos para Alargadores

O uso de revestimentos tem com função a redução de atrito, a proteção contra o desgaste por abrasão e o isolamento térmico do material de base da ferramenta.

A aplicação de revestimentos é realizada normalmente pela precipitação de materiais duros na fase de vapor. Os processos principais são:

- a deposição química de vapor (CVD); e
- a deposição física de vapor (PVD).

As principais características dos revestimentos obtidos em processo de deposição por vapor são as suas espessuras, a rugosidade, a dureza, a resistência e a adesão. A espessura desses revestimentos está na faixa de 1 a 10 μm , o que não afeta dimensionalmente a ferramenta para aplicações em que a precisão não é imprescindível.

Devido às temperaturas envolvidas, os processos PVD e CVD são adequados para o revestimento de aço-rápido e metal duro, respectivamente. Em metais duros, os revestimentos de TiC , TiCN , TiN e Al_2O_3 e suas combinações são normalmente aplicados por CVD. Em decorrência do revestimento, têm-se dois fatores significativos sobre a temperatura dos cavacos e sobre o fator de recalque na região de cisalhamento. O coeficiente de atrito entre o cavaco e a ferramenta revestida é menor quando comparado com a ferramenta não revestida diminuindo assim o atrito na face da ferramenta. Isso leva a uma redução do fator de recalque, menor força de avanço e conseqüentemente menor potência de usinagem, bem como uma melhor distribuição do calor gerado no processo. Em razão da pequena condutividade térmica da camada de revestimento há uma diminuição da transferência de calor para a ferramenta, sendo esta maior para o cavaco (BORK, 1995 apud BORILLE, 2005).

A diminuição da quantidade de calor conduzida para a cunha cortante permite uma melhor exploração das características térmicas da ferramenta pelo aumento da velocidade de corte, do avanço ou ambos. Atualmente existe uma grande variedade de revestimentos disponíveis no mercado o que possibilita a obtenção de furos mais precisos e de melhor qualidade conforme a aplicação e exigência na indústria.

As melhores geometrias e parâmetros de corte permitem obter a melhor qualidade superficial e desvios mínimos de circularidade. A operação de corte realizada livre de

arrefecimento lubrificante irá causar um aumento extremo na carga térmica e abrasiva de ferramentas. A utilização de revestimentos de PVD é possível obter relevantes resultados comprovados à vida da ferramenta, como também a operação de alargamento sem lubrificante (LUGSCHEIDER et al., 1996).

Dentre os diversos tipos de revestimentos podem-se citar como principais (KÖNIG, 1997, SCHROETER et al., 2001, CASTRO, 2001 e SANDVIK COROMAT, 1994):

2.8.1 - Carboneto de titânio (TiC)

O carboneto de titânio é geralmente depositado por CVD e se caracteriza por ser um material duro que fornece resistência ao desgaste por abrasão. Sendo quimicamente inerte, forma uma barreira térmica e química entre o cavaco e a ferramenta. O TiC possui um baixo coeficiente de atrito e de condutividade térmica reduzindo a temperatura na aresta e, conseqüentemente, diminuindo o efeito da difusão entre a ferramenta e a peça (KÖNIG, 1997, SCHROETER et al., 2001, CASTRO, 2001 e SANDVIK COROMAT, 1994).

2.8.2 - Nitreto de titânio (TiN)

A economia e o aumento de produtividade alcançados com revestimento de TiN têm se mostrado significativos devido às seguintes vantagens:

- possui bom desempenho em quase todas as aplicações e materiais usinados;
- sua coloração permite uma fácil verificação de desgaste; e
- seu preço é acessível.

O TiN facilita a saída do cavaco, diminuindo a temperatura gerada na remoção de material, o desgaste abrasivo de flanco e a formação da aresta postiça. O baixo coeficiente de atrito confere à ferramenta uma resistência ao desgaste de cratera (KÖNIG, 1997, SCHROETER et al., 2001, CASTRO, 2001 e SANDVIK COROMAT, 1994).

2.8.3 - Carbonitreto de titânio (TiCN)

Esse revestimento combina o baixo coeficiente de atrito do TiN com dureza, capacidade de dissipação de calor e resistência ao desgaste superando o desempenho do TiN em aplicações onde o avanço e a velocidade de corte são severas (KÖNIG, 1997, SCHROETER et al., 2001, CASTRO, 2001 e SANDVIK COROMAT, 1994).

2.8.4 - Nitreto de alumínio-titânio (TiAlN)

Com o desenvolvimento dos sistemas de camadas (Ti, Al)N foram feitos ensaios para melhorar a resistência à oxidação, a dureza a quente e as propriedades de resistência ao desgaste em relação às camadas conhecidas até o momento. Comparadas com as camadas de TiN e Ti (C,N), as camadas (Ti, Al)N possuem maior resistência à oxidação para uma mesma dureza. O campo de aplicação de metais duros revestidos por (Ti, Al)N resume na usinagem com grandes solicitações térmicas na ferramenta e comprova-se um grande aumento na produtividade da furação sem meios lubri-refrigerantes, furações profundas ou furações com pequenos diâmetros. Camadas de (Ti, Al)N podem apenas ser depositadas pelo processo PVD (KÖNIG, 1997, SCHROETER et al., 2001, CASTRO, 2001 e SANDVIK COROMAT, 1994).

2.9 - Qualidade da Peça Usinada

Existe uma série de fatores que influenciam o resultado final do processo de usinagem, conforme ilustra a figura 2.17. Nesta, observa-se as diversas parcelas que contribuem para o resultado desejado e quais as suas origens. A partir dessa figura pode-se concluir que não basta se concentrar em um único ponto como, por exemplo, a máquina-ferramenta, pois mesmo o melhor dos equipamentos pode apresentar resultados de usinagem inaceitáveis quando se negligencia a qualidade do material das peças, os parâmetros do processo, as condições de fixação da peça e as ferramenta e, até mesmo, os fatores provenientes do meio.

A usinabilidade do material é uma questão importante no que se diz respeito: rugosidade superficial, da integridade da superfície, a vida da ferramenta, forças de corte. Qualquer

desalinhamento entre peça e alargador fará com que a vibração provoque um aumento no diâmetro final do furo. A maioria dos furos precisos é de furo de centro, fresados e alargados para o diâmetro final.

A manutenção adequada e recondicionamento dos alargadores são necessários para manter a dimensão correta furo e requisitos de acabamento superficial. Seleção da geometria do alargador (incluindo ângulos de alívio e de inclinação), refrigerante / lubrificante (se necessário), o tamanho do furo, a taxa de avanço e velocidade de corte em relação ao material a ser usinado são importantes. O alargamento é realizado com um terço da velocidade de corte e dois terços da taxa de avanço de furação. A precisão do furo e a qualidade do acabamento produzido pelo alargamento dependem principalmente da condição do furo inicial, a rigidez da máquina, a velocidade de corte e avanço corretos, uma adequada e correta aplicação do fluido de corte, afiação precisa das ferramentas.

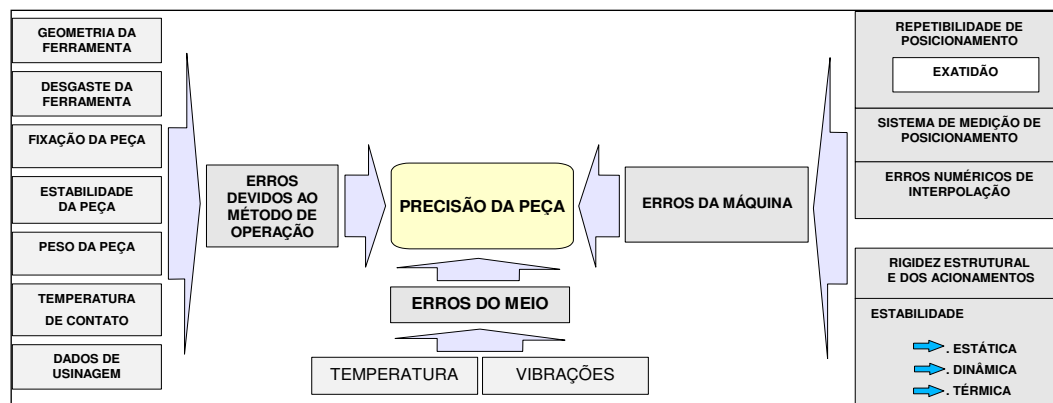


Figura 2. 17 - Relações que envolvem a qualidade de uma peça usinada (KÖNIG, 1991 apud STOETERAU, 1999).

2.10 - Erros geométricos

A qualidade de furos usinados depende do processo de fabricação, assumindo que todos os outros fatores, como rigidez da máquina-ferramenta, são iguais. Os erros ou imperfeições, entretanto, podem ocorrer em vários níveis em qualquer processo devido a condições comuns (SME, 1983).

2.10.1 - Erros de forma

Essa condição existe quando o diâmetro não é uniforme ao longo do comprimento do furo. Exemplos são as bocas de sino, forma abaulada e furos côncavos, assim como furos com eixos inclinados. A magnitude do erro com frequência depende basicamente do diâmetro e do comprimento do furo (relação L/d).

2.10.2 - Rebarbas

Rebarbas podem ser formadas nas bordas do furo, tanto na entrada como na saída. O formato e a dimensão das rebarbas dependem dos materiais da peça e da ferramenta, de suas propriedades, das condições das ferramentas e das velocidades de corte e avanço usados.

2.10.3 - Erros de posicionamento dos furos

Os erros ocorrem quando o centro do furo está deslocado em relação à posição original. A exatidão da posição do furo depende basicamente das condições da máquina e da ferramenta, principalmente de sua aresta.

2.10.4 - Erros de circularidade

Os erros de circularidade ocorrem quando a seção circular (contorno) de um furo é distorcida em relação à forma ideal. Formas triangulares, irregulares ou ovaladas são comumente observadas na furação. A precisão do eixo-árvore da máquina, da afiação da ferramenta e da rigidez do equipamento são todos os fatores críticos para que os erros de circularidade sejam minimizados.

A circularidade apresentada na figura 2.18 é um modelo simplificado do gráfico polar onde se mede o erro de cilindricidade, através da circunscrição do mesmo em círculo básico onde a área interna formada pelas linhas do furo real e do círculo básico é igual à área externa formada pelas mesmas linhas. Seu valor é a máxima diferença entre o raio maior e raio menor (ALMEIDA, 2008).

Na maioria dos casos o diâmetro do furo produzido é maior do que o diâmetro da ferramenta. Alguns exemplos dessas imperfeições podem ser visualizados na figura 2.18.

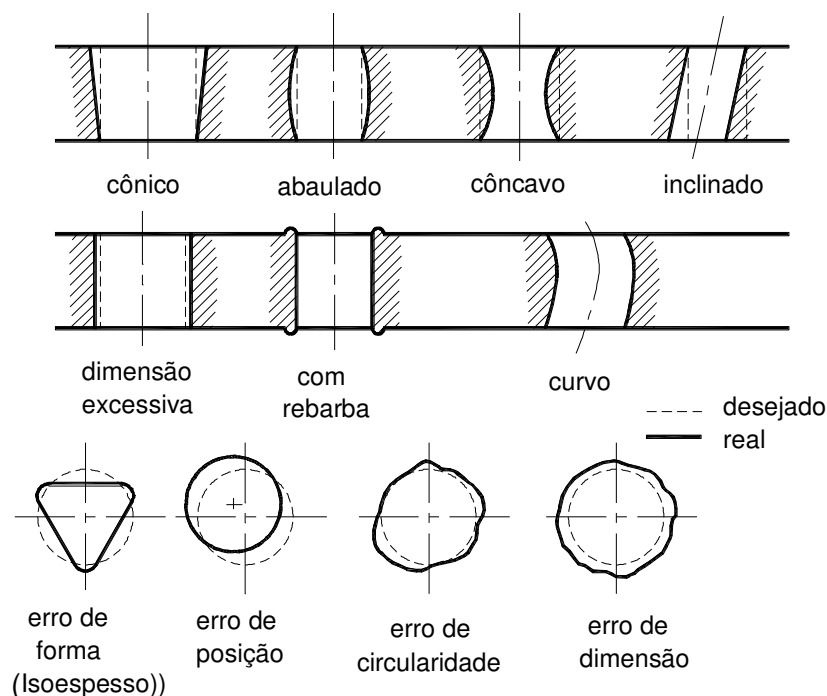


Figura 2. 18 - Erros comuns na geometria de furos (KÖNIG, 1997 e SME, 1983).

2.10.5 - Erros de cilindridade

O erro de cilindridade é medido em um gráfico linear, mostrado de maneira simplificada na figura 2.19. Neste gráfico são traçadas duas retinidades ordenadas a 180° uma da outra. O valor deste erro será a diferença entre a distância D e a distancia mínima d e a linha média entre elas. O erro de circularidade pode ser considerado um caso particular do desvio de cilindridade.

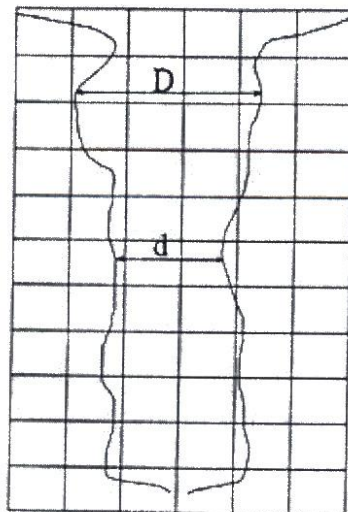


Figura 2.19 – Erro de cilindridade (BEZERRA, 1998 apud ALMEIDA, 2008)

2.11 - Qualidade da superfície gerada

A superfície de um componente mecânico, em muitos casos, deve cumprir funções muito mais complexas que apenas a de apresentar um bom aspecto visual. As funções de uma superfície técnica estão definidas na norma DIN 4764 e também já foram estudadas e descritas por vários pesquisadores (ET, 1999). A qualidade das superfícies geradas pode definir suas propriedades de funcionamento, vida, aparência, desempenho e outras funções mecânicas desejadas (SME, 1983).

O desempenho das funções atribuídas a uma superfície exige que a mesma possua certas propriedades que, por sua vez, podem ser divididas em dois grupos. O primeiro compreende aquelas relacionadas à integridade da superfície, e o segundo abrange as propriedades

geométricas da superfície. O termo textura é mais utilizado no estudo das propriedades geométricas (ET, 1999).

A dependência funcional de componentes em relação à qualidade de superfícies levou à criação de métodos de avaliação das superfícies por meio dos parâmetros de textura. Foram criados mais de uma centena e alguns deles são mundialmente aceitos como, por exemplo, a rugosidade média aritmética R_a (ET, 1999).

Define-se a rugosidade como sendo as mais finas irregularidades que normalmente resultam do processo de fabricação; incluem marcas transversais de avanço e outras irregularidades dentro dos limites do comprimento de amostragem. A equação 2.1 ilustra como calcular o parâmetro R_a sendo este a média aritmética do valor absoluto das ordenadas “y” do perfil de rugosidade dentro do percurso de medição l_m tomando como referência a linha média. Isso equivale à altura de um retângulo de comprimento igual ao percurso de medição l_m e de área igual à soma das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e a linha média. A representação esquemática do parâmetro R_a pode ser vista na figura 2.20.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad \text{Equação 2.1}$$

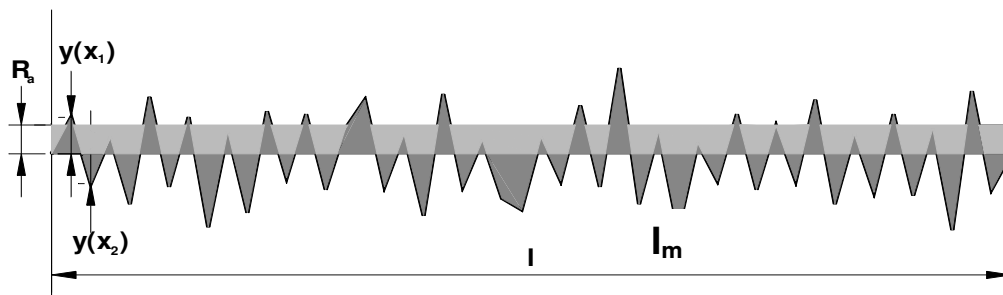


Figura 2. 20 - Perfil de rugosidade e parâmetro R_a .

Segundo Stemmer (FERRARESI, 1973), o avanço tem um efeito muito significativo sobre a qualidade do acabamento superficial. Há um aumento considerável da rugosidade com o aumento do avanço. De modo análogo a quantidade de material a ser removida tem uma grande influência sobre a qualidade superficial. Segundo Schroeter (KRESS, 1986), para valores

pequenos de sobremetal de usinagem ($a=0,1$ mm) não há um corte efetivo de material, e sim um esmagamento. Para grandes profundidades, maiores que 0,3 mm, ocorre aumento das forças de usinagem e de vibrações audíveis.

2.12 - Parâmetros de corte no alargamento

Dentre os fatores que devem ser observados para um alargamento eficiente e economicamente viável estão a velocidade de corte, o avanço e o fluido de corte a serem empregados (SCHROETER, 1989).

2.12.1 - Velocidade de corte

A velocidade de corte utilizada nas operações de alargamento depende do tipo de alargador empregado, do sobremetal e do acabamento desejado. Sua eficiência é marcante na qualidade da superfície do furo e na vida da ferramenta (STEMMER, 1995).

Geralmente, a velocidade de corte utilizada é um terço da equivalente para a furação do mesmo material. Quanto maior a quantidade de metal a ser removida menor deve ser a velocidade de corte.

Baixas velocidades de corte diminuem a produtividade sem que haja um aumento significativo na vida da ferramenta, enquanto a velocidades muito elevadas podem provocar maior desgaste e quebra das arestas devido às elevadas temperaturas assim como gerar superfícies mais rugosas (SCHROETER et al., 2001, SCHROETER, 1989 e ISCAR, 2003).

A velocidade de corte para alargadores de desbaste deve ser da ordem de dois terços das velocidades utilizadas para desbaste em tornos para o mesmo material (STEMMER, 1995). Uma prática habitual é velocidade de corte do alargamento de um furo ser aproximadamente dois terços da velocidade a qual foi furado.

Para alargamento sob condições semelhantes, as velocidades indicadas para alargador de metal duro são de três a quatro vezes maiores que para alargador de aço rápido. Isso pode ser explicado pelo fato de ao se aumentar a V_c , além de se induzir vibrações inerentes ao sistema peça/ferramenta, a presença de camadas de material aderentes nas arestas de corte prejudicam o acabamento da superfície, fenômenos também observados nos trabalhos realizados por Weinert et

al. (1989), Turley (1975) e Soratgar (apud BEZERRA 1998). Além disso, ao se trabalhar com velocidades de corte mais elevada, a saída dos cavacos torna-se mais rápida o que aumenta a probabilidade do surgimento de riscos na superfície do furo.

2.12.2 - Avanço

O avanço tem influência direta no desgaste das arestas. O aumento do avanço eleva as forças de corte de maneira proporcional (ISCAR, 2003). A escolha do avanço depende principalmente do tipo de alargador usado, do sobremetal de usinagem e do acabamento desejado. Quanto maior o sobremetal de usinagem, menor deve ser o avanço (SCHROETER et al., 2001), ao mesmo tempo em que elevadas velocidades de corte requerem avanço elevado para evitar vibrações (MILLER, 1986).

Os valores de avanço para o alargamento são de duas a três maiores quando comparado com os avanços para furação do mesmo material (SME, 1983) apud BORILLE, 2005. Na usinagem com ferramentas de aço rápido, o avanço (em mm) usado para a maioria dos materiais é cerca de 1% do diâmetro do furo, reduzindo-se progressivamente até 0,5% para furos maiores do que 50 mm (SCHROETER, 1989). Um bom acabamento é alcançado com avanços uniformes (STEMER, 1995).

Avanços muito elevados aumentam a vida da ferramenta, mas por outro lado podem ocasionar marcas espirais na parede do furo ou mesmo um furo com um acabamento ondulado (SCHROETER et al., 2001 e SCHROETER, 1989), além de solicitarem muito o alargador (FERRARESI, 1973). Baixos avanços provocam o desgaste excessivo da ferramenta resultando num melhor acabamento. No caso de avanços muito baixos e sobremetal de usinagem demasiadamente pequeno, o desgaste excessivo da ferramenta está associado ao corte irregular do metal, uma vez que o material apenas atrita ou é amassado pela aresta. Desta forma, recomenda-se que sejam utilizados os maiores avanços possíveis (ISCAR, 2003).

2.12.3 - Fluido de Corte

O fluido de corte possui quatro funções principais na usinagem (SCHROETER, 1989 e STEMMER, 1995):

- lubrificação;
- refrigeração;
- prevenção da adesão (e a formação da aresta postiça); e
- facilitar a expulsão do cavaco.

Fluido de corte pode melhorar a eficiência da usinagem em termos de aumento da vida útil da ferramenta, melhores acabamento superficial e tolerâncias, redução da força de corte e da vibração. O efeito do uso de um fluido de corte não depende somente das propriedades do fluido, mas também das condições de usinagem, ou seja, ferramentas e materiais de trabalho, a geometria da ferramenta e velocidade. Fluidos de corte à base de óleos minerais são normalmente utilizados devido ao seu baixo custo e estabilidade química. No entanto, a atual tendência de novos tipos de fluidos de corte à base de óleos vegetais e seus ésteres na indústria de transformação é justificada pela sua maior biodegradabilidade e menor impacto ambiental.

Para os testes de desempenho de novos fluidos de corte geralmente a escolha deve ser baseada em condições mais próximo possível do processo de corte de metal (BELLUCO et al., 2002)

A propriedade lubrificante do fluido de corte possibilita a redução do atrito na região de contato entre a ferramenta e a peça e a ferramenta e o cavaco reduzindo também a força de avanço e possibilitando um melhor acabamento.

Quanto à refrigeração, com o uso de fluido de corte, podem ser aplicadas velocidades de corte maiores sem o problema de superaquecimento da região de corte. Por conseguinte, evitam-se erros dimensionais e de tolerância devidos à dilatação da peça e ao surgimento de tensões internas e deformações.

Os meios lubri-refrigerantes também são responsáveis por reduzir a taxa de adesão, evitando assim a formação de aresta postiça. Como resultado, possibilita o uso de uma geometria adequada resultando num melhor acabamento (FERRARESI, 1977). Outra função é facilitar a expulsão dos cavacos para que não risquem, ou seja, não permaneçam aderidos à superfície

usinada (MACHADO et al., 1995). Os meios lubri-refrigerantes oferecem outros benefícios, tais como: redução da potência de corte (devido a uma melhor lubrificação da região de corte), aumento do tempo de vida da ferramenta (por tornar as condições de corte menos severas) e prevenção à corrosão durante a usinagem (por formar uma película protetora) (FERRARESI, 1977).

O método mais eficiente de reduzir a poluição ambiental por arrefecimento com lubrificantes é fazer sem eles.

Contudo, atualmente não basta que o fluido de corte cumpra apenas essas funções. Cabendo-lhe outras particularidades, tais como:

- compatibilidade com a maioria das pinturas e vedações da máquina;
- fácil preparação;
- inofensivo ao meio ambiente e ao operador;
- pouca formação de espuma, mesmo sob alta pressão;
- fácil tratamento para o descarte ou reciclagem;
- baixo volume de resíduos provenientes do descarte; e
- emulsões resistentes ao ataque de microorganismos e dos óleos contaminantes do processo como os das guias e do barramento (STEMMER, 1995 e MARTINEZ, 2004).

Segundo Stemmer, além das características citadas, também devem apresentar:

- boa transparência para permitir a visualização do processo;
- baixa inflamabilidade;
- inodoro;
- poder de remover impurezas;
- boa molhabilidade;
- boa filtrabilidade; e
- resistência ao envelhecimento (não formar borras, não oxidar e não perder a estabilidade).

Já o fabricante (ISCAR, 2003) afirma que em vários casos as emulsões proporcionam melhores resultados do que óleos de corte viscosos, já que os primeiros são menos densos e, por conseguinte, oferecem melhor molhabilidade.

As duas principais funções dos fluidos de corte são lubrificações a uma velocidade de corte relativamente baixa e refrigeração a uma velocidade de corte relativamente alta. Sob altas

velocidades de corte não há tempo para o fluido penetrar na interface cavaco-ferramenta de modo a proporcionar uma lubrificação apropriada. A refrigeração sob baixas velocidades de corte não é significativa. Fluidos de corte a base de água são comumente usados sob refrigeração a alta velocidade, enquanto que aqueles a base de óleo são adequados para o regime de lubrificação à baixa velocidade (SHAW, 1986).

A importância do fluido de corte a baixas velocidades de corte reside no seu potencial de lubrificação para reduzir o atrito e evitar a formação da aresta postiça de corte (APC). A restrição ao uso de fluido de corte na produção metal mecânica tem sido um dos principais objetivos de recentes pesquisas. Conforme Heisel et al, Kalhofer e Klocke et al. (apud MACHADO et al., 2000), os fatores que justificaram esta tendência incluem os custos operacionais da produção e as questões ambientais, inclusive a preservação da saúde do operador.

Embora existam trabalhos consagrados sobre as operações de torneamento ou fresamento sem fluido de corte e até mesmo em operações de furação, a sua substituição no processo de alargamento é muito difícil uma vez que a concentração do fluido em água chega a ser aumentada em até 15% para que se possa garantir um processo estável e uma lubrificação satisfatória (WEINERT et al., 1998).

Igualmente, melhoram o processo de corte de metal, parte pela refrigeração da ferramenta, peça de trabalho e cavacos, e restante pela lubrificação da superfície de saída da ferramenta e outras, as quais estão em contato com a peça de trabalho.

O efeito do uso de fluido de corte numa operação de usinagem depende não apenas das propriedades deste, como também, na maioria dos casos, das condições de usinagem, do tipo de material da ferramenta e da peça de trabalho, da geometria da ferramenta e das velocidades de corte (DE CHIFFRE et al., 1994). Segundo Ohgo et al., 1979, o fluido refrigerante garante alta precisão independente das condições de corte.

Na usinagem com ferramentas que possuem menor resistência ao cisalhamento como o aço rápido, a utilização de um fluido de corte é de extrema importância visto que o calor gerado durante a operação eleva a temperatura da ferramenta em demasia reduzindo a sua resistência mecânica, deixando-a susceptível à deformação plástica e ao colapso. Dessa forma, o fluido de corte atua reduzindo a temperatura da ferramenta garantindo a sua resistência à deformação sob velocidades de corte razoáveis (MACHADO et al., 2000).

Em operações de alargamento normalmente enfatiza-se o acabamento, visto que o fluido de corte é selecionado com o objetivo maior de lubrificar do que de refrigerar (SKF, 1987), pois a ação lubrificante minimiza o atrito entre as guias e a parede do furo (SCHROETER, 1989).

Os fluidos de corte mais utilizados estão relacionados na tabela 2.3. A quantidade de fluido de corte utilizada pode ser mais importante que o tipo. Um fornecimento muito abundante mantém uma temperatura quase constante e cavacos dispersos (METALS HANDBOOK, 1989).

Tabela 2. 3 - Fluido de corte utilizada no alargamento de vários metais (METALS HANDBOOK, 1989).

METAL	Óleo solúvel	Óleo sulfurizado	Mistura querosene /óleo animal	Óleo neutro não viscoso	Seco (*)
Aço					
Aço inoxidável					
Ferro fundido cinzento					
Ferro maleável ou nodular					
Alumínio					
Cobre					
Latão					

(*) Caso não se utilize fluido de corte, recomenda-se o uso de jatos de ar para a remoção de cavaco.

Embora os fluidos de corte sejam benéficos na maioria das operações de alargamento, aplicações específicas não necessitam deste recurso. O ferro fundido cinzento é normalmente alargado a seco. O uso de fluido de corte é algumas vezes impraticável por causa do projeto da peça (METALS HANDBOOK, 1989).

Quanto maior a velocidade de corte no alargamento, maior a necessidade de um fluido de corte para reduzir a temperatura da peça, para minimizar distorções e para prevenir sobre medida no alargamento. Com alargadores de metal duro, emulsões de óleo e água são os fluidos de corte mais largamente utilizados (METALS HANDBOOK, 1989).

Para usinagem do alumínio, Hatschek (1978) apud SCHROETER (1989) recomenda o uso de emulsões de óleo em água com concentrações de 3 a 5%. As ligas de alumínio silício

requerem boa lubrificação. Se a precisão for importante, deve-se usar um bom fluido de corte devido ao alto valor do coeficiente de expansão térmica da liga em questão (MACHADO et al., 1997).

2.13 - Força de Avanço no Alargamento

A força de avanço representa a resistência imposta pelo material da peça de trabalho à penetração da aresta da ferramenta. O conhecimento das forças que atuam sobre a ferramenta durante o processo de usinagem é de fundamental importância para o desenvolvimento de uma máquina-ferramenta no que diz respeito ao dimensionamento correto das estruturas, acionamentos, fixação de ferramentas, guias e outros elementos.

No entanto, o pré-furo pode ter um chanfro que afeta as forças de corte no alargamento (YANG J. et al., 2002). As forças atuantes apresentam um papel fundamental na determinação dos fenômenos que ocorrem na região de formação do cavaco como também para compreender os mecanismos de desgaste e de usinabilidade de um determinado material (KÖNIG, 1997).

Os fatores mais importantes que influenciam nas forças de corte são (KÖNIG, 1997, DIN, 6580 e TÖNSHOFF, 1994):

- material da peça;
- revestimento da ferramenta;
- geometria da ferramenta de corte;
- parâmetros de corte;
- tipo e pressão do fluido de corte; e
- desgaste da ferramenta.

De acordo com a norma DIN 6584, apud Schroeter, 1989, a força de avanço em um dente é denominada F_1 , onde o índice “1” refere-se ao número de dentes do alargador. Esta força pode ser decomposta em componentes segundo:

- A direção do eixo da ferramenta F_{f1} , denominada força de avanço por dente;
- A direção tangencial ao perímetro F_{c1} = direção de corte = direção da velocidade de corte, designada força total de corte por dente;
- A direção perpendicular ao eixo da ferramenta e à direção de corte F_{p1} , intitulada força passiva por dente.

A força de usinagem pode ser decomposta em três componentes: a força de avanço (F_f), a força passiva (F_p) e a força de corte (F_c). A decomposição de forças para o processo de alargamento está ilustrada na figura 2.21.

Os alargadores possuem a capacidade de se “autoposicionarem” e auto-centrar durante a usinagem, fazendo com que as forças passivas das arestas opostas sejam subtraídas mutuamente. No caso de alargadores de aresta única, a força passiva incidente sobre a aresta é compensada pela ação das guias. Deste modo, sua quantificação não é comumente realizada.

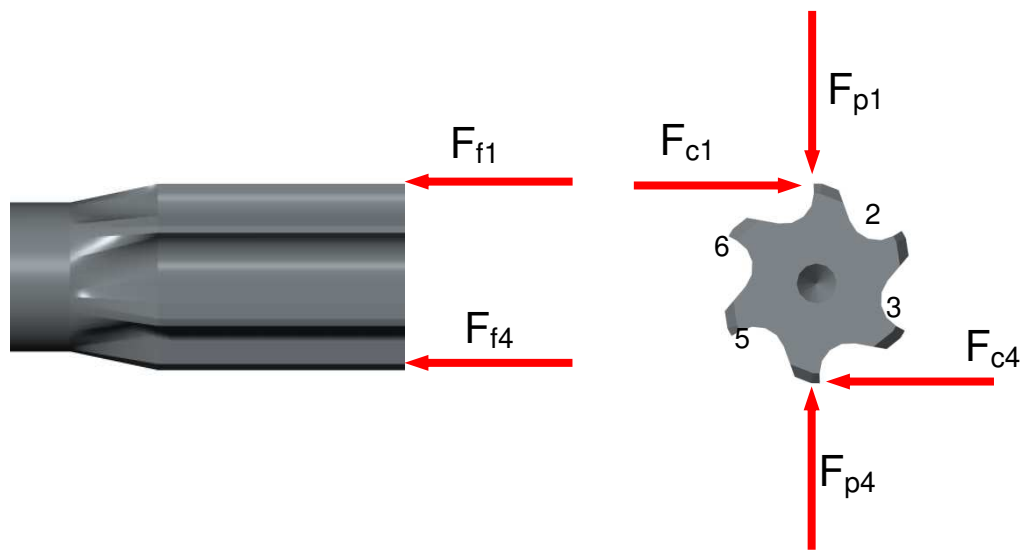


Figura 2. 21 - Forças no processo de alargamento. (BORILLE, 2005)

A avaliação das forças no processo de alargamento, sendo uma variação do processo de furação, é realizada em função da força de avanço (F_f) e do momento torsor (M_t). A medição destes esforços é realizada pela maioria dos sistemas de avaliação de forças de usinagem empregados atualmente.

A parcela da força de corte em cada aresta cortante é decorrente da resistência ao corte do material usinado, tendo grande influência sobre o momento torsor que atua nesse processo. O atrito das guias da ferramenta e dos cavacos também contribui para o aumento do momento torsor. Esta contribuição depende da qualidade da afiação e do meio lubri-refrigerante utilizado (STEMMER, 1995).

A relação entre a força de corte e o momento torsor é dada pela equação 2.2 (STEMMER, 1995), onde “d” é o diâmetro da ferramenta:

$$M_t = \frac{F_c \cdot d}{2000} \quad [\text{N.cm}] \quad \text{Equação 2.2}$$

M_t – Momento torsor [N.cm];

F_c – Força total de corte [N]; e

d – Diâmetro da ferramenta [mm]

Os alargadores multicortantes possuem lâminas que estão dispostas num único conjunto e encontram-se simultaneamente em contato com a peça. A vida desses alargadores normalmente é determinada pelo aumento da rugosidade da peça acima do limite permissível ou por esta ter excedido o limite inferior de tolerância.

Capítulo 3

Materiais e Método

3.1 – Introdução

O fluxograma abaixo representa sucintamente as atividades que foram desenvolvidas neste procedimento experimental e análise de resultados. A execução em blocos de ensaios teve a finalidade facilitar todo o processo de desenvolvimento da otimização da operação de alargamento.

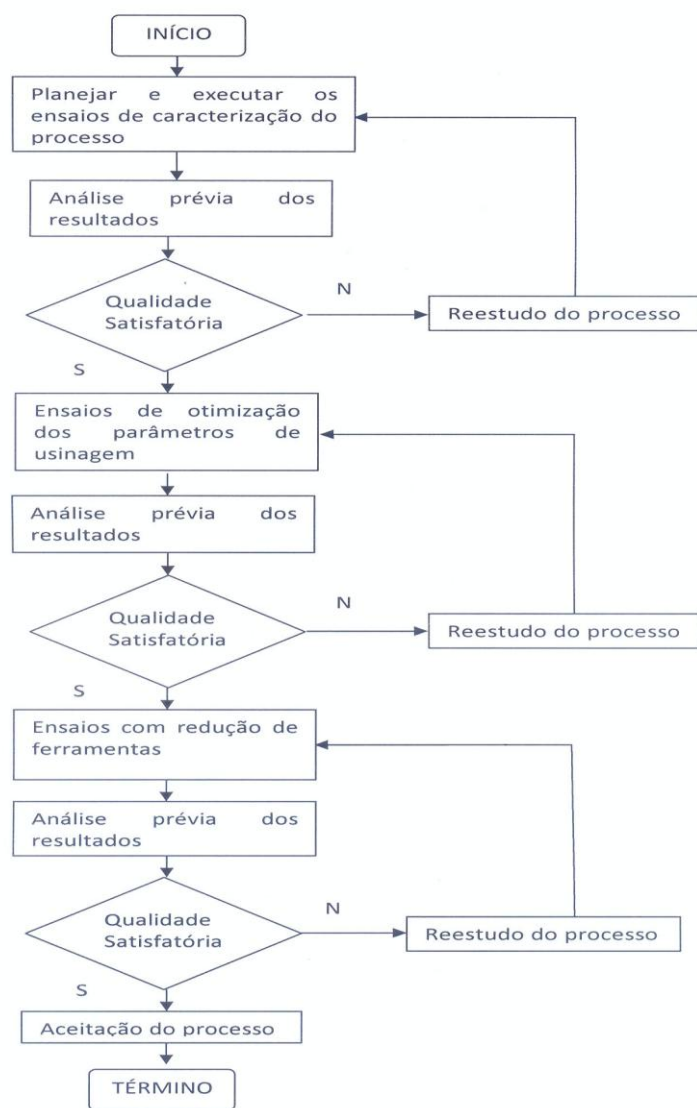


Figura 3. 1 – Fluxograma do planejamento e execução dos ensaios.

3.2 – Material

A matéria prima para o ensaio consistiu de blocos de alumínio Al 7175 forjado de dimensões de 230 x 45 x 40 mm de espessura, tratados termicamente para a dureza de 159 ± 2 HB. A composição química média esta descrita na tabela 3.1.

Tabela 3. 1 - Composição Química do Alumínio 7175 T66.

Al	Si	Mn	Cr	Mg	Ti	Zn	Cu	Fe
Balanço	Máx. 0.15	Máx. 0.1	0.18- 0.28	2.1- 2.9	Máx. 0.1	5.1- 6.1	1.2-2	Máx. 0.2

Este material é uma liga de alumínio aeronáutico para construção de válvulas de aplicação geral, com boa resistência mecânica com tensão de ruptura de 590 MPa, tensão de escoamento 520 MPa, módulo de elasticidade de 72 GPa e alongamento de 11%. Os blocos para ensaio, depois de faceados, foram fixados na mesa da máquina-ferramenta por intermédio de grampos.

3.3 – Máquinas e Equipamentos

O laboratório utilizado para a realização de todos os experimentos constantes neste trabalho foi o (CCM-ITA).

Todos os ensaios de furação e alargamento foram realizados num centro de usinagem com cinco eixos CNC modelo 600V conforme mostrado na figura 3.1, fabricado pela empresa Hermle.

O equipamento foi projetado para usinagem de moldes e matrizes com potência no eixo árvore de 15 KW, torque 130 Nm, rotação programável até o máximo de 16000 rpm, curso dos eixos x = 600 mm, y = 450 mm e z = 450 mm, com velocidade de avanço dos eixos programável de 1 a 30000 mm/min. equipado com comando numérico Siemens 840D.

Esta máquina, utilizada para os ensaios tem características bem próximas da nova máquina adquirida pela Empresa X.



Figura 3. 2 - Máquina-ferramenta e ambiente de ensaios.

3.4 - Instrumentos de Medição

3.4.1 - Medição da Força de Avanço e Momento Torsor.

As medições do momento torsor foram realizadas utilizando uma plataforma piezo elétricas Kistler tipo 9272 e amplificadores de carga tipo 5011A conectados a um microcomputador. Os corpos de prova de 80 x 80 x 25 mm foram presos diretamente na plataforma Kistler. O dinamômetro foi fixado a uma placa plana retificada, conforme recomendações do fabricante e esta placa foram fixadas diretamente à mesa da máquina. O dinamômetro utilizado tem capacidade para medir quatro componentes; força nas três direções e momento torsor.

Um programa de aquisição desenvolvido usando o software Labview 6.0 permitia visualizar os sinais que saiam do amplificador e assim, foi possível uma análise visual instantânea do comportamento dos sinais. Foram feitos, previamente, diversos ensaios em vazio, sem efetuar a usinagem utilizando diversas rotações e avanços para verificar a presença de alguma variável desconhecida oriunda da movimentação da máquina. Esta variável poderia alterar ou deteriorar a qualidade do sinal adquirido. A análise destes sinais serviu também para avaliar o programa de tratamento de sinais. Foram feitos também ensaios preliminares com uma ferramenta de teste

para efetuar a calibração das constantes do dinamômetro e a resolução do amplificador em função da força a ser medida.

3.4.2.-Medição da Precisão Dimensional

Após a realização dos ensaios e para garantir a confiabilidade das informações dimensionais, os corpos de prova foram encaminhados ao laboratório de metrologia credenciado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO).

O diâmetro, a circularidade e a cilíndricidade dos furos usinados foram medidos com uma máquina de medir coordenadas Zeiss – C-013/03.

As medições de rugosidade foram realizadas com um rugosímetro portátil Mitutoyo.

3.5 – Ferramentas de Corte

As ferramentas de aço rápido utilizadas, duas brocas com canais helicoidais de diâmetros de 6 e 6,8 mm e dois alargadores, também helicoidais de diâmetros de 7,063 e 7,142 mm com seis arestas, estão mostradas na figura 3.2. O conjunto alargador e porta ferramenta podem ser vistos na figura 3.3. As ferramentas utilizadas nos ensaios estão ilustradas nas figuras 3.4 e 3.5. Os ensaios foram realizados com refrigeração abundante aplicada por seis bicos radialmente espaçados ao longo do eixo árvore.

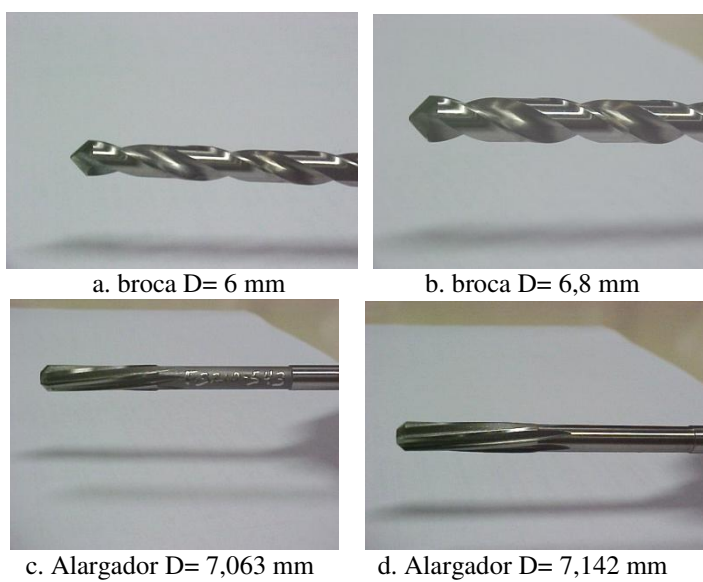


Figura 3. 3 - Ferramentas de aço-rápido utilizadas.

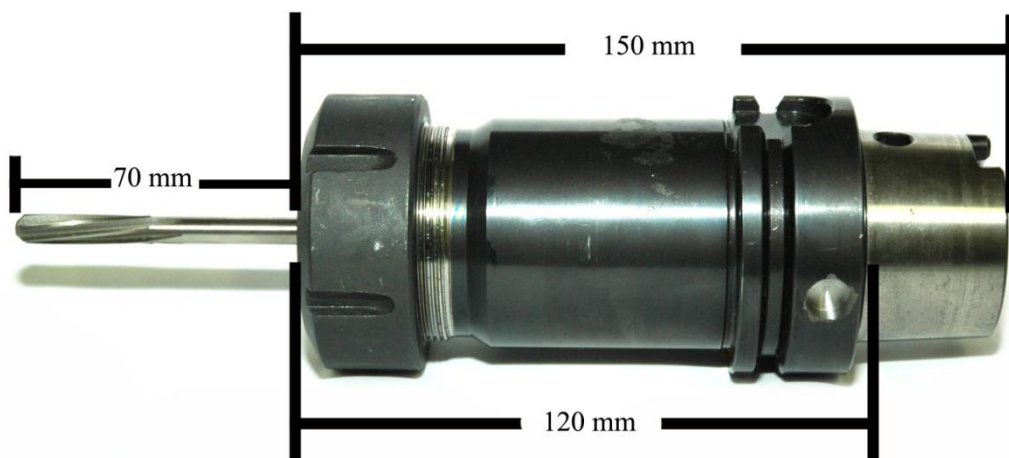


Figura 3. 4 – Conjunto Alargador + Porta Ferramenta

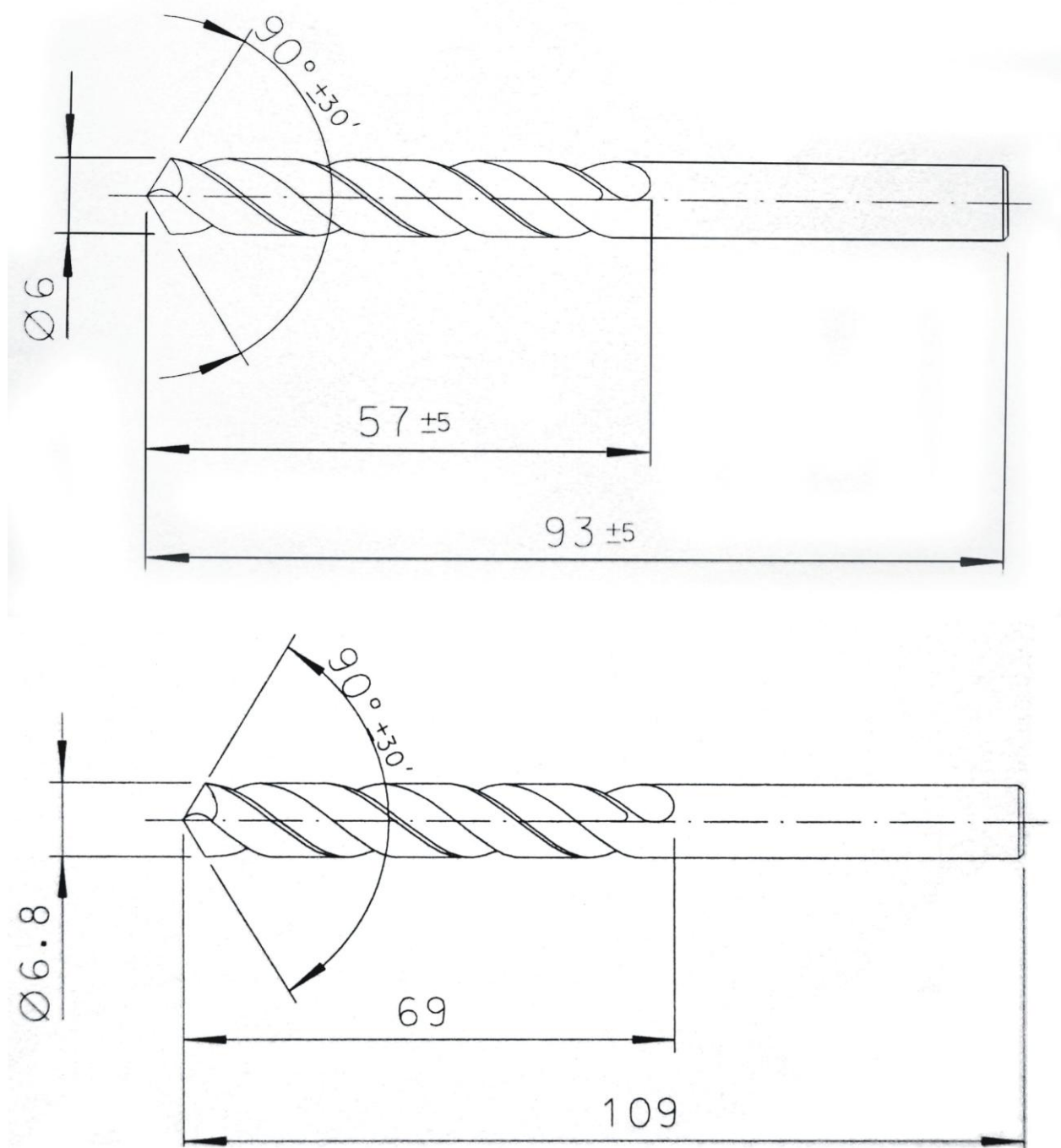


Figura 3.5 – Broca helicoidal de diâmetro 6,0 mm e diâmetro de 6,8 mm

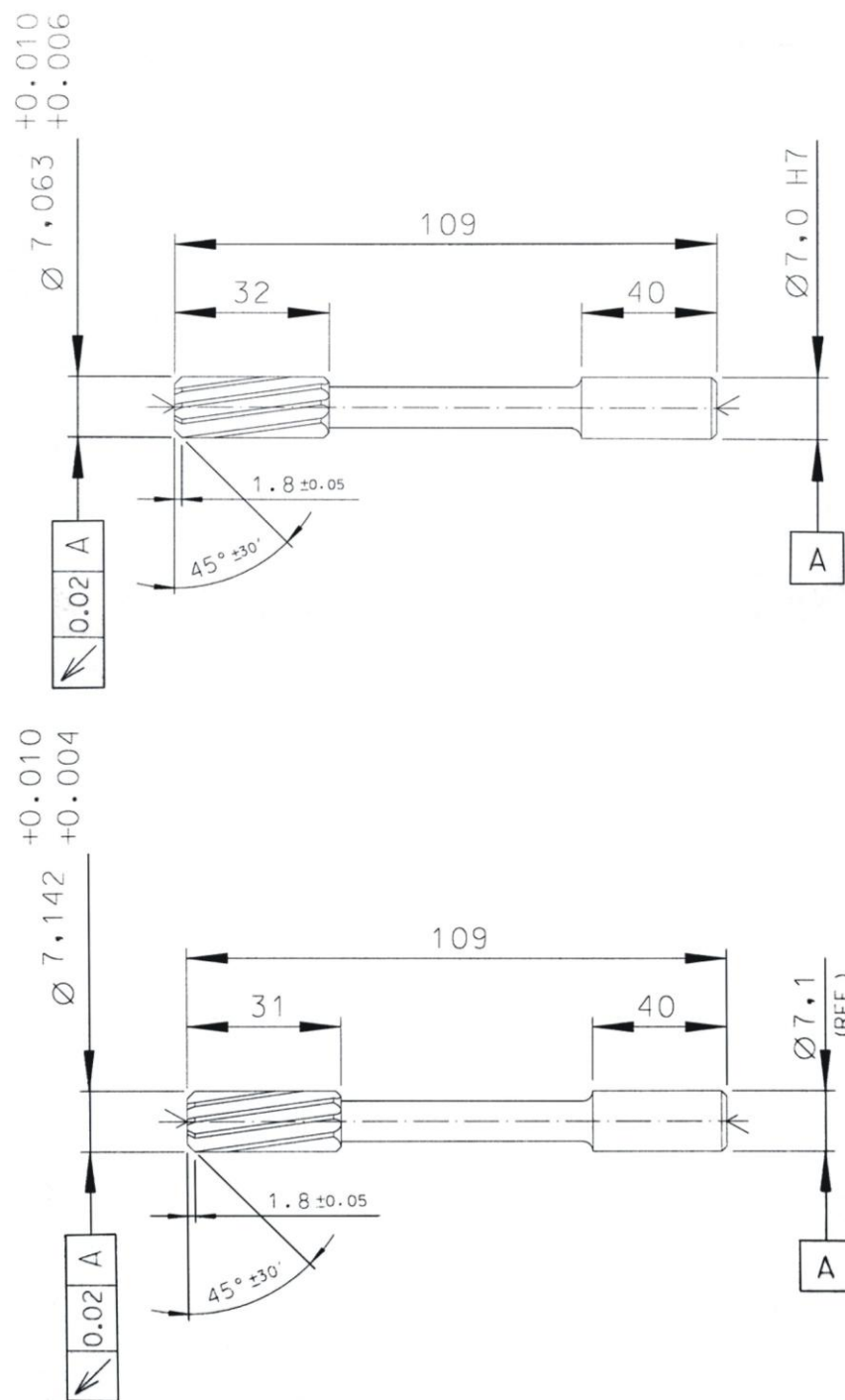


Figura 3.6 – Alargador de diâmetro 7,063 mm e de diâmetro de 7,142 mm

3.6 - Delineamento dos ensaios.

Os ensaios foram divididos em três blocos descritos a seguir:

3.6.1 - Primeiro Bloco de Ensaios.

O primeiro bloco de ensaios foi realizado com objetivo de repetir todas as condições operacionais que eram praticadas pela Empresa X (tabela 3.2). Foram produzidas 27 peças com a finalidade de comparar o processo produtivo no CCM, com a produção da Empresa X. Assim foi possível caracterizar o processo e ter um ponto de partida para a eventual possibilidade de introdução de melhorias.

Tabela 3. 2 - Parâmetros de corte praticados pela empresa X

Ferramentas Aço rápido	D [mm]	S	Vc	f	Vf
Broca 1	6	2000	37	0,09	3,39
Broca 2	6,8		42		3,84
Alargador 1	7,063	600	13	0,1	1,33
Alargador 2	7,142		13		1,35

3.6.2 - Segundo bloco de Ensaios.

Este segundo bloco de ensaios teve a finalidade de utilizar todo o recurso que a máquina ferramenta oferecia em termos de rotação e velocidade de avanço. Não houve preocupação com a potência da máquina, porque as operações de usinagem realizadas demandaram valores bastante inferiores ao limite da máquina Os ensaios de furação e alargamento foram realizados conforme descrito na tabela 3.3 e 3.4.

O planejamento deste bloco de ensaios foi feito considerando 3 avanços, três velocidades de corte e 3 réplicas, resultando, portanto, num total de 162 ensaios.

Tabela 3. 3 - Parâmetros de ensaio das brocas

D [mm]	f [mm/rot.]	S [rpm]	Vc [m/min.]
6,0	0,09	4000	75,4
		8000	150,8
		12000	226,2
	0,15	4000	75,4
		8000	150,8
		12000	226,2
	0,20	4000	75,4
		8000	150,8
		12000	226,2
6,8	0,09	4000	85,5
		8000	170,9
		12000	256,4
	0,15	4000	85,5
		8000	170,9
		12000	256,4
	0,20	4000	85,5
		8000	170,9
		12000	256,4

Tabela 3. 4 - Parâmetros de ensaio dos alargadores

D [mm]	f [mm/rot.]	S [rpm]	Vc [m/min.]
7,063	0,1	1300	28,8
		2700	59,9
		4000	88,7
	0,15	1300	28,8
		2700	59,9
		4000	88,7
	0,2	1300	28,8
		2700	59,9
		4000	88,7
7,142	0,1	1300	29,2
		2700	60,6
		4000	89,7
	0,15	1300	29,2
		2700	60,6
		4000	89,7
	0,2	1300	29,2
		2700	60,6
		4000	89,7

3.6.3 – Terceiro bloco de Ensaios.

Esses ensaios foram realizados com o objetivo de avaliar a possibilidade de aumentar ainda mais a produtividade do processo de fabricação.

O furo de 6 mm é, por uma condição do projeto da peça, passante. Por este motivo este furo é sempre efetuado antes da operação de alargamento (ver figura 3.9). Por este motivo, nunca é possível prescindir da broca de diâmetro de 6 mm.

A utilização de uma broca escalonada, que permitisse realizar o pré-furo de 6 mm e o furo de 6,8 mm, por motivos de restrição desta pesquisa, não foi realizada neste trabalho.

Entretanto, foi mantida nas experiências a presença dos pré-furos. Apesar de não aplicável para a fabricação específica desta peça, indubitavelmente, a redução do tempo utilizado para realizar o pré-furo, por si só recomenda a utilização de uma broca escalonada. Além disso, os resultados desta parte da experiência podem ser indicativos de uma realimentação do projeto da peça, caso este escalonamento dos furos possa ser eliminado.

Para avaliar se a existência desse pré-furo interfere na precisão final da operação de alargamento, um planejamento experimental foi idealizado. Nesse experimento também se deseja avaliar a importância da realização da operação de pré-alargamento nas tolerâncias finais obtidas. A sequência de operações e as condições de ensaio podem ser vista na tabela 3.5. Ainda nesse planejamento foi avaliada a influência de valores de velocidades de corte e de avanço maiores conforme tabela 3.6. Foram realizados 140 ensaios, ou seja, conforme planejados foram realizados 7 ensaios para cada uma das 20 condições de ensaio mostradas na tabela 3.5.

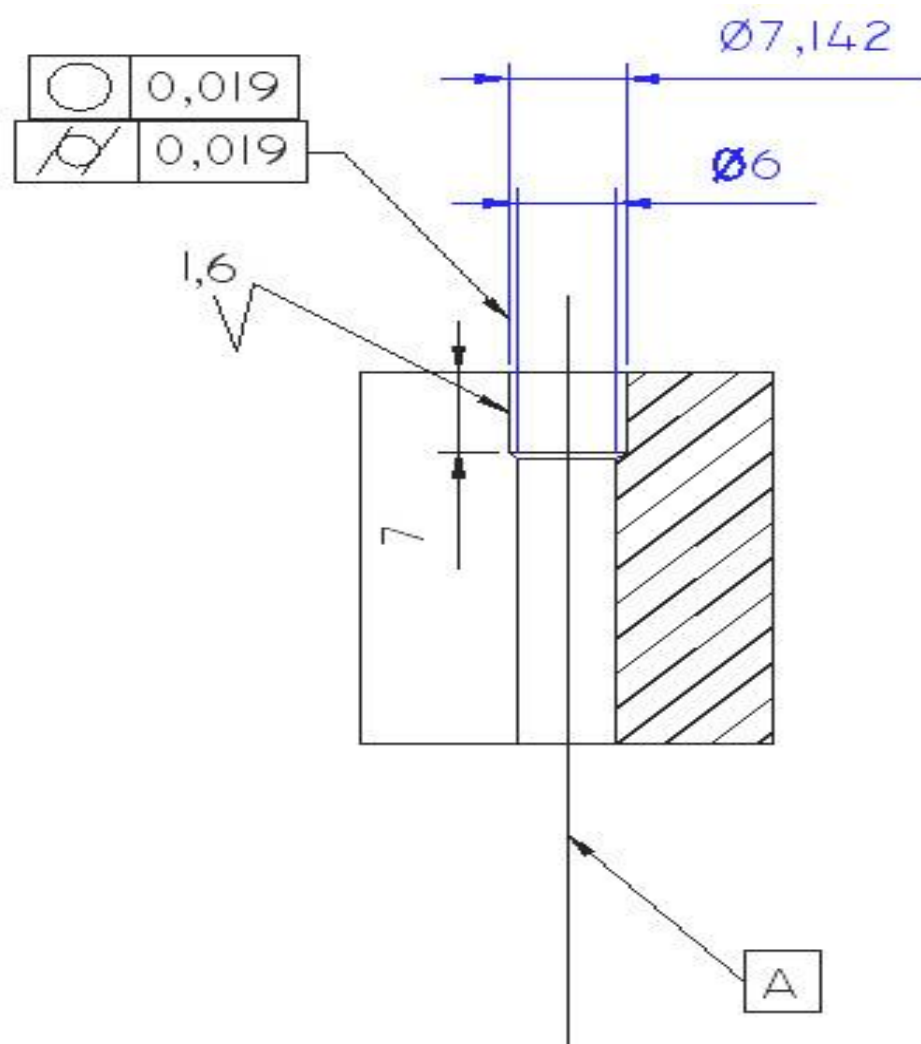


Figura 3.7– Ilustração do alargamento

Tabela 3. 5 - Condições de ensaio

Parâmetros de usinagem dos ensaios																				
Condição de ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Pré-furo	NÃO	SIM	NÃO	SIM	NÃO	SIM	NÃO	SIM	NÃO	SIM	NÃO	SIM	NÃO	SIM	NÃO	SIM	NÃO	SIM	NÃO	SIM
Pré-alargamento	NÃO		SIM		NÃO		SIM		NÃO		SIM		NÃO		SIM		NÃO		SIM	
f [mm/rot.]	0,10				0,20				0,10				0,20				0,15			
Vc [m/min.]	100								300								200			

Tabela 3. 6 - Parâmetros de corte

D[mm]	f [mm/rot.]	S [rpm]	Vc [m/min.]
6,0	0,20	13263	250
6,8	0,20	11703	250
7,063	0,10	4507	100
		13520	300
7,063	0,15	9013	200
7,063	0,2	4507	100
		13520	300
7,142	0,10	4457	100
		13371	300
7,142	0,15	8914	200
7,142	0,20	4457	100
		13371	300

Nos ensaios realizados, as variáveis de influência analisadas foram a velocidade de corte, avanço por volta, pré-furo e o pré-alargamento. As variáveis de resposta são o valor obtido diâmetro comparado com o diâmetro do alargador final, cilindridade, circularidade e rugosidade resultantes da operação de alargamento final.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4.1 – Primeiro Bloco de Ensaios

Neste bloco de ensaios, primeiramente foram realizados ensaios com finalidade caracterizar o processo praticado pela empresa X. Não se trata de um planejamento experimental onde as variáveis são alteradas de uma maneira controlável. Utilizando valores de rotação e avanço extraídos da folha de processo de fabricação, foram avaliados erros de forma, força de avanço e momento torsor. Desta forma, foi possível validar os valores obtidos em chão de fábrica, e assim, obter parâmetros de comparação em função das modificações que podem surgir na otimização do processo.

4.1.1 – Esforços de usinagem – Força de Avanço e Momento torsor

Conforme mostram a tabela 4.1 e a figura 4.1 a força de avanço para o pré-furo de 6,0 mm é 8,3 vezes maior que a força de avanço para o furo final de 6,8 mm. Isto é devido ao fato de que com a pré-furação de 6,0 mm, a maior resistência oferecida pela aresta transversal de corte da broca é eliminada da operação de furação final. Resta, portanto na furação final, para oferecer resistência na direção do avanço, apenas 0,4 mm para ser removido na periferia da broca.

O momento torsor para a pré-furação com diâmetro de 6,0 mm, entretanto, é 2,5 vezes maior que o momento torsor para a furação final. A redução do momento torsor não é tão drástica quanto à da força de avanço, porque na pré-furação o sobremetal remanescente fica na periferia

da broca, gerando, desta forma, um braço de alavanca maior que gera momento torsor também maior.

Tabela 4. 1 - Força de Avanço e Momento Torsor.

Ferramenta	Broca 6,0 mm	Desvio Padrão	Broca 6,8 mm	Desvio Padrão	Alargador 7,063 mm	Desvio Padrão	Alargador 7,142 mm	Desvio Padrão
Avanço [mm/rot.]	0,09	-	0,09	-	0,1	-	0,1	-
Rotação [rpm]	2000		200		600		600	
Força de avanço [N]	742,69	19,40	89,37	1,95	68,97	4,35	14,41	0,57
Momento torsor [N.cm]	93,19	33,83	37,14	7,07	40,41	16,70	28,87	7,98

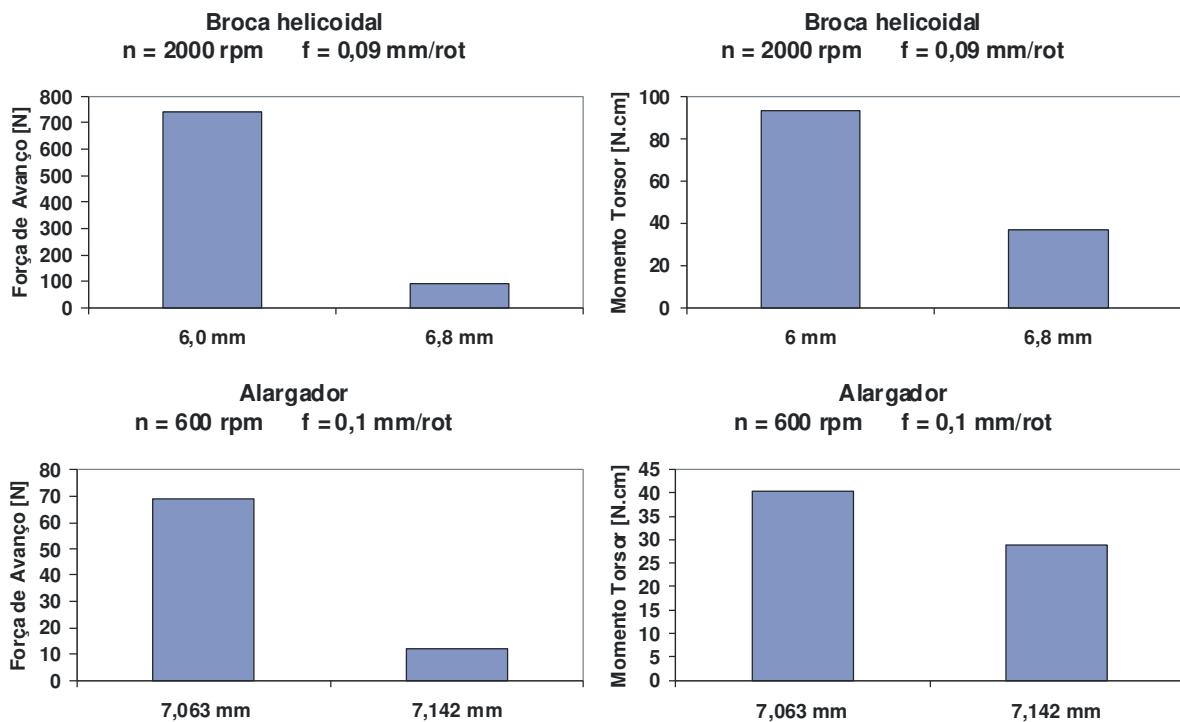


Figura 4.1 – Influência do diâmetro da ferramenta nos esforços de usinagem

A força de avanço para alargar o furo de diâmetro de 6,8 mm com um alargador de 7,063 mm pode ser comparada com a força de avanço necessária para finalizar este furo com um alargador de 7,142 mm. A diferença da força de avanço no primeiro caso é da ordem de 5 vezes maior que o alargamento final. Isto pode ser explicado pela diferença de sobremetal 3,3 vezes maior no primeiro caso, pois, para alargar o pré-furo é de 6,8 mm para 7,063 o sobremetal removido é de 0,263 mm. No segundo caso o pré-furo tem um diâmetro de 7,063 mm e o sobremetal é de apenas 0,079 mm. Talvez a queda tão significativa da força de avanço possa ter tido também, uma influência com a mesma explicação dada anteriormente com furação com pré-furação, somente que com um efeito muito menor devido à inexistência da aresta transversal de corte existente broca helicoidal.

O momento torsor para alargar o pré-furo de diâmetro 6,8 mm com um alargador de 7,063 mm comparado com aquele para finalizar este furo com um alargador de 7,142 mm foi aproximadamente 1,5 vezes maior. Neste caso, a influência sobre o momento torsor é mais fortemente sentida devido ao fato de que no segundo alargador o sobremetal estava em diâmetro maior que o primeiro, gerando um braço de alavanca maior. É evidente que boa parcela desta diferença também seja explicada pelos sobremetais diferentes.

4.1.2 – Avaliação da Rugosidade, Cilindricidade e Circularidade

Os resultados obtidos no primeiro bloco de ensaios (vide tabela 5.2) satisfazem a empresa X no que se refere à qualidade exigida para a confecção do furo. Entretanto, deseja-se melhorar a produtividade, pois, esta operação representa um gargalo de produção.

Tabela 4. 2 - Parâmetros de corte praticados pela empresa X

Ferramenta	Alargador Final 7,142 mm
Avanço [mm/rot.]	0,1
Rotação [rpm]	600
Circularidade [mm]	0,001
Cilindricidade [mm]	0,002
Rugosidade [μ m]	0,333

Os valores da tabela 4.2 mostram os erros de cilindridade e circularidade que ocorrem no processo de obtenção do furo acabado. Eles foram resgatados para ser utilizados como referência

do processo. Havia a possibilidade de que erros elevados de circularidade e cilindridade da etapa de furação pudessem comprometer o produto final, mas como pode ser visto os valores obtidos estão muito próximos dos padrões exigidos de circularidade (0,019 mm), cilindridade (0,019 mm) e rugosidade (1,6 μm) do produto final exigidos pelo projeto da peça.

4.2 – Segundo Bloco de Ensaios

Neste segundo bloco de ensaios procurou-se identificar avanços e velocidades de corte que permitissem aumentar a produtividade. É importante salientar que a usinagem da peça em análise é um gargalo de fabricação. Foram mantidas as mesmas ferramentas utilizadas pela empresa X e a mesma sequência de operações com as brocas e os alargadores.

4.2.1 – Produtividade das Brocas Helicoidais

Os valores das forças de avanço e dos momentos torsores constantes da tabela 4.3, são valores médios de três medidas realizadas para cada condição dos parâmetros avanço e rotação ensaiados. Foram calculados para cada avanço um valor médio destes parâmetros.

O dinamômetro conectado ao Labview sempre realizou uma coleta de dados com o mesmo número de pontos registrados. Assim, quanto maior a rotação ensaiada, menor foi o número relativo de medidas. Este fato pode ter ocasionado alguns valores no cálculo das médias especificamente para o caso da força de avanço na furação com pré-furação. Para os demais parâmetros medidos encontrou-se bastante coerência nos resultados.

Tendo em vista que a potência da máquina (15 kW) é muito superior àquela exigida para as operações em suas condições mais críticas, ou seja, 0,15 kW e, como seria impraticável realizar ensaios de vida das brocas, a condição mais adequada a ser adotada seria aquela de maior avanço e rotação para ambas as operações de furação. É relevante destacar que apesar de não terem sido realizados ensaios de vida das brocas helicoidais, o material da peça sendo um Alumínio, a ação de desgaste sobre as mesmas não é previsto de ocorrer de forma significativa. Este aspecto reforça a afirmação acima de que os valores maiores de avanço e rotação ensaiados são os mais indicados para aumento da produtividade, muito embora deve ser reconhecido que a maior rotação e o maior avanço influenciarão a vida da ferramenta.

Tabela 4. 3 - Esforços de usinagem para as brocas helicoidais.

D [mm]	f [mm/rot.]	S [rpm]	Força de Avanço [N]	Força de Avanço Média [N]	Desvio Padrão	Potência de Avanço [W]	Potência de Avanço Média [W]	Momento Torsor [N.cm]	Momento Torsor Médio [N.cm]	Desvio Padrão	Potência de Corte [W]	Potência de corte Média [W]
6	0,09	4000	618,03	559	60,64	3,71	6,5	86,32	92	29,43	57,55	124,91
		8000	551,16			6,61		97,18			129,57	
		12000	508,01			9,14		93,8			187,6	
	0,15	4000	657,76	653	9,63	6,58	13	101,85	105	21,02	67,9	141,41
		8000	656,76			13,14		102,57			136,76	
		12000	646,13			19,38		109,79			219,58	
	0,2	4000	894,68	881	110,41	11,93	23,4	113,41	110	21,02	75,61	147,05
		8000	881,38			23,5		105,78			141,04	
		12000	867,92			34,72		112,25			224,5	
6,8	0,09	4000	72,94	78	4,96	0,44	0,94	35,46	46	9,55	23,64	64,34
		8000	81,18			0,97		49,7			66,27	
		12000	78,92			1,42		51,55			103,1	
	0,15	4000	75,63	76	8,73	0,76	1,5	47,66	52	6,01	31,77	71,76
		8000	85,51			1,71		57,02			76,03	
		12000	67,73			2,03		53,74			107,48	
	0,2	4000	80,62	70	8,51	1,07	1,79	54,89	54	6,14	36,59	72,53
		8000	69,06			1,84		55,67			74,23	
		12000	61,56			2,46		53,39			106,78	

4.2.2 – Produtividade dos Alargadores

4.2.2.1 - Esforços de usinagem no alargador de 7,063 mm

Na tabela 4.4 o valor indicado por (*) foi eliminado por ser um ponto com um erro devido, provavelmente, à aleatoriedade do sistema de usinagem e de medida. Nesta tabela, são apresentados os valores médios das diversas medidas realizadas para cada parâmetro e em seguida a média destas médias também foi apresentada.

A força de avanço e o momento torsor, da mesma forma que ocorreu com estes parâmetros quando foram ensaiadas as brocas helicoidais, permaneceram com uma variação de seus valores relativamente pequena, devido ao fato de que independem do valor da rotação. Apresentaram, entretanto, um valor coerentemente crescente quando o avanço variou.

As potências de avanço mostraram-se coerentemente crescentes com o aumento do avanço e da rotação, já a potência de corte mostrou-se coerentemente crescente para o primeiro alargador e para o segundo verificou-se a incidência de algum erro de medida ou do sistema que comprometeu a confiança do último valor apurado, qual seja, 35,3 W.

Verifica-se que, diante do valor disponível de potência da máquina de 15 kW, os valores necessários para as operações de alargamento são extremamente pequenos, não causando qualquer preocupação com o limite de potência da máquina.

Da mesma forma, as forças e os momentos torsores medidos são bastante pequenos para merecer uma atenção especial quanto aos limites de esforços mecânicos da máquina ferramenta.

Tabela 4. 4 - Esforços de usinagem para os Alargadores

D[mm]	f[mm/rot.]	S[rpm]	Força de Avanço [N]	Força de Avanço Média [N]	Desvio Padrão	Potência de Avanço [w]	Potência de Avanço Média [w]	Momento tursor [N.cm]	Momento Torsor Médio [N.cm]	Desvio Padrão	Potência de Corte [w]	Potência de Corte Média [w]
7,063	0,1	1300	78,24	66	10,73	0,17	0,28	38,12	30	9,09	8,3	12,4
		2700	64,99			0,29		27,13			12,2	
		4000	55,21			0,37		24,84			16,6	
	0,15	1300	83,9	73	19,74	0,27	0,47	51,21(*)	43	12,26	11,1(*)	14,7
		2700	70,42			0,48		36,56			16,5	
		4000	66,79			0,67		41,17			27,5	
	0,2	1300	87,5	70	19,40	0,38	0,58	38,16	39,7	10,49	8,3	17,7
		2700	65,75			0,59		42,5			19,1	
		4000	57,14			0,76		38,48			25,6	
7,142	0,1	1300	15,75	16	1,52	0,03	0,07	98,34	88,7	13,69	21,3	38,6
		2700	16,35			0,07		80,31			36,1	
		4000	17,12			0,11		87,45			58,3	
	0,15	1300	17,56	18	1,06	0,06	0,13	104,17	94,1	24,50	22,6	39,8
		2700	18,68			0,13		101,83			45,8	
		4000	18,86			0,19		76,43			50,9	
	0,2	1300	19,86	18,3	1,55	0,09	0,16	95,85	84,5	12,79	20,8	35,3
		2700	18,4			0,17		91,87			41,3	
		4000	16,74			0,22		65,85			43,9	

4.2.2.2 – Rugosidade, Cilindricidade e Circularidade dos Alargadores

A tabela 4.5 mostra os erros de cilindridade e circularidade do pré-alargador de 7,063 mm de diâmetro. A operação de pré-alargamento foi realizada após a operação com a broca de diâmetro de 6,8 mm. Foram realizadas as medidas dos erros de cilindridade e circularidade apenas para verificar se estes eram influenciados pelo sobremetal relativamente irregular deixado pela broca e se os seus valores seriam tão grandes a ponto de influenciar a qualidade do furo na operação final.

Verificou-se que tanto a cilindridade quanto a circularidade apresentaram valores muito pequenos revelando não terem sofrido influência importante da operação de furação e insuficientes para influenciar a qualidade final do furo, pois, o sobremetal a ser retirado pelo alargador de 7,142 mm foi de cerca de 20 vezes maior que os erros apresentados.

Considerando os limites 0,019 mm de tolerância de cilindridade e circularidade impostos pelo projeto peça, verifica-se que o avanço de 0,2 mm/volta, para qualquer das rotações ensaiadas satisfaz. Também, para o limite 1,6 μm de rugosidade, o avanço de 0,2 mm/rot. satisfaz.

Estes fatos levaram a considerar o avanço de 0,2 mm/volta e rotação de 4.000 rpm como os melhores valores para aumento da produtividade na operação de alargamento, para ambos os alargadores. Quando comparados com os valores praticados pela empresa X, tem-se um ganho de produtividade destacadamente vantajoso, pois, como já mencionado anteriormente, o avanço praticado pela empresa é de 0,1 mm/rot. e a rotação é de 600 rpm.

Aparentemente, quando o sobremetal é maior (caso do alargador de 7,063 mm que remove 0,263 mm no diâmetro), os erros de cilindridade e circularidade são menores. Este fato pode estar relacionado com maior estabilidade do processo pela resistência maior oferecida pela peça quando o volume de cavaco foi conseqüentemente maior.

Tabela 4. 5 - Erros de Cilindricidade e Circularidade do Pré- Alargamento

D[mm]	f[mm/rot.]	S[rpm]	Cilindricidade [mm]	Circularidade [mm]	Rugosidade [μm]
7,063	0,1	1300	0,002	0,005	-
		2700	0,003	0,004	-
		4000	0,003	0,003	-
7,063	0,15	1300	0,002	0,002	-
		2700	0,005	0,002	-
		4000	0,003	0,002	-
7,063	0,2	1300	0,004	0,005	-
		2700	0,001	0,004	-
		4000	0,006	0,003	-

Tabela 4. 6 - Erros de Cilindricidade e Circularidade do Alargamento Final

D[mm]	f[mm/rot.]	S[rpm]	Cilindricidade [mm]	Circularidade [mm]	Rugosidade [μm]
7,142	0,1	1300	0,008	0,005	0,33
		2700	0,011	0,006	0,32
		4000	0,005	0,004	0,30
7,142	0,15	1300	0,009	0,005	0,40
		2700	0,011	0,003	0,43
		4000	0,007	0,003	0,30
7,142	0,2	1300	0,007	0,003	0,32
		2700	0,005	0,006	0,31
		4000	0,008	0,007	0,35

4.3 - Terceiro Bloco de ensaios

Na tabela 4.7, encontram-se apresentados os resultados de todas as 20 condições de usinagem planejadas conforme terceiro bloco de ensaios previstos no capítulo 4.

A análise destes resultados foi realizada considerando-se, como vantagens, as seguintes condições:

- realização da operação de pré-furação, pois, esta é uma condição que consta do projeto da peça e terá que ser realizado de qualquer forma;
- não realização da operação de pré-alargamento, desde que sem ele os resultados com relação à qualidade final do furo fossem plenamente

satisfatórios (esta afirmação vem sustentada pelos resultados das tabelas 4.5 e 4.6 apresentadas anteriormente);

- os valores de força de usinagem e momento torsor devem respeitar os limites da máquina;
- os valores de potência de corte e de potência de avanço devem respeitar os limites da máquina. Destaca-se que estes valores já foram determinados para a rotação de 4.000 rpm e avanço de 0,2 mm/rot. no segundo bloco de ensaio e mostraram ser bem inferiores aos limites da máquina. Como para estes valores de rotação e avanço a potência de corte foi 0,15 kW, para uma rotação ~3 vezes maior e mesmo avanço de 0,2 mm/rot., ter-se-á um valor de potência também ~3 vezes maior, ou seja de 0,45 kW. Ainda assim, a potência necessária será inferior à disponível;
- a tolerância do diâmetro é de +0,000 e + 0,035. Quanto à circularidade e cilindridade o limite tolerável é de 0,019 mm. a variável de resposta mais importante é o diâmetro e a rugosidade o limite é 1,6 μm

Aplicando as restrições acima na tabela 4.7 em cor vermelha, observa-se que apenas a coluna de número 6 satisfaz plenamente todas as condições impostas.

É relevante destacar que a velocidade de 300 m/min., apresentou um problema adicional relacionado com a vibração e/ou possível perda da rigidez do sistema. O alargamento do furo para a velocidade de corte de 300 m/min., pode ter sido “maior amplitude do batimento do alargador por causa da alta rotação quando se trabalhou com a velocidade de corte de 300 m/min., provocado por falta de estabilidade e/ou rigidez do sistema de fixação do alargador”. Foi observado durante os ensaios com velocidade de corte de 300 m/min., um ruído do sistema completamente diferente do observado com velocidade de corte de 100 m/min.. Ao encontrar tal fato, reduziu-se a velocidade de corte para 200 m/min. utilizou-se um avanço de 0,15 mm/rot., procurando por condição intermediária entre 100 m/min. e 300 m/min..

Entretanto, apesar de ocorrer uma diminuição no ruído (vibração e ou perda de rigidez do sistema), este continuou existindo e a qualidade do furo também foi melhor do que a encontrada para 300 m/min. e avanço de 0,2 mm/rot.. Este fato justifica a perda total da qualidade final do

furo. Justifica também a hipótese da influência da vibração e da rigidez do sistema na qualidade do furo.

Além disso, como é típico de trabalhos de pesquisa experimentais e como também é típico dos processos de usinagem, foi observado uma significativa aleatoriedade nos resultados.

Tabela 4. 7 - Ensaios do terceiro bloco com destaque em vermelho identificando as restrições que não atendem as vantagens enumeradas no texto

	Condição de ensaio																			
Ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Pré-furo	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S
Pré-Alargamento	N	N	S	S	N	N	S	S	N	N	S	S	N	N	S	S	N	N	S	S
Avanço [mm/rot.]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,1	0,1	0,1	0,1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,15	0,15	0,15	0,15
Rotação [rpm]	4.457	4.457	4.457	4.457	4.457	4.457	4.457	4.457	13.371	13.371	13.371	13.371	13.371	13.371	13.371	13.371	8.914	8.914	8.914	8.914
Velocidade de corte [m/min.]	100	100	100	100	100	100	100	100	300	300	300	300	300	300	300	300	200	200	200	200
Momento Torsor [N.cm]	34,22	14,90	32,6	13,91	54,58	18,10	40,66	19,83	124,69	87,83	110,94	0,91	146,69	102,97	153,66	75,70	26,56	59,12	50,45	28,49
Força de Avanço [N]	75	53,21	80,12	62,76	74,96	78,63	71,71	67,19	32,74	33,58	32,09	1,18	32,75	27,28	32,68	22,55	48,64	47,04	33,85	23,35
Alargamento do diâmetro dr – dn (*)	0,025	0,027	0,023	0,014	0,021	0,012	0,013	0,010	0,404	0,434	0,426	0,431	0,344	0,306	0,295	0,151	0,033	0,095	0,080	0,050
Circularidade [mm]	0,036	0,025	0,032	0,019	0,033	0,019	0,024	0,022	0,098	0,047	0,108	0,086	0,053	0,175	0,079	0,314	0,052	0,068	0,065	0,048
Cilindricidade [mm]	0,032	0,024	0,031	0,017	0,019	0,019	0,023	0,017	0,137	0,300	0,116	0,104	0,286	0,276	0,400	0,260	0,065	0,150	0,121	0,074
Rugosidade [µm]	0,232	0,312	0,213	0,238	0,268	0,313	0,223	0,236	0,353	1,450	0,768	0,700	2,675	1,167	1,873	0,788	0,334	0,598	0,548	0,560
(dr-dn) médio [mm]	0,022				0,014				0,065				0,42				0,27			

(*) diferença entre o diâmetro final usinado (dr) e o diâmetro nominal (dn) de projeto do furo (7.142 mm)

A figura 4.2 mostra a influência combinada das velocidades de corte e avanços utilizados para realização dos ensaios. Para a empresa X o quesito de qualidade fundamental é a tolerância do diâmetro, qual seja: (+ 0,000 + 0,035). Por este motivo apenas este fator foi destacado da na figura 4.2.

Na figura 4.2 é possível observar os seguintes aspectos:

- o alargamento de diâmetro do furo aumentou com o aumento da velocidade de corte;
- o alargamento de diâmetro do furo diminuiu com o aumento do avanço; isto se deveu provavelmente, porque o avanço maior ofereceu uma situação de contraposição ao corte provocando maior estabilidade do processo;
- somente para a velocidade de 100 m/min. a tolerância do diâmetro é respeitada;
- estes fatos comprovam a seleção das condições de usinagem e seus resultados na tabela 4.7 como sendo a coluna 6.

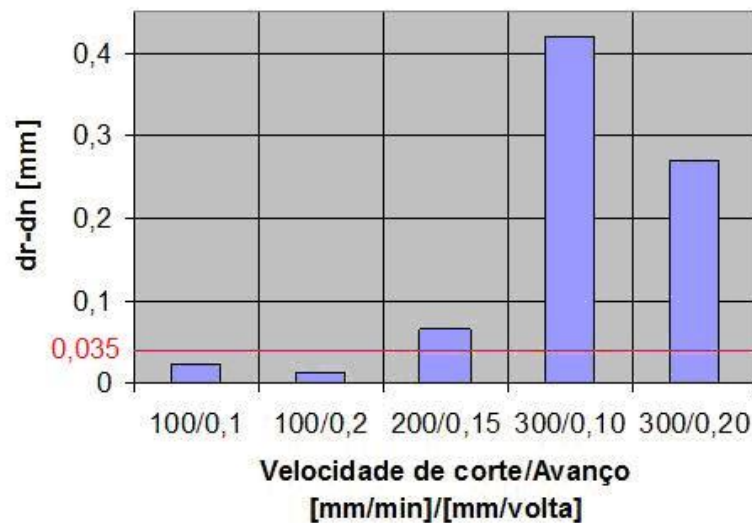


Figura 4.2. - Influência da velocidade de corte e do avanço no alargamento do furo final.

4.4 – Análise da Produtividade Após Otimizações

A tabela 4.8 apresenta os dados utilizados:

- (a) pela empresa X;
- (b) os dados resultantes dos ensaios de otimização realizados neste trabalho constantes do segundo bloco para as brocas helicoidais e terceiro bloco para os alargadores conforme coluna 6 da tabela 4.7;
- (c) dados otimizados para uma simulação (que não foi ensaiada) que considera a utilização de uma broca escalonada nos diâmetros 6,0 e 6,8 mm, os dados da coluna 6 da tabela 4.7 para os alargadores.

Tabela 4. 8 – Comparação das condições de usinagem para: (a) Empresa X; (b) valores otimizados sem pré-alargamento; (c) valores otimizados com broca escalonada.

Condições de usinagem da Empresa X					
	Broca [mm]	Broca [mm]	Alargador [mm]	Alargador [mm]	
Tempo passivo	0,2	0,2	0,2	0,2	
Diâmetros [mm]	6,00	6,80	7,063	7,142	
Avanço [mm/rot.]	0,09	0,09	0,10	0,10	
Rotação [rpm]	2000	2000	600	600	
Comprimento do furo [mm]	27	12	12	12	
Velocidade de corte [m/min.]	37,70	42,73	13,31	13,46	
Tempo de corte [min.]	0,15	0,07	0,20	0,20	
Tempo corte total [min.]					0,62
Tempo passivo total [min.]					0,80
Tempo total de produção [min.]					1,42

(a)

Condições de usinagem após otimização					
	Broca [mm]	Broca [mm]	Alargador [mm]	Alargador [mm]	
Tempo passivo	0,2	0,2		0,2	
Diâmetros [mm]	6,00	6,80		7,142	
Avanço [mm/rot.]	0,20	0,20		0,20	
Rotação [rpm]	12000	12000		4457	
Comprimento do furo [mm]	27	12		12	
Velocidade de corte [m/min.]	226,20	256,35		100,00	
Tempo de corte [min.]	0,01	0,01		0,01	
Tempo corte total [min.]					0,03
Tempo passivo total [min.]					0,60
Tempo total de produção [min.]					0,63

(b)

Condições de usinagem com Broca Escalonada					
	Broca [mm]	Broca [mm]	Alargador [mm]	Alargador [mm]	
Tempo passivo		0,2		0,2	
Diâmetros [mm]		6,8		7,142	
Avanço [mm/rot.]		0,2		0,2	
Rotação [rpm]		12000		4457	
Comprimento do furo [mm]		27		12	
Velocidade de corte [m/min.]		256,35		100,00	
Tempo de corte [min.]		0,01		0,01	
Tempo corte total [min.]					0,02
Tempo passivo total [min.]					0,40
Tempo total de produção [min.]					0,42

(c)

Os tempos passivos foram baseados em medida com cronômetro durante várias operações realizadas e não consideram tempo de preparação de máquina.

Foi possível comprovar uma drástica possibilidade de redução do tempo de produção da ordem de 55% apenas utilizando condições operacionais mais adequadas e dispensando a operação de pré-alargamento. Para a simulação realizada sugerindo broca escalonada o percentual de melhoria da produção seria de 70%.

Todos estes aspectos, entretanto, consideram que o principal fator restritivo do processo em análise está concentrado na tolerância do diâmetro de 0,000 a 0,035 mm.

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões para trabalho futuro

Os ensaios realizados neste trabalho permitem concluir que:

1. a empresa X, dentro das restrições de tolerância definidas por ela mesma, está utilizando valores para os parâmetros de usinagem muito aquém do possível;
2. os três blocos de ensaios realizados mostraram-se necessários para obter, no segundo bloco, os valores otimizados para o processo de furação e alargamento e no terceiro os valores otimizados para o processo de alargamento final;
3. dentro das restrições da empresa X foi possível, considerando apenas a tolerância exigida para o diâmetro final do furo, uma redução do tempo de produção da ordem de 50%;
4. apesar de não ter sido possível realizar ensaios com brocas helicoidais escalonadas, foi realizado uma simulação. Neste caso utilizando os mesmos dados da condição otimizada resultante do terceiro de bloco de ensaios, a redução no tempo de produção simulado foi de 70%.
5. a qualidade do furo mostrou-se sensível à velocidade de corte e a sua combinação com o avanço: o alargamento do diâmetro cresceu com o crescimento da velocidade de corte. O alargamento do diâmetro diminuiu com o aumento do avanço, mantida a mesma velocidade corte em 100 m/min..
6. a potência e os esforços utilizados foram muito aquém da disponibilidade da máquina. Portanto aumentar a rotação e avanço não causou problema.

7. possivelmente a responsabilidade do comportamento do alargamento do diâmetro deveu-se a instabilidade do sistema de fixação da ferramenta para velocidades de cortes maiores.

Sugestões para futuros trabalhos na área de alargamento são:

1. selecionar ferramentas diferentes das utilizadas pela empresa X, por exemplo: broca escalonada e seleção de alargador diferente e eventualmente mais adequado visando melhorar a qualidade e a produtividade resultante.
2. avaliar a vida dos alargadores e brocas visando fazer uma otimização que considere este parâmetro.

Referências Bibliográficas

- ABNT 6162, **Movimentos e Relações Geométricas na Usinagem dos Metais**, 1989.
- ALMEIDA D. O. **Investigação de desvios geométricos no alargamento do ferro fundido cinzento**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 103 p., 2008.
- ASTME, **Tool Engineers Handbook**, 2ªed. McGraw-Hill, 1959.
- BELLUCO W., DE CHIFFRRE L. Surface Integrity and Part Accuracy in Reaming and Tapping Stainless Steel with New Vegetable Based Cutting Oils , , **Teratology International** **35** p.865–870, 2002.
- BHATTACHARYYA O., JUN MARTIN B., KAPOOR SHIV G., DEVOR RICHARD E. The Effects of Process Faults and Misalignments on the Cutting Force System and Hole Quality in Reaming, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** **46** p.1281–1290, 2006.
- BORK, C.S., **Otimização de variáveis de processo para furação do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 127 p., 1995.
- BORRILE, ANDERSON VICENTE **Análise do Alargamento de Ferro Fundido Cinzento GG25 com Ferramentas de Metal Duro**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 125 p, 2005.
- BHATTACHARYYA Onik, KAPOOR Shiv G., DEVOR Richard E., Mechanistic Model for the Reaming Process with Emphasis on Process Faults, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** **46** p. 836–846, 2006.
- CASTRO, P.R.A., **Aspectos tecnológicos da usinagem a seco e com mínima quantidade de fluido de corte na furação com broca helicoidal**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 180 p., 2001.
- DIN 6580, **Begriffe der Zerspantechnik, Bewegungen und Geometrie des zerspanvorganges**, Berlin, beith - Vertrieb GmbH, 1963.

ECKHART, M., **Utilização de alargadores de gume único regulável para obtenção de furos de precisão**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.

ET, L., **Estudo da medição da textura de superfície com sondas mecânicas e com sondas ópticas tipo seguidor**, Tese de Doutorado, Universidade Feral de Santa Catarina, 1999.

FERRARESI, D., **Fundamentos da usinagem dos metais**, Editora Edgard Blucher, 751 p., 1977.

FERRARESI, D., **Usinagem dos Metais**, Furação, Alargamento, Fresamento e Processos não Convencionais, São Paulo, 1973.

GABOR, H., Como especificar brocas, **Máquinas e Metais**, MM Editora Ltda, Ano XIX, nº. 215, p. 28-34, 1983.

GUHRING. Herramientas de corte de precisión. **Catálogo do Fabricante**, edição 2002.

HATSCHEK, R.L., **Machining Aluminum**, American Machinist, Special Report 702(3), apud Schroeter, R.B., Alargamento de Precisão em Alumínio Aeronáutico com ferramentas de Gume Único Regulável, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 113 p., 1989.

ILIN, V.M., e MUKLIN, A.V., Reamer for Reaming Non-Ferrous Metals and alloys, **Machining and Tooling**, vol. 48, nº 48, p.52, 1977.

ISCAR Ltda, Reamers, **Solid-Ream**, Israel, 2003.

JUHCHIN A., Venkatraman Jaganathan, Ruxu Du, A New Dynamic Model for Drilling and Reaming Processes, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 42 p. 299-311, 2002.

KÖNIG, W., et al, **Diamond Machining Technology**, Tutorial 6º, Aachen: IPES/UME2, IPT, 1991.

KÖNIG, W., **Tecnologia da Fabricação**, Tornear, Fresar e Furar, vol. 1, Universidade Técnica de Aachen, Alemanha, 419 p., traduzido por Weingaertner, W.L., UFSC, 1981.

KRESS, D. e ERDEL, B.P., CNC, Tooling for Finish-Machining High Precision Boers, **Carbide Tool Journal**, Vol. 19, nº5, p. 118-128, 1987.

LUGSCHEIDER E., KNOTEK A O., C., BARIMANI A, LEYENDECKER T. LEMMER O., WENKE R., Investigations on Hard Coated Reamers in Different Lubricant Free Cutting Operations, Materials, **Surface and Coatings Technology** p. 172-177, 1997.

LUGSCHEIDER E., KNOTEK O., BARIMANI C., LEYENDECKER T., LEMMER O., WENKE R., PVD Hard Coated Reamers in Lubricant Free Cutting, **Surface and Coatings Technology** p.146-151, 1999.

MACHADO, A.R., DA SILVA, M.B., **Usinagem dos metais**, Apostila 3ª versão, Editora da Universidade Federal de Uberlândia, 1997.

MACHADO, A.R., DA SILVA, M.B., **Usinagem dos Metais**, Apostila, Editora da Universidade de Uberlândia - EDUFU, 224 p. 1999.

MACHADO, A.R., DINIZ, A.E., Vantagens e Desvantagens do Uso (ou não) de Fluidos de Corte, **Máquina e Metais**, Aranda Editora, ano XXXVII, nº419, p. 102-115, 2000.

MARTINEZ, F.G., **Recomendações e Cuidados com Fluidos de Corte Solúveis em Água**, O Mundo da Usinagem, disponível em:
http://www.omundodausinagem.com.br/geral/jsps/frame.jsp?pagina=/revistasandvik/edicao1-03/fluidos_de_corte.pdf.

METALS HANDBOOK, volume 16, **Machining**, Ninth Edition, ASM International, 1989.

METALS HANDBOOK, volume 2, **Properties and Selection: Nonferrous alloys and Pure Metals**, ninth edition, ASM International, 1989.

MATHEWS P.G., SHUNMUGAM M.S., Neural-network approach for predicting hole quality in Reaming, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** **39**, p. 723-730, 1999.

MILLER, P.C., Better Tools upgrade Boring and Reaming, **Tooling & Production**, p. 30-32, 1986.

MOTTA, M.F., MACHADO, A.R., Fluidos de Corte: Tipos, Funções, Seleção, Métodos de Aplicação e Manutenção, **Máquina e Metais**, Uberlândia, p. 44-56, 1995.

OHGO, K., SATOH, A., MIZUNO, T., e ITOH, T., Relation between Cutting conditions and precision in the Reaming of Gray Iron Castings, **Wear**, vol. 52, nº1, p. 79-88, 1979.

RUDNICK, L. Synthetic Lubricants and High Performance Functional Fluids, Second Edition, New York, NY: Marcel Dekker Incorporated, 1999.

SANDVIK COROMAT, **Modern Metal Cutting**, a Practical Handbook, 1ª Edição, Suécia, 840 p., 1994.

SHAW, M.C., **Metal Cutting Principles**, Oxford Science Publications, USA, ISBN0-19-859002-4, 594 p., 1986.

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

SCHROER, M., **Reiben von Vergütungsstahl mit Einschneiden-Reibahlen**, Dissertacion, Universität Dortmund, Essen: Vulkan-Verlag, 2000.

SCHROETER, R.B., Weingaertner, W.L., **Processos de Usinagem e Ferramentas de Corte** - nível 1, parte 2, Laboratório de Mecânica de Precisão, UFSC, 2001.

SHUNMUGAM, M.S. e Somasundaram, G., Investigations into Reaming Process Using a Frequency-Decomposition Technique, **International Journal of Production Research**, vol. 28 nº11, p. 2065-2074, 1990.

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

SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS, Tool and Manufacturing Engineers Handbook, **Machining**, 4ª ed., Dearborn, 1983.

SORATGAR, M.S., **An Analysis of the Effectiveness of Reaming as a Secondary Operation for Hole Production**, Degree of Doctor of Philosophy, Texas technology University, USA, 113 p., 1987.

SPUR, G., STÖFERLE, T., Handbuch der Fertigungstechnik Spanen, Band 3/1, Munique, Editora Carl hanser, 592 p., 1979.

STEMMER, C.E., **Ferramentas de corte I**, 4ª ed., Editora UFSC, 1995.

STEMMER, C.E., **Ferramentas de corte II**: Brocas, Alargadores, Ferramentas de Roscar, Brochas, Rebolos e Abrasivos, Editora da UFSC, Florianópolis, 314 p.. 1972.

STEMMER, C.E., **Ferramentas de Corte**: Ferramentas Simples de Tornear, 2ªed. Editora UFSC, Florianópolis, 295 p., 1989.

STOETERAU, R.L., **Desenvolvimento do protótipo de uma máquina-ferramenta comandada numericamente para usinagem de ultra-precisão de geometria definida**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.

SWIFT, KG, BOOKER, JD, and Chapter: Part II: Selecting Candidate Processes **Process Selection: from Design to Manufacture**, p. 165, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003.

TIEFBOHREN, página da internet, disponível em <http://www.tiefbohren.info>.

TOWFIGHIAN S. K., BEHDINAN M. PAPINI Z. SAGHIR, P. ZALZAL J. de Beer, Finite Element Modeling of Low Speed Reaming Vibrations with Reamer Geometry Modifications, **Journal of Intelligent Manufacturing** **18** p.647-661, 2007.

TÖNSHOFF, H et al., Machining for Holes: Developments in Drilling Technology, **Annals of CIRP**, 43v, p.551-561, 1994.

TÖNSHOFF, H.K., SPINTING W., KÖNIG, W., e NEISES A., Machining of Holes Developments in Drilling Technology, **Annals of the CIRP**, volume 43/21994, p. 551-561, 1994.

TOTTEN, G. et al., **Handbook of Aluminum**, Vol. 1, Physical Metallurgy and Process, 2003.

TURLEY, D.M., Surface Finishes Produced by Tungsten Carbide Taper Pin Reamers, **Transactions of the ASME**, Vol. 97, nº1, p. 21-24, 1975.

WEINERT, K., ADAMS, F., BIERMANN, D., e THAMKE, D., Alargadores de Corte Único: Corte mais Eficiente, Além das Vantagens Econômicas, **Máquinas e Metais**, Aranda Editora, Ano XXXIV, nº. 384, p. 38-57, 1998.

WEINERT, K., HAGEDORN, M., Modifizierte Schneidengeometrien Für
ehrschneidenreibahlen, Werkstattstechnik on line, Jahrgang 92 H9, 2002,
<http://www.technikwissen.de/librar/content/17/2002/09/459.pdf>.

YU P. Kholmogortsev, **Russian Engineering Research**, Vol. 29, Nº. 4, p. 375-382, 2009.

YU K. T., SHEU S. H., CHEN K. S., The Evaluation of Process Capability for a Machining Center, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2007.

Anexos

Planilhas com o cálculo das médias e desvio padrão para os resultados dos ensaios referentes ao segundo bloco.

Rotação [rpm]	Avanço [mm/rot.]	Força de avanço [N]	Força de avanço média [N]	Desvio Padrão	Momento torsor [N.cm]	Momento torsor médio [N.cm]	Desvio Padrão
4000	0,09	666,58	618,03	68,67	74,20	86,32	17,14
		569,47			98,45		
		*			*		
	0,15	649,33	657,76	8,45	66,60	101,85	30,60
		657,73			121,57		
		666,23			117,39		
	0,2	888,71	894,68	11,89	110,54	113,41	3,63
		908,38			112,19		
		886,96			117,48		
8000	0,09	539,1	551,16	27,58	90,52	97,18	41,06
		582,72			141,17		
		531,66			59,85		
	0,15	671,69	656,76	13,10	100,37	102,57	3,61
		651,37			100,60		
		647,22			106,74		
	0,2	882,09	881,38	1,64	43,90	105,78	53,70
		879,5			140,15		
		882,54			133,30		
12000	0,09	451,2	508,01	49,90	63,09	93,80	33,57
		528,08			129,63		
		544,75			88,68		
	0,15	643,91	646,13	1,94	77,99	109,79	27,57
		647,5			126,87		
		646,99			124,51		
	0,2	661,55	667,92	5,97	88,04	112,25	32,06
		668,8			148,60		
		673,4			100,10		

Planilhas com o cálculo das médias e desvio padrão para os resultados dos ensaios referentes ao terceiro bloco.

Condição de ensaio 1)100-01-sempf-sempa

	Momento torsor {N.cm}	Força de Avanço [N]	Diâmetro [mm]	Circularidade [mm]	Cilindricidade [mm]	Rugosidade [μm]
	36,84	74,97	7,177	0,050	0,034	0,27
	38,298	79,81	7,17	0,032	0,030	0,24
	33,588	76,91	7,164	0,034	0,040	0,15
	34,401	74,67	7,168	0,029	0,027	
	32,937	76,32	7,166	0,034	0,031	0,23
	31,477	71,56	7,16	0,031	0,031	0,26
	31,977	70,78	7,162	0,045	0,030	0,24
Desvio Padrão	2,52	3,12	0,006	0,008	0,004	0,043
Média	34,22	75,00	7,167	0,036	0,032	0,232

(*) diferença entre o diâmetro final usinado (dr) e o diâmetro nominal (dn) de projeto do furo (7,142 mm)

Condição de ensaio 2)100-01-sempf-compa

	Momento torsor {N.cm}	Força de Avanço [N]	Diâmetro [mm]	Circularidade [mm]	Cilindricidade [mm]	Rugosidade [μm]
	15,364	51,67	7,172	0,026	0,031	0,41
	14,561	46,95	7,172	0,023	0,023	0,37
	15,197	60,3	7,172	0,021	0,022	0,25
	14,435	53,74	7,171	0,021	0,022	0,44
	12,77	51,62	7,174	0,028	0,026	0,15
	15,973	55,45	7,162	0,029	0,021	0,25
	15,984	52,74	7,159	0,028	0,020	
Desvio Padrão	1,12	4,08	0,006	0,003	0,004	0,113
Média	14,90	53,21	7,169	0,025	0,024	0,312

Condição de ensaio 3)100-01-compf-sempa

	Momento torsor {N.cm}	Força de Avanço [N]	Diâmetro [mm]	Circularidade [mm]	Cilindricidade [mm]	Rugosidade [μm]
	34,097	82,2	7,173	0,029	0,035	0,21
	34,511	82,46	7,161	0,030	0,032	0,18
	28,286	81,12	7,159	0,041	0,033	0,24
	28,253	82,6	7,166	0,031	0,030	0,17
	37,803	80,6	7,166	0,035	0,030	0,20
	32,263	81,4	7,164	0,029	0,026	0,24
	32,989	70,43	7,164	0,030	0,028	0,25
Desvio Padrão	3,43	4,33	0,004	0,004	0,003	0,031
Média	32,60	80,12	7,165	0,032	0,031	0,213

Condição de ensaio 4)100-01-compf-compa

	Momento torsor {N.cm}	Força de Avanço [N]	Diâmetro [mm]	Circularidade [mm]	Cilindricidade [mm]	Rugosidade [μm]
	15,879	60,84	7,157	0,014	0,020	0,46
	11,752	58,19	7,160	0,024	0,015	0,30
	11,878	65,05	7,160	0,022	0,017	0,22
	15,237	62,89	7,157	0,022	0,016	0,17
	15,345	62,72	7,154	0,019	0,015	0,13
	14,523	64,01	7,152	0,017	0,017	0,38
	12,753	65,62	7,155	0,015	0,021	0,23
Desvio Padrão	1,74	2,57	0,003	0,004	0,002	0,117
Média	13,91	62,76	7,156	0,019	0,017	0,270

Condição de ensaio 5)100-02-sempf-sempa

	Momento torsor {N.cm}	Força de Avanço [N]	Diâmetro [mm]	Circularidade [mm]	Cilindricidade [mm]	Rugosidade [μm]
	55,015	76,64	7,164	0,027	0,021	
	53,681	73,03	7,165	0,026	0,018	0,26
	55,567	75,3	7,168	0,024	0,018	0,22
	55,456	77,25	7,168	0,094	0,020	0,34
	52,393	75,24	7,160	0,023	0,019	0,23
	54,739	73,12	7,156	0,016	0,020	0,27
	55,195	74,13	7,160	0,018	0,017	0,29
Desvio Padrão	1,15	1,64	0,005	0,027	0,001	0,044
Média	54,58	74,96	7,163	0,033	0,019	0,268

Condição de ensaio 6)100-02-sempf-compa

	Momento torsor {N.cm}	Força de Avanço [N]	Diâmetro [mm]	Circularidade [mm]	Cilindricidade [mm]	Rugosidade [μm]
	16,813	87	7,158	0,023	0,025	0,40
	19,002	78,7	7,160	0,021	0,019	
	18,983	77,32	7,156	0,021	0,023	
	18,709	77,44	7,152	0,016	0,016	0,22
	17,673	77,4	7,152	0,015	0,018	
	18,364	76,32	7,152	0,017	0,018	0,37
	17,137	76,21	7,150	0,019	0,015	0,26
Desvio Padrão	0,89	3,78	0,004	0,003	0,004	0,086
Média	18,10	78,63	7,154	0,019	0,019	0,313

Condição de ensaio 7)100-02-compf-sempa

	Momento torsor {N.cm}	Força de Avanço [N]	Diâmetro [mm]	Circularidade [mm]	Cilindricidade [mm]	Rugosidade [μm]
	48,667	83,19	7,154	0,030	0,027	0,21
	45,079	84,91	7,154	0,026	0,020	0,16
	47,922	85,29	7,152	0,020	0,024	0,24
	50,808	84,93	7,155	0,018	0,018	0,26
	43,772	81,23	7,156	0,017	0,022	
	0	0	7,159	0,027	0,024	0,24
	48,393	82,41	7,157	0,032	0,026	0,23
Desvio Padrão	18,08	31,66	0,002	0,006	0,003	0,035
Média	40,66	71,71	7,155	0,024	0,023	0,223

Condição de ensaio 8)100-02-compf-compa

	Momento torsor {N.cm}	Força de Avanço [N]	Diâmetro [mm]	Circularidade [mm]	Cilindricidade [mm]	Rugosidade [μm]
	19,481	74,92	7,156	0,020	0,017	0,24
	20,307	75,93	7,149	0,015	0,015	0,24
	21,783	72,55	7,157	0,019	0,019	0,17
	18,95	18,95	7,153	0,021	0,017	0,32
	19,308	75,68	7,148	0,031	0,020	0,25
	19,548	76,89	7,158	0,022	0,015	0,26
	19,462	75,39	7,144	0,028	0,015	0,17
Desvio Padrão	0,95	21,31	0,005	0,005	0,002	0,053
Média	19,83	67,19	7,152	0,022	0,017	0,236

Condição de ensaio 9)-300-01-sempf-sempa

	Momento torsor {N.cm}	Força de Avanço [N]	Diâmetro [mm]	Circularidade [mm]	Cilindricidade [mm]	Rugosidade [μm]
	113,501	29,24	7,535	0,093	0,132	
	134,615	28,21	7,545	0,117	0,137	
	132,805	25,98	7,553	0,104	0,123	0,30
	110,994	39,23	7,573	0,095	0,134	0,25
	125,579	35,81	7,553	0,109	0,151	
	125,558	35,76	7,516	0,090	0,154	0,51
	129,801	34,92	7,545	0,075	0,127	
Desvio Padrão	9,17	4,90	0,018	0,014	0,012	0,138
Média	124,69	32,74	7,546	0,098	0,137	0,353

Condição de ensaio 10)300-01-sempf-compa

	Momento torsor {N.cm}	Força de Avanço [N]	Diâmetro [mm]	Circularidade [mm]	Cilindricidade [mm]	Rugosidade [μm]
	82,605	24,42	7,591	0,063	0,265	
	92,982	32,73	7,574	0,041	0,256	1,19
	82,034	36,99	7,566	0,041	0,243	2,05
	85,595	37,72	7,591	0,056	0,226	0,99
	86,747	35,57	7,557	0,033	0,252	2,26
	92,064	35,45	7,574	0,034	0,769	0,63
	92,764	32,16	7,577	0,060	0,090	1,58
Desvio Padrão	4,76	4,53	0,012	0,013	0,215	0,630
Média	87,83	33,58	7,576	0,047	0,300	1,450

Condição de ensaio 11) 300-01-compf-sempa

	Momento torsor {N.cm}	Força de Avanço [N]	Diâmetro [mm]	Circularidade [mm]	Cilindricidade [mm]	Rugosidade [μm]
	136,206	35,92	7,602	0,120	0,129	1,10
	104,918	23,66	7,588	0,128	0,106	1,14
	104,213	32,26	7,522	0,077	0,112	0,28
	103,988	35,21	7,520	0,073	0,152	1,11
	110,882	28,89	7,555	0,092	0,098	0,56
	107,646	35,1	7,581	0,126	0,130	
	108,738	33,6	7,608	0,138	0,087	0,42
Desvio Padrão	11,43	4,42	0,036	0,026	0,022	0,392
Média	110,94	32,09	7,568	0,108	0,116	0,768

Condição de ensaio 12)300-01-compf-compa

	Momento torsor {N.cm}	Força de Avanço [N]	Diâmetro [mm]	Circularidade [mm]	Cilindricidade [mm]	Rugosidade [μm]
	1,48	1,25	7,569	0,055	0,097	
	0,429	1,03	7,568	0,145	0,138	0,68
	0,778	1,26	7,571	0,058	0,087	
	0,672	1,04	7,579	0,038	0,054	0,67
	1,202	1,31	7,604	0,095	0,083	0,69
	0,835	1,34	7,559	0,116	0,123	0,76
	0,971	1,04	7,564	0,094	0,148	0,70
Desvio Padrão	0,35	0,14	0,015	0,038	0,033	0,035
Média	0,91	1,18	7,573	0,086	0,104	0,700

Condição de ensaio 13)300-02-sempf-sempa

	Momento torsor {N.cm}	Força de Avanço [N]	Diâmetro [mm]	Circularidade [mm]	Cilindricidade [mm]	Rugosidade [μm]
	147,559	36,38	7,517	0,065	0,293	
	153,034	32,44	7,462	0,068	0,325	
	147,016	33,79	7,473	0,037	0,258	2,38
	141,075	32,73	7,489	0,025	0,284	2,73
	145,497	28,84	7,472	0,107	0,271	
	153,73	32,27	7,490	0,039	0,264	3,22
	138,938	32,82	7,496	0,029	0,308	2,37
Desvio Padrão	5,53	2,23	0,018	0,029	0,024	0,400
Média	146,69	32,75	7,486	0,053	0,286	3,106

Condição de ensaio 14)300-02-sempf-compa

	Momento torsor {N.cm}	Força de Avanço [N]	Diâmetro [mm]	Circularidade [mm]	Cilindricidade [mm]	Rugosidade [μm]
	103,396	33,89	7,432	0,219	0,273	1,48
	101,879	24,1	7,376	0,246	0,264	1,35
	97,885	26,31	7,520	0,153	0,285	0,96
	102,123	30,13	7,445	0,194	0,290	1,47
	103,458	23,37	7,467	0,143	0,281	1,13
	105,411	25,1	7,492	0,040	0,261	1,09
	106,647	28,06	7,404	0,228	0,275	0,69
Desvio Padrão	2,82	3,73	0,050	0,071	0,011	0,289
Média	102,97	27,28	7,448	0,175	0,276	1,167

Condição de ensaio 15)300-02-compf-sempa

	Momento torsor {N.cm}	Força de Avanço [N]	Diâmetro [mm]	Circularidade [mm]	Cilindricidade [mm]	Rugosidade [μm]
	160,761	32,79	7,482	0,062	0,528	
	155,045	32,53	7,443	0,065	0,556	1,37
	149,317	32,6	7,446	0,064	0,270	
	157,56	33,01	7,471	0,045	0,334	2,15
	155,087	30,89	7,436	0,101	0,269	2,05
	154,174	33,28	7,370	0,142	0,560	1,92
	143,681	33,69	7,413	0,072	0,285	
Desvio Padrão	5,60	0,89	0,037	0,033	0,140	0,348
Média	153,66	32,68	7,437	0,079	0,400	1,873

Condição de ensaio 16)300-02-compf-compa

	Momento torsor {N.cm}	Força de Avanço [N]	Diâmetro [mm]	Circularidade [mm]	Cilindricidade [mm]	Rugosidade [μm]
	38,958	17,08	7,311	0,276	0,261	
	0	0	7,261	0,685	0,283	
	117,436	37,32	7,234	0,236	0,291	0,65
	109,307	29,91	7,306	0,183	0,161	0,66
	93,84	21,35	7,294	0,278	0,244	0,80
	83,153	24,16	7,314	0,263	0,299	
	87,222	28,05	7,333	0,276	0,282	1,04
Desvio Padrão	41,77	11,87	0,034	0,167	0,048	0,182
Média	75,70	22,55	7,293	0,314	0,260	0,788

Condição de ensaio 17)200-015-compf-compa

	Momento torsor {N.cm}	Força de Avanço [N]	Diâmetro [mm]	Circularidade [mm]	Cilindricidade [mm]	Rugosidade [μm]
	26,873	95,51	7,174	0,033	0,042	0,34
	31,539	78,98	7,180	0,054	0,065	
	23,164	49,62	7,173	0,060	0,080	0,31
	17,207	40,81	7,172	0,054	0,061	
	24,563	10,26	7,189	0,053	0,104	0,38
	33,482	14,74	7,164	0,045	0,041	0,27
	29,126	50,53	7,172	0,067	0,062	0,37
Desvio Padrão	5,51	31,11	0,008	0,011	0,022	0,045
Média	26,56	48,64	7,175	0,052	0,065	0,334

Condição de ensaio 18)200-015-sempf-sempa

	Momento torsor {N.cm}	Força de Avanço [N]	Diâmetro [mm]	Circularidade [mm]	Cilindricidade [mm]	Rugosidade [μm]
	44,407	158,26	7,231	0,063	0,092	0,56
	81,553	27,06	7,240	0,083	0,109	
	47,389	25,25	7,250	0,073	0,223	0,73
	30,216	34,17	7,250	0,064	0,097	
	69,165	28,08	7,260	0,058	0,101	
	73,131	25,35	7,204	0,078	0,076	0,47
	68,011	31,11	7,227	0,055	0,352	0,63
Desvio Padrão	18,57	49,15	0,019	0,010	0,102	0,110
Média	59,12	47,04	7,237	0,068	0,150	0,598

Condição de ensaio 19)200-015-compf-sempa

	Momento torsor {N.cm}	Força de Avanço [N]	Diâmetro [mm]	Circularidade [mm]	Cilindricidade [mm]	Rugosidade [μm]
	20,318	47,67	7,221	0,067	0,093	
	40,728	70,73	7,250	0,061	0,105	
	80,462	31,21	7,199	0,084	0,102	0,50
	49,678	23,52	7,227	0,069	0,199	
	56,46	18,92	7,227	0,052	0,089	0,18
	48,047	23,25	7,225	0,053	0,161	1,00
	57,467	21,68	7,202	0,067	0,100	0,51
Desvio Padrão	18,23	18,92	0,017	0,011	0,042	0,338
Média	50,45	33,85	7,222	0,065	0,121	0,548

Condição de ensaio 20)200-015-sempf-compa

	Momento torsor {N.cm}	Força de Avanço [N]	Diâmetro [mm]	Circularidade [mm]	Cilindricidade [mm]	Rugosidade [μm]
	18,238	64,31	7,163	0,017	0,017	
	33,127	14,28	7,204	0,056	0,063	0,68
	29,65	14,88	7,199	0,060	0,159	0,54
	33,075	19,04	7,233	0,069	0,081	0,66
	22,899	13,27	7,205	0,053	0,077	0,34
	35,867	16,16	7,172	0,044	0,056	0,53
	26,602	21,48	7,168	0,039	0,064	0,61
Desvio Padrão	6,30	18,29	0,025	0,017	0,043	0,124
Média	28,49	23,35	7,192	0,048	0,074	0,560