

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

Lilio dos Santos

Aplicabilidade do ensaio de usinabilidade com pressão constante ao estudo de usinabilidade de aços

Belo Horizonte

Janeiro 2013

Lilio dos Santos

Aplicabilidade do ensaio de usinabilidade com pressão constante ao estudo de usinabilidade de aços

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Sandro Cardoso Santos

Belo Horizonte
Janeiro de 2013

Santos, Lilio dos.
S237e Aplicabilidade do ensaio de usinabilidade com pressão constante
ao estudo de usinabilidade de aços / Lilio dos Santos . - 2012.
120 f. -

Orientador: Sandro Cardoso dos Santos.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-graduação em
Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2013.

Bibliografia.

1. Usinagem. 2. Usinabilidade, furação a pressão constante,
brocas. 3. Materiais. 4. Processos de fabricação. I. Santos, Sandro
Cardoso dos. II. Título.

CDD:671.35

Aplicabilidade do ensaio de usinabilidade com pressão constante ao estudo de
usinabilidade de aços

Dissertação apresentada em 31 de Janeiro de 2013 por Lilio dos Santos, ao Curso de Mestrado em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET – MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, aprovada pela banca examinadora constituída dos professores:

Prof. Sandro Cardoso Santos – orientador
Doutor em Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Alexandre Martins Reis
Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Viçosa – Minas Gerais

Prof. Yukio Shigaki
Doutor em Engenharia Metalúrgica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Leonardo Roberto Silva
Doutor em Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Belo Horizonte, 31 de Janeiro de 2013

À minha esposa e companheira e
filhos pela motivação, apoio e espera ao longo
destes anos de estudo.

Agradecimentos

Sou grato a todas as pessoas que me ajudaram na realização deste trabalho, porém algumas merecem o meu agradecimento especial:

A todos professores de Mestrado de Engenharia de Materiais, pelo convívio, orientação e comprometimento, destaque para o professor Sidney Nicodemos da Silva pelo apoio incondicional para que alcançasse meu objetivo;

Ao Prof. Sandro Cardoso Santos pela orientação segura e determinação na condução da minha pesquisa, contribuindo com sua experiência e me indicando os profissionais com mais experiências nas áreas específicas;

Ao Prof. Antonio Romero, do CEFET Campus I, pela sua dedicação na operação do centro de usinagem para realização dos ensaios;

Ao Técnico mecânico de laboratórios Itamar Herculano Gonçalves, CEFET/MG Campus II Departamento de Engenharia Mecânica – DEM, pela sua dedicação na montagem, adaptação e preparação da Furadeira Manrod 200, para realização dos ensaios;

À primeira turma de mestrandos em Engenharia de Materiais, maioria professores, que me acolheram e me apoiaram abrindo as portas do CEFET MG para que conseguisse meus objetivos;

Ao CNPQ pelo apoio financeiro concessão de bolsa de estudo;

À Fapemig pelo apoio ao projeto de pesquisa;

Finalmente, mas não por último, aos meus amigos e familiares pelo incentivo, apoio e principalmente pela paciência e espera durante este longo período de dedicação exclusiva.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	14
LISTA DE NOTAÇÕES	15
RESUMO	17
ABSTRACT	18
1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Descrição do problema	20
2 OBJETIVOS	21
2.1 Objetivo Geral	21
2.2 Objetivos Específicos	21
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1 Histórico	22
3.2 Classificação dos processos de usinagem	25
3.2.1 <i>Processos tradicionais de usinagem</i>	25
3.2.2 <i>Processos não tradicionais de usinagem e usinagem por abrasão</i>	28
3.2.2.1 <u>Processos não tradicionais de usinagem</u>	28
3.2.2.2 <u>Usinagem por abrasão</u>	28
3.3 Processo de Furação	28
3.3.1 <i>Aspectos Gerais</i>	29
3.3.1.1 <u>Aplicabilidade do Processo</u>	29
3.3.1.2 <u>Variantes do Processo</u>	30
3.3.2 <i>A Ferramenta de Corte</i>	31
3.4 A formação do cavaco e interface cavaco-ferramenta	36
3.4.1 <i>O corte ortogonal</i>	36
3.4.2 <i>A formação do cavaco</i>	38
3.4.3 <i>Interface cavaco-ferramenta</i>	41
3.5 Desgaste e vida da ferramenta de corte	48
3.5.1 <i>Desgaste nas ferramentas de corte</i>	48
3.5.2 <i>Mecanismo e forma de desgaste</i>	52
3.5.3 <i>Desgaste nas brocas helicoidais</i>	56
3.5.4 <i>Vida das ferramentas</i>	58

3.5.4.1	<u>Como expressar a vida da ferramenta</u>	59
3.5.4.2	<u>Ensaio de vida – determinação da equação de Taylor</u>	60
3.6	Usinabilidade dos materiais	62
3.6.1	<i>Ensaio com aplicação de pressão constante</i>	64
3.6.1.1	<u>Resultados ensaio convencional X ensaio com pressão constante</u>	66
4	METODOLOGIA	67
4.1	Materiais furados	68
4.2	Ferramentas	69
4.3	Máquina-ferramenta	70
4.4	Ensaio de Vida das Brocas (furação convencional)	73
4.5	Condições finais	77
4.6	Ensaio de furação com pressão constante (curta duração)	77
5	RESULTADOS	80
5.1	Ensaio de vida	80
5.1.1	<i>A influência do material no processo de furação</i>	80
5.1.2	<i>A influência da broca no processo de furação</i>	81
5.1.3	<i>Formas e mecanismos de desgaste</i>	82
5.2	Ensaio de furação com pressão constante	96
5.2.1	<i>Influência do material da peça no processo de furação</i>	96
5.2.2	<i>Influência da geometria da broca</i>	97
5.3	Comparação do ensaio de furação convencional com o ensaio de furação a pressão constante	98
5.4	Outros ensaios de curta duração	101
5.4.1	<i>Comparação geral</i>	101
5.4.2	<i>Influência do revestimento ao longo da hélice brocas A e C</i>	109
5.4.3	<i>Influência do revestimento nas brocas F e G</i>	109
6	CONCLUSÕES	110
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	110
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
	Anexo A: Programa utilizado na operação do Centro de Usinagem	114
	Anexo B: Programa para teste de furação a pressão constante	115
	Anexo C: Sequência operação equipamento para ensaio de furação	116
	Anexo D: Ampliação das Figuras 50A e 50B	117

Anexo E: Ampliação da Figura 52	118
Anexo F: Ampliação da Figura 57	119
Anexo G: Ampliação da Figura 64	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Árvore-torno	22
Figura 2	Operação de torneamento	26
Figura 3	Furadeira de coluna	26
Figura 4	Vista do plano de trabalho de uma broca helicoidal	27
Figura 5	A furação entre outros processos de usinagem	29
Figura 6	Variantes do processo de furação (NBR 6175: 1971)	31
Figura 7	Partes de uma broca helicoidal	32
Figura 8	Geometria das brocas helicoidais	34
Figura 9	Influência do batimento radial sobre a sobremedida dos furos	35
Figura 10	Influência da excentricidade da ponta da broca	35
Figura 11	Variação do ângulo de saída ao longo da aresta de corte	36
Figura 12	Exemplo de corte tridimensional	37
Figura 13	Exemplo de corte ortogonal	37
Figura 14	Vista do plano de trabalho durante o corte ortogonal	38
Figura 15	Ensaio de compressão	39
Figura 16	Processo de formação de cavaco	40
Figura 17	Zonas de cisalhamento primárias e secundárias	41
Figura 18	Zona da aderência e escorregamento	42
Figura 19	Três regimes de atrito sólido	43
Figura 20	Modelo de distribuição de tensões em usinagem	44
Figura 21	Mapa de regimes de desgaste	45
Figura 22	Valores de força normalizada no diagrama	48
Figura 23	Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte	49
Figura 24	Avárias e desgastes de uma ferramenta	50
Figura 25	Desgaste de cratera na ferramenta de corte	51
Figura 26	Mecanismos e processos de desgaste nas ferramentas	53
Figura 27	Aspecto da aresta de corte de uma broca de metal duro	54
Figura 28	Identificação de marcas de desgaste abrasivo	55
Figura 29	Forma de desgaste em brocas	56
Figura 30	Representação do desgaste na aresta principal de corte	57
Figura 31	Representação do desgaste na aresta transversal da broca	57

Figura 32 Representação do desgaste na aresta secundária de corte	58
Figura 33 Curvas típicas da evolução de desgaste	61
Figura 34 Curvas de desgaste e de vida da ferramenta	61
Figura 35 Classificação dos ensaios de usinabilidade	64
Figura 36 Brocas utilizadas nos ensaios de furação a pressão constante	70
Figura 37 Centro de usinagem vertical, modelo Discovery 560 (ROMI)	70
Figura 38 Equipamento para ensaio de furação a pressão constante	71
Figura 39 Representação esquemática do ensaio de furação	72
Figura 40 Desenho esquemático da furação para o ensaio de vida	74
Figura 41 Ciclo de furação com o uso do pica-pau	76
Figura 42 Sequência de operações para penetração da broca	76
Figura 43 Desenho esquemático proc. furação com pressão constante	78
Figura 44 Detalhamento dos furos na amostra	79
Figura 45 Teste com os aços ABNT 1020, 4140 e 4340	80
Figura 46 Testes com as brocas A e B	81
Figura 47 Centro da broca, ampliação 40x	82
Figura 48 Extremidade da broca, ampliação 35x	83
Figura 49 Extremidade da broca, ampliação 40x	83
Figura 50 Centro da broca, ampliação 40x	84
Figura 51 Extremidade da broca, ampliação 50x	84
Figura 52 Centro da broca, ampliação 100x	85
Figura 53 Extremidade da broca, ampliação 100x	85
Figura 54 Extremidade da broca, ampliação 100x	86
Figura 55 Centro da broca, ampliação 40x	86
Figura 56 Extremidade da broca, ampliação 40x	87
Figura 57 Extremidade da broca, ampliação 40x	87
Figura 58 Centro da broca, ampliação 40x	88
Figura 59 Extremidade da broca, ampliação 40x	88
Figura 60 Centro da broca, ampliação 40x	89
Figura 61 EDS da Figura 60	89

Figura 62	Extremidade da broca, ampliação 40x	90
Figura 63	Extremidade da broca, ampliação 40x	90
Figura 64	Extremidade da broca, ampliação 70x	91
Figura 65	Indicação dos pontos onde foram feitas análise EDS, ampliação 70X	91
Figura 66	EDS no ponto AN2 da Figura 60	92
Figura 67	EDS no ponto AN3 da Figura 60	93
Figura 68	EDS no ponto AN4 da Figura 60	93
Figura 69	EDS no ponto AN5 da Figura 60	94
Figura 70	Aresta de corte da broca desgastada, ampliação 100x	94
Figura 71	Detalhe da Figura 70, ampliação 300x	95
Figura 72	Centro da broca, ampliação 100x	95
Figura 73	Detalhe da Figura 72, ampliação 300	96
Figura 74	Ensaio de furação com pressão constante para os aços ABNT 1020, 4140 e 4340	97
Figura 75	Ensaio de furação com pressão constante para as brocas A e B	98
Figura 76	Testes com as brocas A e B	99
Figura 77	Ensaio de furação com pressão constante para as brocas A e B	99
Figura 78	Ensaio de furação convencional para os aços ABNT 1020, 4140 e 4340	100
Figura 79	Ensaio de furação com pressão constante para a broca A	100
Figura 80	Ensaio com furação a pressão constante para o aço ABNT 1020	102
Figura 81	Ensaio com furação a pressão constante no aço ABNT 1045	103
Figura 83	Ensaio com furação a pressão constante no aço ABNT 4340	104
Figura 84	Ensaio com furação a pressão constante Broca A	105
Figura 85	Ensaio com furação a pressão constante broca B	105
Figura 86	Ensaio com furação com pressão constante broca C	106

Figura 87 Ensaio com furação com pressão constante broca D	107
Figura 88 Ensaio com furação com pressão constante broca E	107
Figura 89 Ensaio com furação com pressão constante broca F	108
Figura 90 Ensaio com furação com pressão constante broca G	109
Figura 50A Detalhe da área do lascamento da Figura 50, ampliação 150x	117
Figura 50B Detalhe da área do lascamento da Figura 50, ampliação 150x	117
Figura 52A Detalhe do lascamento mostrado na Figura 52, ampliação 300x	118
Figura 57A Detalhe da extremidade da broca, ampliação 120x	119
Figura 64A Detalhamento da Figura 64, ampliação 200x	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Força de corte e carga normalizada para o torneamento	47
Tabela 2 Composição química do material utilizado nos testes	68
Tabela 3 Características mecânicas do material utilizado nos testes	68
Tabela 4 Características do Centro de Usinagem Discovevy 560	71
Tabela 5 Características do Equipamento para ensaio de furação a pressão constante	72
Tabela 6 Parâmetros de usinagem (pré-teste)	73
Tabela 7 Condições de ensaio aço ABNT 1045, com a broca B	74
Tabela 8 Condições de ensaio aço ABNT 1045, brocas A e B	74
Tabela 9 Condições estabelecidas ensaio do Aço ABNT 4140, com a broca A	75
Tabela 10 Condições estabelecidas para realização dos testes	77
Tabela 11 Características das brocas utilizadas	101

LISTA DE NOTAÇÕES

A	Área de contato
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
a_p	Profundidade ou largura de corte
APC	Aresta postiça de corte
b	Largura de corte
BTA	“Boring and trepaning association”
C	Capacitância térmica global
CNC	Controle numérico computadorizado
CNC	Controle numérico computadorizado
D	Diâmetro da broca
d	Distância do eixo da broca
DIN	Instituto alemão para padronização
EDS	Detetor de energia dispersiva
F	Carga normal
f	Avanço
F_c	Carga
F_N	Carga normalizada
h	Espessura de corte
HR_C	Dureza Rockwell
HV	Dureza Vickers
K	Condutividade térmica
Kgf	Quilograma-força
KT	Desgaste de cratera
l	Profundidade de corte
l_f	Comprimento total das regiões de aderência e escorregamento
l_{st}	Comprimento da região de aderência
MPa	Mega Paschal
PLC	Controle lógico programável
Q	Intervalo de avanço da broca
R	resultado da operação pelo Critério de Chauvenet
rpm	Rotação por minuto

$r\epsilon$	.....	Raio de quina
$r\theta$	.....	Raio da aresta transversal
S	.....	desvio padrão da amostra
T	.....	Vida da ferramenta
$T * v_c^x = K$	.....	Fórmula original de Taylor para determinar a vida da ferramenta
TiN	.....	Nitreto de Titânio
VB	.....	Aresta principal de corte
VBF	.....	Desgaste da guia
VBQ	.....	Desgaste na aresta secundária
V_c	.....	Velocidade de corte
$v_c * Ty = C$	.....	Fórmula modificada de Taylor para determinar a vida da ferramenta
V_d	.....	Velocidade de deslizamento
V_{tc}	.....	Velocidade de transferência de calor
x e y	.....	Constantes
x_1	.....	o dado obtido no ensaio
x_m	.....	a média dos 10 dados
y_n	.....	Ângulo de saída normal do cavaco
α	.....	Ângulo de incidência
β	.....	Ângulo de cunha
δ	.....	Ângulo da hélice da broca
ϵ	.....	Ângulo de quina
ϕ	.....	Ângulo de cisalhamento
γ	.....	Ângulo de saída
σ_1 e σ_2	.....	Tensões normais
σ	.....	Ângulo da ponta da broca
σ	.....	Ângulo de ponta
τ_{st}	.....	Tensão cisalhante na região de aderência
τ	.....	Tensão cisalhante
ψ	.....	Ângulo da aresta (gume) transversal

RESUMO

O desenvolvimento e aperfeiçoamento dos métodos de extração de materiais da natureza, as modificações de materiais naturais além da combinação de diversos compostos conhecidos para a formação de novos materiais resultaram em uma variedade de diferentes tipos de materiais. Muitas vezes, um problema de materiais consiste na seleção correta dentre muitos milhares de materiais disponíveis (CALLISTER JR, 2008, p 4). Em função deste crescimento tornam-se necessárias pesquisas e desenvolvimento de novos ensaios, como os de furação com pressão constante. É necessário, principalmente, avaliar a correspondência dos resultados desses ensaios de furação a pressão constante com os resultados de ensaios de furação convencional (ensaio de vida). Os procedimentos para a realização desse tipo de ensaio, porém, necessitam de padronização o que muito contribuiria para tornar sua aplicabilidade mais abrangente. Este trabalho teve como finalidade desenvolver ensaios e apresentar resultados de ensaios de furação convencional e ensaios com furação a pressão constante nos aços ABNT 1020, 1045, 4140 e 4340 e comparar os resultados. Na análise da influência da geometria da broca, do revestimento e na análise dos materiais testados, constatou-se que os resultados dos ensaios de furação a pressão constante, foram compatíveis com os dos ensaios de furação convencional (ensaios de vida). Com base nestes resultados, pode-se recomendar que no teste absoluto, dos ensaios de usinabilidade, seja considerada a possibilidade de utilização do ensaio de furação com pressão constante em apoio e/ou em substituição ao ensaio de convencional (ensaio de vida).

Palavras-chave: Brocas; usinabilidade; furação a pressão constante.

ABSTRACT

The development and improvement of methods for extraction of materials from nature, modifications of natural materials and the combination of various compounds known to the formation of new materials have resulted in a variety of different types of materials. Often, a problem of materials is the correct selection from among many thousands of available materials (CALLISTER JR, 2008, p 4). Due to this growth become necessary research and development of new tests, such as constant pressure. It is necessary, mainly to evaluate the correspondence of the results of the constant pressure drilling tests with the conventional drilling test results (life test). The procedures to perform this type of test, however, require the standardization that much would make their broader applicability. This work had as objective to develop tests and present test results of conventional drilling and constant pressure drilling tests in the AISI 1020 steel, 1045, 4140, 4340 and compare the results. Analysis of the influence of geometry of the drill, the coating and the analysis of the materials tested, it was found that the results of the constant pressure drilling tests, were compatible with those of conventional drilling tests (tests of life). Based on these results, we can recommend that the absolute test of machinability, as the usability of drilling test with constant pressure in support and/or replacing the conventional test (test of life).

Keywords: Drills; machinability; constant pressure drilling.

1 INTRODUÇÃO

O número de materiais em desenvolvimento vem crescendo muito nas últimas décadas e a tendência é de evoluírem ainda mais num futuro próximo. O desenvolvimento e aperfeiçoamento dos métodos de extração de materiais da natureza, as modificações de materiais naturais além da combinação de diversos compostos conhecidos para a formação de novos materiais resultaram em uma variedade de diferentes tipos de materiais. Muitas vezes, um problema de materiais consiste na seleção do material correto dentre muitos milhares de materiais disponíveis (CALLISTER JR, 2008, p 4).

Em função desse crescimento justifica-se a pesquisa e o desenvolvimento de novos ensaios, como o de furação a pressão constante, que tem como característica a geração de resultados em curtos intervalos de tempo e a custos mais baixos do que o de furação convencional.

A usinabilidade é a grandeza que expressa o estudo de materiais aplicados em processos de usinagem, característica que expressa a facilidade de usinagem de um material de acordo com critérios pré-definidos. Apesar de não ser uma propriedade inerente ao material, a usinabilidade é uma grandeza que qualifica o material a ser usinado de acordo com critérios que definem os interesses do usuário. Os critérios de usinabilidade mais usados são o tempo de vida da ferramenta, as forças (e potências) necessárias na usinagem e a rugosidade das peças produzidas por este processo. (FERRARESI, 1976; SHAW, 1984; STEMMER, 1985).

Devido ao grande número de variáveis possíveis de se relacionar à usinabilidade de um material, torna-se necessário ter pleno conhecimento das mesmas, pois um material que apresenta melhor usinabilidade em relação a um critério pode apresentar resultado ruim de usinabilidade quando relacionado a outro. (AMORIM, 2002).

Neste contexto se insere este trabalho, cujo objetivo principal é a análise do comportamento da broca convencional e da broca de afiação cruzada na furação convencional e na furação a pressão constante dos aços ABNT 1020, ABNT 4140 e ABNT 4340.

Neste ensaio foi feita análise do comportamento das brocas em relação aos materiais em teste, análise dos materiais em teste em relação às brocas e análise dos desgastes das brocas, tanto nos testes de furação convencional quanto nos

testes com furação a pressão constante. Para que os resultados dos ensaios de usinabilidade no processo com aplicação de pressão constante, sejam confiáveis, é necessário avaliar a correspondência dos resultados com os ensaios de furação convencionais (ensaio de vida).

À partir desses ensaios, comparando o comportamento dos materiais em testes e o comportamento das brocas, tanto nos ensaios convencionais, quanto nos ensaios de furação a pressão constante, foi feita análise dos dois testes, convencionais e a pressão contante, e a avaliação se o teste de usinabilidade a pressão constante pode substituir o teste convencional.

1.1 Descrição do Problema

A avaliação de desempenho de ferramentas de corte se dá por meio de ensaios de vida, que permitem mensurar a durabilidade da ferramenta. Os resultados dessa avaliação são os ideais para a comparação de desempenho de ferramentas ou de materiais.

Um aspecto marcante do mercado de usinagem é a frequência com que surgem novidades no campo das ferramentas de corte e de materiais. Essa situação faz com que surja um grande número de opções para melhorar o desempenho de um processo, de modo que a investigação de todas as possibilidades por meio de ensaios de longa duração demande grande quantidade de tempo e de recursos financeiros.

O ensaio de curta duração apresenta-se como uma alternativa para reduzir ou até mesmo eliminar a necessidade de realização de ensaios de longa duração. Os procedimentos para a realização desse tipo de ensaio, porém, carecem de um estudo para determinação de sua aplicabilidade e da correspondência dos resultados obtidos com o desempenho em processo.

O estudo detalhado do ensaio de furação com aplicação de pressão constante conduzirá ao conhecimento das potencialidades desse ensaio. Uma vez conhecida a aplicabilidade, ele poderá ser usado como alternativa econômica para a obtenção de informações que possam melhorar o desempenho de processos de usinagem.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo investigar a influência geometria e revestimento da ferramenta e do material da peça nos resultados de ensaios de furação convencional e de furação com aplicação de pressão constante. Para isto foram selecionadas duas geometrias de brocas que foram empregadas na furação de 04 (quatro) tipos de aço,(ABNT 1020, 1045, 4140 4340). A comparação dos resultados dos ensaios de vida (furação convencional) com os resultados dos ensaios de furação com aplicação a pressão constante foi utilizada para avaliar a correspondência entre eles.

2.2 Objetivos específicos

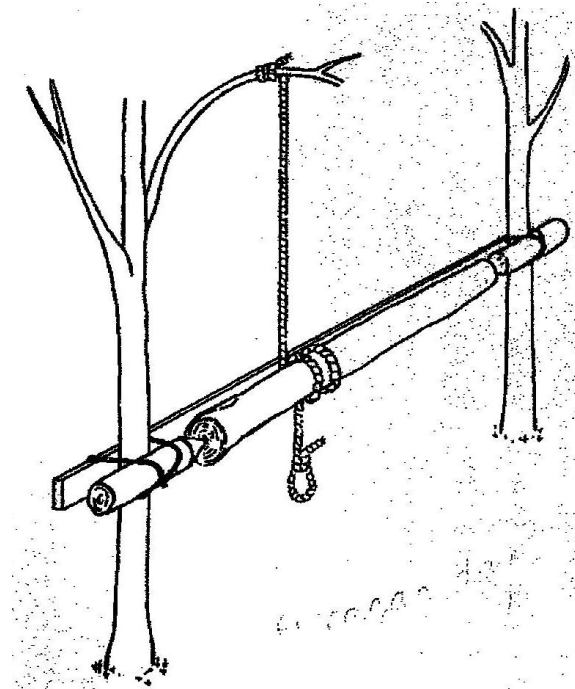
- a) Avaliar a influência da ferramenta e do material da peça nos resultados de ensaios de furação convencional e de furação a pressão constante;
- b) Estudar a aplicabilidade dos ensaios de furação a pressão constante no estudo do desempenho do processo de furação, por meio da análise da influência do material da peça e da geometria da broca;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Histórico

As ferramentas de corte têm um papel de destaque nas civilizações. De acordo com Macgeough, 1988 as ferramentas mais antigas datam de cerca de 2,5 milhões de anos atrás. Estes implementos foram usados principalmente para corte de vestimentas, utensílios de cozinha, abrigo e armas. Mais tarde, metais elementares como o bronze e o ferro foram empregados em uma série de avanços das ferramentas manuais em um período de quase um milhão de anos. No entanto, até o século XVII, as ferramentas continuaram a ser operadas manualmente ou mecanicamente acionadas por métodos muito elementares, tipificados pela simples árvore-torno na Figura 1. Por tais métodos vagões, navios e mobílias eram fabricados tão bem quanto os utensílios básicos necessários para o uso diário.

Figura 1 Árvore-torno.



Fonte: Adaptado de Perrigo (1916), citado Mcgeough (1988).

A descoberta de fontes de energia como a água, o vapor e, posteriormente, a eletricidade possibilitou a produção de máquinas ferramentas motorizadas as

quais rapidamente substituíram as operações manuais em diversas aplicações. Baseados nestas vantagens e junto com o desenvolvimento metalúrgico de aços liga, como materiais para ferramentas, uma nova indústria de máquinas ferramentas começou a surgir nos séculos XVIII e XIX. Conforme descrito por Mcgeough (1988), são apresentados os marcos importantes na evolução da tecnologia de usinagem.

A maior contribuição original para essa nova indústria foi de John Wilkinson, 1774. Ele construiu uma máquina de precisão para furos dos cilindros do motor, resolvendo assim um problema ocorrido com as primeiras máquinas ferramentas, as quais eram movidas a vapor. Inicialmente motores a vapor tinham seus cilindros furados por máquinas originalmente projetadas para furar canhões.

Henry Maudslay 1797 citado por Mcgeough 1988 conseguiu um maior avanço em usinagem em 1797, quando criou um torno mecânico para rosca. Esta máquina foi incorporada com um parafuso de avanço, para acionamento do carro; o uso do parafuso de avanço engrenado ao eixo do torno permitiu o avanço da ferramenta a uma taxa constante de velocidade de forma que a precisão da rosca fosse garantida na produção.

James Nasmyth 1862, citado por Mcgeough 1988, inventou a segunda máquina ferramenta, no período entre 1818 e 1862, a plaina, com uma ferramenta para desbastar. Com esta máquina um componente, ou peça de trabalho, era fixada à mesa e trabalhada por uma ferramenta que tinha movimento alternativo, permitindo que superfícies pequenas fossem desbastadas, e rasgos de chavetas fossem abertos. Modernas máquinas ferramentas baseadas neste princípio são atualmente usadas para usinar superfícies planas, canais, abas, rasgo em T e superfícies angulares com ferramentas em um único ponto. Nasmyth é lembrado também por inventar, em 1839, o martelo a vapor para forjamento de peças pesadas. Ele foi parceiro de Joseph Whitworth que introduziu maior variedade de novas ou avançadas máquinas ferramentas. Na Exposição Internacional em 1862 os produtos da companhia de Whitworth ocupava um quarto do espaço total destinado a máquinas ferramentas.

Outro grande avanço veio com a primeira fresadora, atribuída a Whitney, citado por Mcgeough 1988, por volta de 1818, que era usada na fabricação de armas de fogo. Por meio da aproximação de uma peça de trabalho contra uma ferramenta de corte giratória chamada de “fresa”, o metal podia ser cortado na forma desejada. Cortes como canais, rabos de andorinha e rasgos em T, podiam ser tão

bem feitos como as superfícies planas. A primeira fresadora universal, construída em 1862 por J. R. Brown, foi empregada para fresar canais helicoidais em brocas giratórias.

O quinto tipo de máquina ferramenta, surgiu no final do século XIX: a retífica. Uma roda de abrasivo rotativo (rebolo) ou correia é usada para remover pequenos cavacos das partes de metal as quais são colocadas em contato com ela. Uma forma avançada da retífica é o “lapping”, onde uma pasta abrasiva é colocada em um pano macio que é esfregado contra a superfície da peça trabalhada, para produzir acabamento de alta qualidade na superfície ou um acabamento com uma tolerância muito estreita.

Os desenvolvimentos mais notáveis destas máquinas ferramentas, surgiram no final do século XIX, e incluem o torno torre, desenvolvido em meados do século XIX para a produção automática de parafusos. Outro avanço significativo veio em 1896, quando F. W. Fellows construiu uma máquina que podia produzir quase toda espécie de engrenagens. Um exemplo da significância da realização antecipada na tecnologia de retífica veio do trabalho de C. N. Norton quando reduziu o tempo necessário para retificar o eixo-árvore de um carro, de cinco horas para quinze minutos. Tornos verticais de múltipla estação, “gang drills”, produção de moleiros e máquinas para propósitos especiais, por exemplo, para brochamento, afiar e furar, são outros notáveis exemplos de avanço na tecnologia das máquinas ferramentas.

No final do século XIX e início do século XX, as máquinas ferramentas se tornaram cada vez mais movidas por eletricidade ao invés de vapor. As máquinas ferramentas básicas tiveram vários aperfeiçoamentos. Por exemplo, foram introduzidos pontos múltiplos de corte nas mandrilhadoras, e máquinas ferramentas com operações automatizadas com controle por computador foram rapidamente desenvolvidas. Mesmo com estes avanços as práticas nas máquinas ferramentas convencionais ainda se baseiam no princípio segundo o qual as ferramentas devem ser feitas de material que seja mais duro do que o material da peça, em trabalho, a ser cortada.

Novos fenômenos físicos foram descobertos os quais não eram conhecidos durante o advento destas máquinas ferramentas. Em alguns casos os princípios subjacentes de alguns destes fenômenos, foram aplicados na criação de métodos inteiramente novos de máquinas, as quais não usam remoção convencional de metais para suas operações. Aplicações para estes novos métodos tinham então

que ser desenvolvidos. Em outros casos, estes recentes princípios físicos descobertos tinham que ser invocados a fim de superar novos problemas industriais, tais como aqueles associados com a usinagem de novos materiais e ligas as quais eram virtualmente intratáveis considerando as máquinas ferramentas já desenvolvidas. A este respeito Snoeys, Staelens e Dekeyser (1986), citado por Mcgeough 1988, chamam a atenção para a introdução de materiais mais duro, mais resistente e mais tenaz na fabricação, incluindo alta resistência, ligas resistentes ao calor, fibra reforçada, compósitos, cerâmica, ligas à base de cobalto e carbonos.

3.2 Classificação dos processos de usinagem

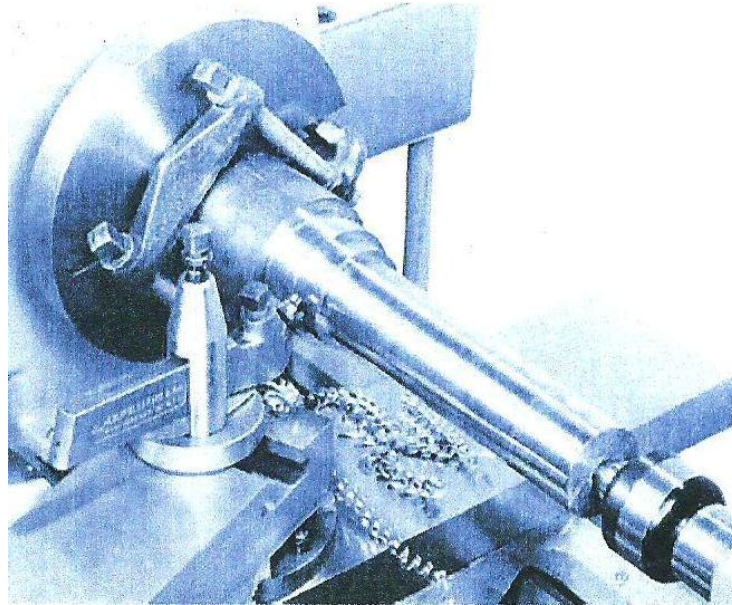
3.2.1 Processos tradicionais de usinagem

Estes processos são denominados processos de usinagem com ferramenta de geometria definida.

- a) torneamento;
- b) fresamento;
- c) furação;
- d) alargamento;
- e) rosqueamento;
- f) brochamento;
- g) serramento;
- h) mandrilhamento;
- i) aplainamento.

O torno e a furadeira são exemplos típicos de equipamentos usados na usinagem pelo processo tradicional. A operação de torneamento é mostrada na Figura 2. O metal em excesso é removido na forma de cavacos, por exemplo, no diâmetro externo de uma peça em usinagem. Na operação de furar, um furo é previamente esboçado, alargado ou acabado.

Figura 2 Operação de torneamento



Fonte: (Amorim, 2002).

Na Figura 3 é mostrado um modelo de Furadeira de Coluna.

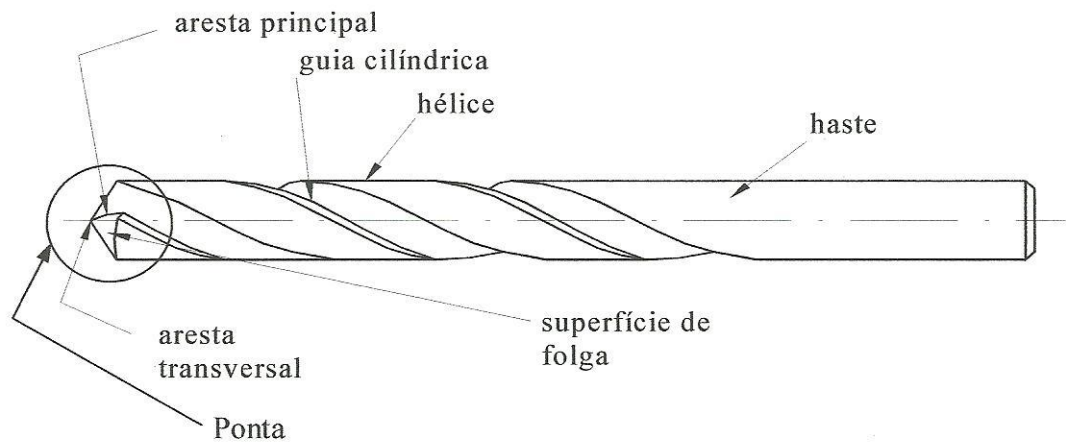
Figura 3 Furadeira de Coluna



Fonte: (Santos 2007).

Na Figura 4 é mostrado o desenho esquemático de uma broca helicoidal, ferramenta utilizada no processo de furação.

Figura 4 Vista do plano de trabalho de uma broca helicoidal (afiação cônica).



Fonte: (Santos, 2002).

Outro tipo de máquina ferramenta é a serra elétrica. Anteriormente, serra de banda e serra de disco circular eram usadas para cortar formas em chapas de metal, para fazer contornos externos e internos, e para cortes angulares.

As propriedades mecânicas dos materiais em processo muitas vezes são obstáculos às suas usinagens por métodos tradicionais. Neste caso são utilizados métodos alternativos de usinagem que não têm seu campo de aplicação limitado pela resistência mecânica dos materiais.

Além do problema de usinagem de materiais com dureza elevada, materiais modernos muitas vezes têm que ser cortados em uma forma complexa, em regiões inacessíveis pelos métodos convencionais. Processos não tradicionais de usinagem foram desenvolvidos para atingir tais finalidades e usinam facilmente formas complicadas sem encontrar dificuldades.

3.2.2 Processos não tradicionais de usinagem e usinagem por abrasão

Aplicados em situações em que a usinagem tradicional apresenta limitações devido a:

- a) dureza e resistência ao cisalhamento elevadas do material da peça;
- b) tolerâncias dimensionais e/ou geométricas muito baixas;
- c) textura superficial com rugosidade pequena.

3.2.2.1 Processos não tradicionais de usinagem

- a) jato d'água;
- b) jato d'água abrasivo;
- c) eletroerosão;
- d) eletroquímica;
- e) ultra-som;
- f) plasma;
- g) química;
- h) feixe de elétrons.

3.2.2.2 Usinagem por abrasão

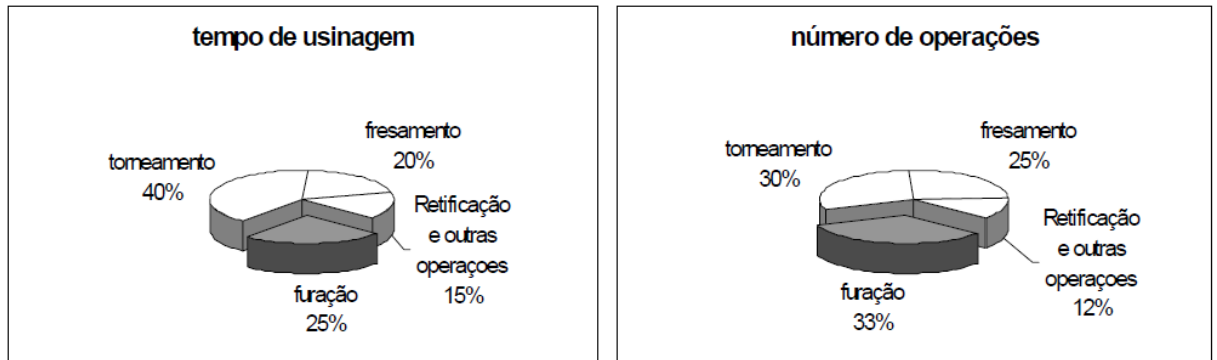
- a) retificação;
- b) brunimento;
- c) lapidação.

3.3 Processo de Furação

Furação é um processo mecânico de usinagem para obtenção de furos, na maioria das vezes cilíndricos, através do movimento relativo de rotação entre peça e ferramenta. Para o processo de furação, a ferramenta ou a peça gira e simultaneamente a ferramenta ou a peça se desloca segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela com o eixo principal de rotação da máquina. A continuidade da retirada de material é garantida pelo movimento relativo de avanço entre a peça e a ferramenta, que ocorre segundo uma trajetória coincidente com o eixo longitudinal da ferramenta.

Tanto quanto o torneamento, a furação é uma das mais importantes operações de usinagem do metal, compreendendo aproximadamente 30% (furos sólidos 22%) de todas as operações de usinagem de metal. Junto com processos similares como alargamento e trepanação é muitas vezes a operação de furação que determina o tempo de ciclo mais curto possível em uma linha de produção automatizada. Como é mostrado na Figura 5. A furação encontra-se em primeiro lugar em número de operações. (TONSHOFF, 1994)

Figura 5 A furação entre outros processos de usinagem



Fonte: (TÖNSHOFF, 1994)

Torneamento e fresamento são operações que em comparação com a furação, podem ser vistas como simples em termos de cinemática e dinâmica dos processos, controle de processos, remoção de cavaco e dissipação de calor no corte. Além disso, a furação tem que ser processada sob condições desfavoráveis, tais como: o processo de geração de cavaco é oculto e invisível. O espaço para a remoção do cavaco na superfície de saída é limitado. O atrito entre a broca, cavaco e material processado é alto; o fluxo de calor gerado da superfície não é baixo e por último, porém não menos importante, a velocidade de corte é variável ao longo da aresta de corte, a qual é zero no eixo de revolução.

3.3.1 Aspectos Gerais

3.3.1.1 Aplicabilidade do Processo

Segundo o Handbook Committee (1989), os fatores que definem o campo de aplicação do processo de furação são:

a) Material da Peça

O processo de furação pode ser aplicado em materiais com dureza até 60 HR_C. Essa faixa de dureza engloba a grande maioria dos materiais de construção mecânica, inclusive alguns aços para ferramenta. Os aços especiais, como os aços-rápidos, alguns aços ferramenta para trabalho a frio e a quente e para moldes de injeção de plásticos, possuem dureza superior à indicada para a

furação, o que obriga a adoção de outras técnicas para obtenção de furos nesses materiais.

b) Diâmetro do Furo

Uma característica essencial da furação é a variação na velocidade de corte ao longo da aresta principal da broca. A velocidade é máxima na periferia, e se aproxima de zero perto do eixo central da broca, onde a aresta principal se aproxima da aresta transversal.

As variações na velocidade e ângulo de saída ao longo da borda são responsáveis por muitos aspectos da perfuração, que são peculiares a esta operação. Brocas são ferramentas delgadas e altamente tensionadas, as guias cilíndricas têm de ser cuidadosamente projetadas para permitir o fluxo de cavacos, mantendo a resistência adequada. Os ângulos da hélice e outras características são adaptados para a furação de classes específicas de material (TRENT, 2000).

c) Relação Comprimento / Diâmetro do Furo

Este fator depende do método utilizado e do desvio de linearidade requerido. Os métodos mais simplificados permitem que o comprimento do furo seja até 3 vezes maior que o seu diâmetro. A utilização de ferramentas, técnicas e equipamentos especiais permitem a elevação desta relação para 8. Sistemas especiais de furação, como a utilização de brocas canhão, sistemas “ejector drilling” e o sistema BTA (“boring and trepaning association”), permitem a execução de furos com relação comprimento/diâmetro superior a 100 em uma faixa de diâmetros de 6 a 750 mm (LIN *et al.*, 1995).

3.3.1.2 Variantes do Processo

De acordo com a norma NBR 6175 (1971), o processo de furação apresenta as variantes ilustradas na Figura 6.

a) Furação em cheio

Processo destinado à obtenção de um furo cilíndrico em uma peça, onde todo o material contido no volume do furo é retirado na forma de cavaco.

b) Escareamento ou furação com pré-furação

Processo que tem por objetivo a obtenção de um furo cilíndrico em uma peça previamente furada.

c) Furação escalonada

Processo que tem por objetivo a geração de furos com dois ou mais diâmetros distintos.

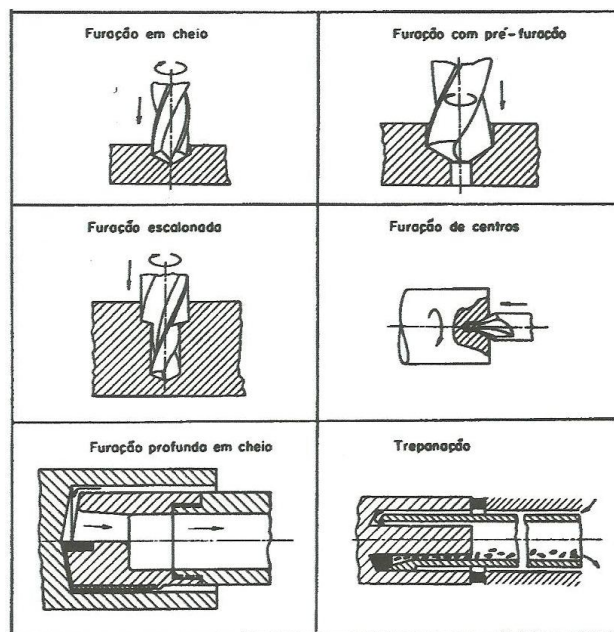
d) Furação de Centros

Processo que visa a obtenção de furos de centros, que têm por objetivo facilitar a fixação da peça para operações posteriores.

e) Trepanação

Processo de furação onde apenas uma parte do material contido no volume do furo, localizado próximo à circunferência que delimita o furo, é removido. Um núcleo permanece maciço após a operação.

Figura 6 Variantes do processo de furação

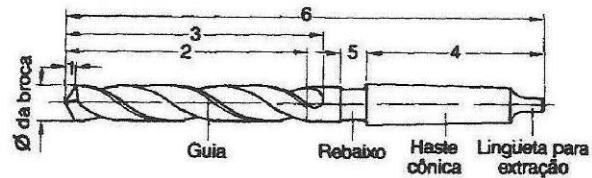
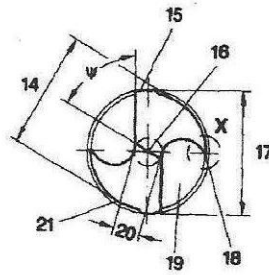
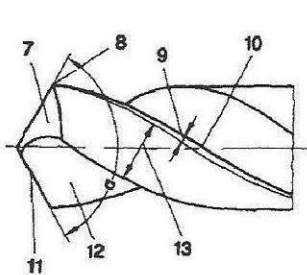


Fonte: NBR 6175: 1971

3.3.2 A Ferramenta de Corte

A broca helicoidal, ferramenta empregada no processo de furação, foi desenvolvida na década de 1820 pela “Moses Twist Drill and Machine Company”. A primeira forma geométrica de brocas é apresentada na Figura 7. O tipo de afiação original, conhecido como afiação cônica, é até hoje utilizado em operações simples.

Figura 7 Partes de uma broca helicoidal

Broca helicoidal com haste cilíndrica**Broca helicoidal com haste cônica****Parte de corte****Detalhe X**

Rebarbada



Chanfrada



Arredondada

- | | | |
|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 Comprimento da ponta | 10 Aresta secundária | 19 Canal |
| 2 Comprimento utilizado | 11 Aresta principal de corte | 20 Espessura do núcleo |
| 3 Comprimento do canal | 12 Superfície de saída | 21 Superfície secundária de folga |
| 4 Comprimento da haste | 13 Largura da sup secund de folga | |
| 5 Comprimento do rebaixo | 14 Diâmetro da sup secund de folga | σ Ângulo da ponta |
| 6 Comprimento total | 15 Guia | |
| 7 Superfície principal de folga | 16 Aresta transversal | ψ Ângulo da aresta transversal |
| 8 Ponta de corte | 17 Diâmetro da broca | |
| 9 Largura da guia | 18 Quina | |

Fonte: Norma ABNT NBR 6163:1990

O estudo da geometria da broca helicoidal pode ser realizado com a divisão da ferramenta em três partes, de acordo com o caráter funcional de cada uma delas:

- parte de corte (ponta da broca);
- guia (hélice);
- haste.

A ponta da broca tem a função de realizar o corte do material e é formada pelas arestas principais de corte, pela aresta transversal e pelas superfícies de folga e de saída. As arestas principais de corte agem diretamente no corte do material formando o cavaco, que se movimenta pela superfície de saída e deixa o furo através dos canais da hélice. A aresta transversal, na afiação cônica, possui a forma de linha reta, perpendicular ao eixo longitudinal da broca, geometria que dificulta o corte pelo fato de que, nessa região, o ângulo de saída é negativo e as velocidades são baixas. A formação da aresta transversal é inevitável na afiação cônica (Santos, 2002).

A hélice tem a função de guiar os cavacos no interior dos furos, por meio dos canais e guiar a ferramenta ao longo do furo por meio de guias cilíndricas, que também são responsáveis pelo acabamento superficial das paredes dos furos. O ângulo formado pelo eixo da broca e uma reta tangente à hélice é denominado ângulo de hélice. A medida do ângulo de hélice tem influência na capacidade de penetração da ferramenta e no espaço para comportar os cavacos. Valores pequenos de ângulo de hélice facilitam a penetração da broca em materiais como o latão, plásticos e outros materiais macios. A redução do ângulo de hélice torna a broca mais resistente à torção, além de facilitar a quebra do cavaco. O aumento do ângulo de hélice facilita a remoção dos cavacos, o que contribui para o bom desempenho das ferramentas na execução de furos profundos. (Santos, 2002).

A haste tem por função fixar a broca ao porta-ferramenta. A geometria da haste pode ser cônica, no caso de brocas de grandes diâmetros, com o objetivo de reduzir o batimento radial. As hastes cilíndricas são normalmente utilizadas em brocas com diâmetro inferior a 20 mm. As hastes cilíndricas podem apresentar rebaixos para fixação por parafusos, ou sem rebaixos para fixação por meio de pinças ou mandril hidráulico (Santos, 2002).

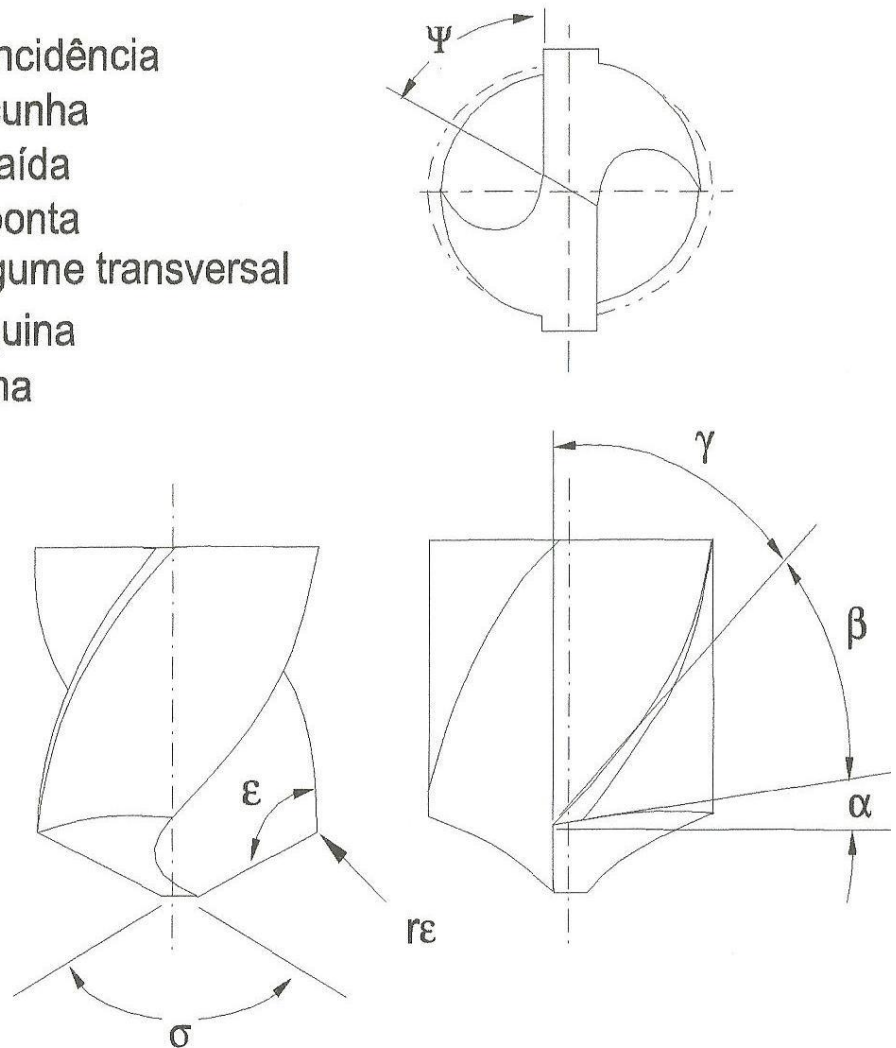
A geometria da broca exerce influência direta em seu desempenho. Os canais, por exemplo, devem ser largos o suficiente para garantir a remoção dos cavacos. Por outro lado, o aumento excessivo do tamanho dos canais reduz a resistência do corpo da broca, o que pode resultar em deformações e vibrações não toleráveis. Deve-se buscar, portanto, o ajuste correto do ângulo de ponta σ , do raio da quina r_ϵ , do ângulo de saída γ , do ângulo de saída do gume transversal ψ . Em um determinado ponto da aresta de corte, o ângulo de saída são grandezas

interdependentes, no ponto de vista geométrico. Na Figura 8 é mostrada a geometria das brocas helicoidais.

A assimetria da ferramenta afeta as dimensões do furo e a vida da ferramenta.

Figura 8 Geometria das brocas helicoidais

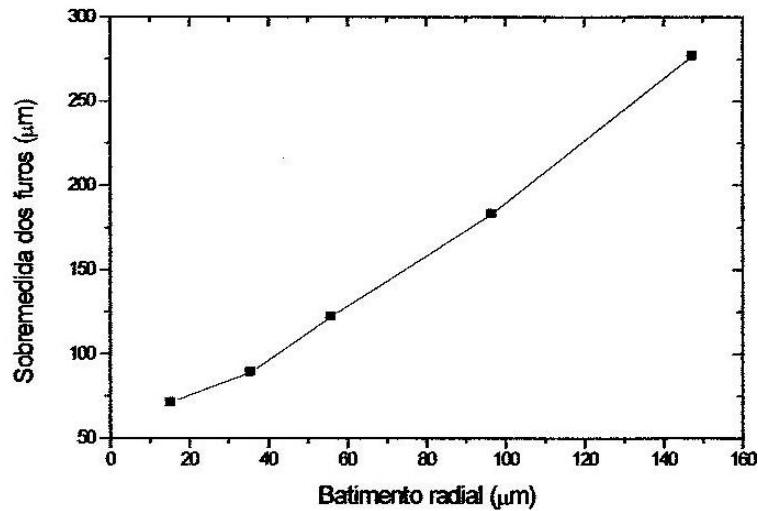
- α = ângulo de incidência
- β = ângulo de cunha
- γ = ângulo de saída
- σ = ângulo de ponta
- Ψ = ângulo do gume transversal
- ε = ângulo de quina
- $r\varepsilon$ = raio de quina



Fonte: Stoeterau, 2013

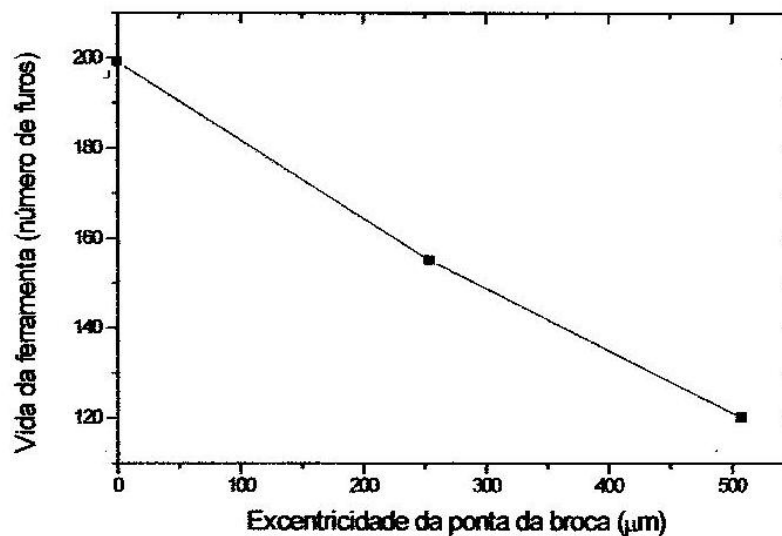
Nas Figuras 9 e 10 é mostrada a influência do controle dimensional da broca na qualidade dimensional dos furos gerados e na vida da ferramenta, respectivamente. Os resultados apresentados são indicativos de que o controle dimensional da ferramenta é de fundamental importância para a garantia de um bom desempenho do processo.

Figura 9 Influência do batimento radial sobre a sobremedida de furos



Fonte: Santos, 2002

Figura 10 Influência da excentricidade da ponta da broca na vida da ferramenta

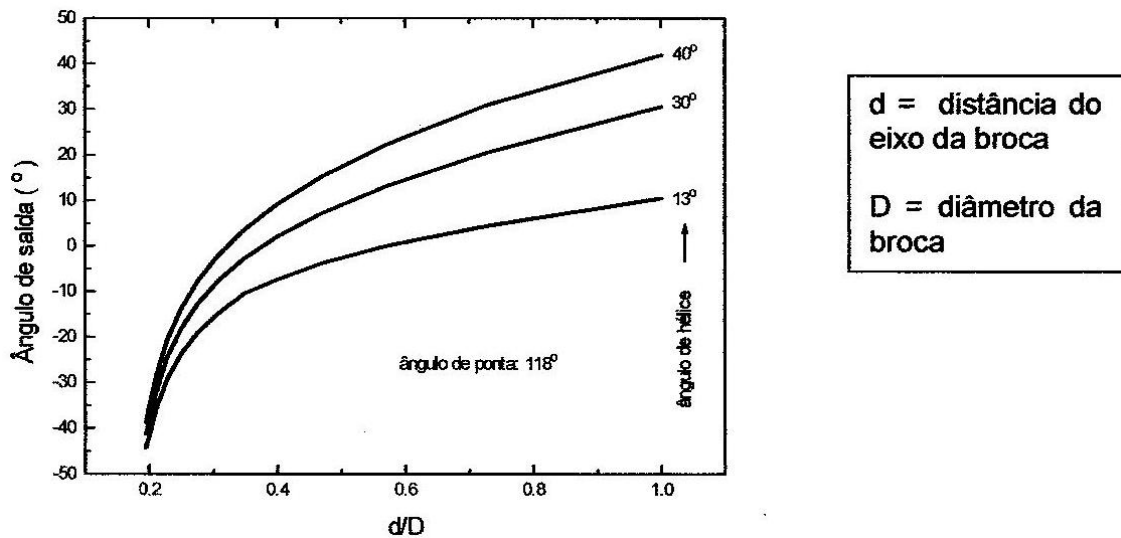


Fonte: Santos, 2002

A ponta cônica da broca apresenta como principais vantagens a facilidade de execução e o seu bom comportamento na furação da maioria dos materiais utilizados. O principal aspecto negativo apresentado pela afiação cônica é o fato de o ângulo de saída apresentar valores negativos principalmente nas regiões mais próximas do eixo da broca. Na Figura 11 observa-se a variação do ângulo de saída ao longo da aresta de corte.

A análise das curvas apresentadas na Figura 11 mostra que os valores do ângulo de saída tornam-se mais negativos na medida em que se aproxima do centro da broca, justamente na região onde as velocidades de corte são menores. A associação destes dois fatores dificulta o corte na região da aresta de corte próxima ao centro da ferramenta (FERRARESI, 1976).

Figura 11 Variação do ângulo de saída ao longo da aresta de corte



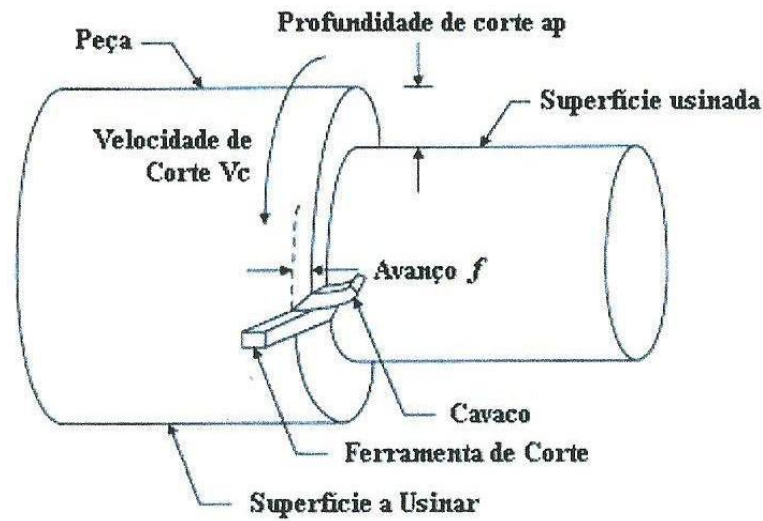
Fonte: FERRARESI, 1976

3.4 Formação do Cavaco e interface cavaco-ferramenta

3.4.1 O corte ortogonal

Antes de iniciar o estudo da formação do cavaco, é necessário definir o corte ortogonal. Ele permite simplificações na análise dos fenômenos relacionados ao contato cavaco-ferramenta, como a formação do cavaco, interface cavaco-ferramenta, formas e tensões de usinagem.

Figura 12 Exemplo de corte tridimensional

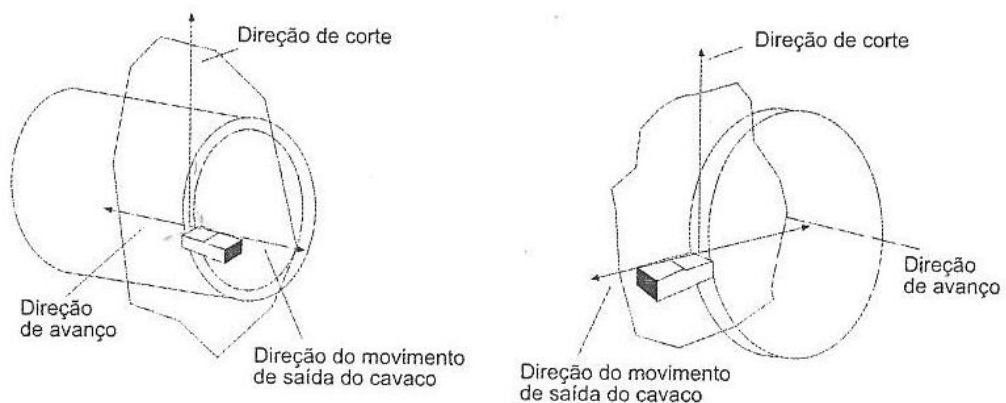


Fonte: Amorim, 2002

A Figura 12 indica as direções de corte, de avanço e do movimento de saída do cavaco para o torneamento cilíndrico. Essas três direções não estão contidas no mesmo plano, este tipo de corte é denominado tridimensional. O corte ortogonal executa uma simplificação do corte, onde as direções dos movimentos de corte, avanço e de saída do cavaco fazem parte de um mesmo plano. Exemplos de corte ortogonal são mostrados na Figura 13.

Os desenhos expostos da Figura 13 permitem visualizar que as direções de corte, de avanço e de movimento de saída dos cavacos pertencem ao mesmo plano.

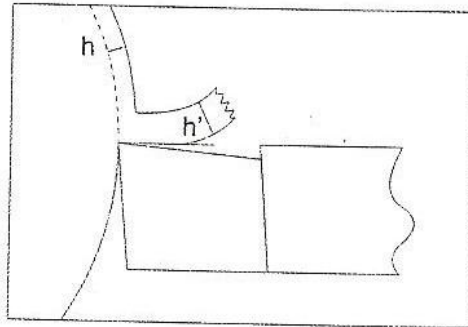
Figura 13 Exemplo de corte ortogonal.



Fonte: SANTOS, 2007

Na Figura 14 é mostrada uma vista do plano de trabalho de uma ferramenta no corte ortogonal.

Figura 14 Vista do plano de trabalho durante o corte ortogonal



Fonte: SANTOS, 2007

De acordo com Santos, 2007, além das considerações relacionadas acima, outras devem ser atendidas para que o corte seja ortogonal:

- a) a aresta de corte deve ser reta e perpendicular à direção de corte;
- b) a aresta de corte precisa ser maior que a largura de corte b ;
- c) a espessura de corte h , que é igual ao avanço, tem que ser pequena em relação à largura de corte b ;
- d) a largura do corte b e a espessura do cavaco b' necessitam ser idênticas;
- e) o cavaco formado deve ser contínuo, sem criar APC (aresta postiça de corte).

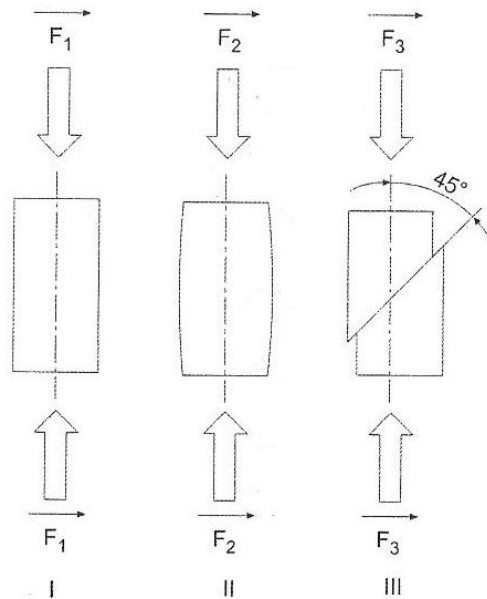
As simplificações obtidas através do corte ortogonal facilitam a visualização dos fenômenos que ocorrem durante o corte.

3.4.2 A Formação do Cavaco

O desenho do ensaio de compressão é apresentado na Figura 3.14. O corpo-de-prova é submetido a esforços de compressão crescentes ($F_1 > F_2 > F_3$) e, inicialmente, sofre deformações elásticas (I). O aumento dos esforços prossegue até atingir o limite de resistência ao cisalhamento do material e, a partir daí, sofre deformações plásticas (II). No instante em que o limite de resistência do material é

atingido, o corpo-de-prova rompe por cisalhamento. De acordo com o diagrama de distribuição de tensões de cisalhamento, a máxima tensão ocorre em um plano a 45° , região onde o material sofre cisalhamento (III), caso seja isotrópico e não apresente defeitos (SANTOS, 2007).

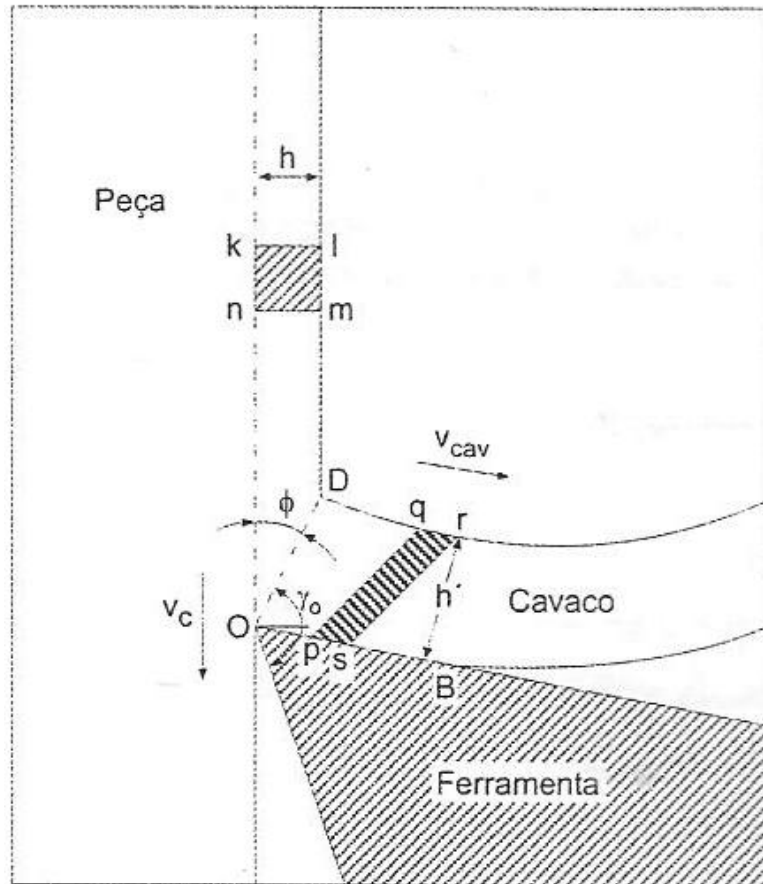
Figura 15 Ensaio de compressão



Fonte: (SANTOS, 2007).

Para o estudo da formação do cavaco, o volume 'KLMN' (Figura 15), pode ser considerado um corpo-de-prova sujeito a um ensaio de compressão. As tensões nas quais o material é submetido crescem à medida que o volume de referência se aproxima da cunha de corte. Assim, o material é submetido a deformações elásticas e plásticas, até sofrer ruptura por cisalhamento no ponto "O", localizado na ponta da ferramenta. A região cisalhada é denominada zona de cisalhamento primária. Para efeito de simplificação, é representada por um plano perpendicular ao de trabalho, denominado plano de cisalhamento primário, indicado pelo segmento "OD".

Figura 16 Processo de formação do cavaco



Fonte: TRENT, 1991, citado por SANTOS, 2007.

Após passar pela zona de cisalhamento primária, o volume de referência é deformado e assume a configuração representada por "pqrs" no esquema da Figura 16. Dá-se início a quarta etapa, a formação do cavaco, que é o movimento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta.

De modo resumido, a formação do cavaco consiste em quatro etapas:

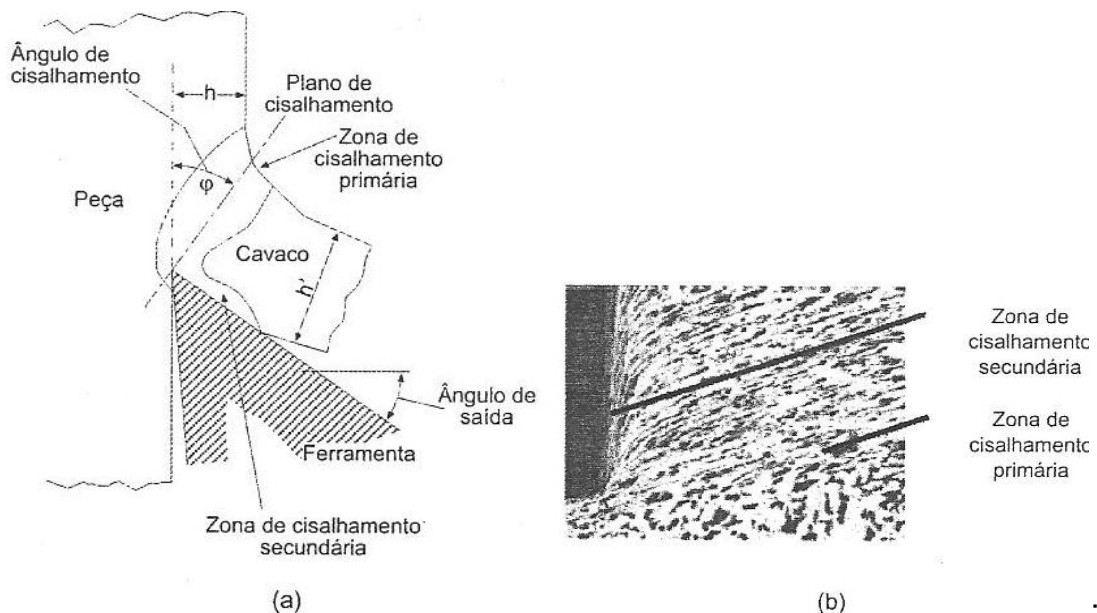
- deformação elástica ou recalque;
- deformação plástica;
- ruptura;
- movimento do cavaco sobre a superfície da ferramenta.

Na última etapa o ciclo distingue a formação do cavaco do processo de ruptura em ensaios de compressão. Ao entrar em contato com a ferramenta, o material é submetido a esforços de compressão e de cisalhamento, na direção

paralela à superfície de saída da ferramenta, o que dá origem à zona de cisalhamento secundária (Figura 16). O material exerce esforços de compressão sobre a zona de cisalhamento primária, fazendo com que a região de máxima tensão de cisalhamento ocorra em uma posição não mais a 45° , como nos ensaios de compressão. A posição é indicada pelo chamado ângulo de cisalhamento (ϕ), como indicado nas Figuras 16 e 17.

A medida do ângulo de cisalhamento é sempre inferior a 45° . E quanto maior for a resistência ao cisalhamento na zona de cisalhamento secundária, menor será essa medida (Santos,2007). Os fenômenos que ocorrem na interface da ferramenta e os seus efeitos sobre o ângulo de cisalhamento são detalhados a seguir.

Figura 17 Zonas de cisalhamento primárias e secundárias



Fonte: a) Trent 1991, e b) Chern 2005, citado por Santos, 2007.

3.4.3 Interface cavaco-ferramenta

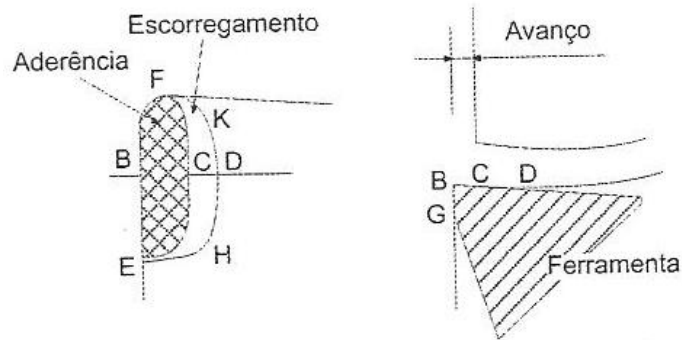
O estudo da interface cavaco-ferramenta é justificado não somente pela influência direta na formação do cavaco, mas também pela relação com as temperaturas, forças de usinagem e vida das ferramentas.

Os fenômenos que ocorrem não são totalmente esclarecidos. A teoria mais aceita foi proposta por Trent (1963) citado por (SANTOS, 2007), que assume a

existência das zonas de aderência e de escorregamento na interface cavaco-ferramenta.

A Figura 18 indica a localização dessas zonas. A região hachurada corresponde à zona de aderência, seguida pela área delimitada com linha tracejada. Mesmo não provando a existência da zona de aderência, existem fortes evidências de que ela ocorra. Ao analisar a raiz do cavaco, após o corte ter sido interrompido abruptamente em um dispositivo denominado *quick stop*, Trent (1991, citado por SANTOS, 2007) encontrou indícios de sua existência.

Figura 18 Zonas de aderência e escorregamento

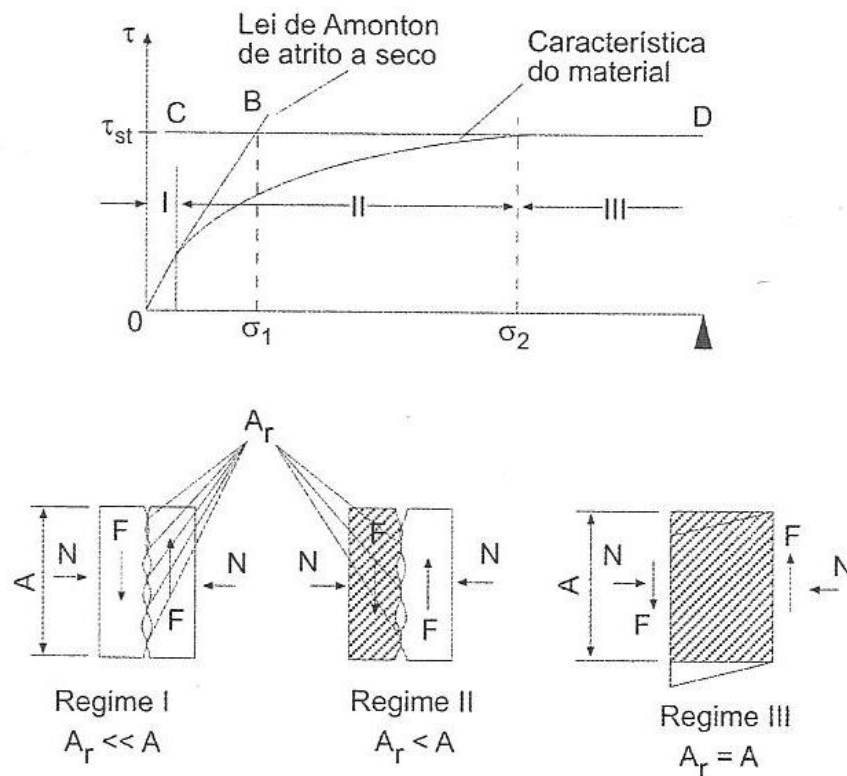


Fonte: (TRENT, 1991 citado por SANTOS, 2007).

Outra prova está relacionada ao atrito na usinagem. São identificados três regimes de atrito entre sólidos, dependendo da área de contato efetiva entre as superfícies.

Shaw *et al.* (1960) citado por Santos, 2007 apresentaram os três regimes de atrito sólido através do diagrama da Figura 18.

Figura 19 Três regimes de atrito sólido



Fonte: Shaw, 1960 citado por Santos, 2007

O regime I ocorre quando a área de contato efetiva entre os sólidos é muito menor que a aparente ($A_r \ll A$), pois ocorre apenas nas irregularidades das superfícies. É válida a lei de atrito de Coulomb ($\mu = \sigma/\tau = \text{constante}$), onde σ e τ são as tensões normais e cisalhantes presentes no contato. No regime III não existe superfície livre. A área de contato real equivale à aparente ($A_r = A$). O regime II é a transição entre I e III, onde o coeficiente de atrito diminui com o aumento da carga.

Wallace e Boothroyd (1964) citado por Santos, 2007 contestam a existência do regime II e afirmam que ocorre a transição brusca do I para III.

De acordo com o modelo de atrito, quando há contato total entre as superfícies, a tensão cisalhante é constante e corresponde à do material de menor resistência. O modelo de distribuição de tensões proposto por Zorev (1963) citado por Santos (2007), Figura 20, indica que a tensão é constante nas proximidades da ponta da ferramenta e decresce até chegar a zero. A tensão normal é máxima na ponta da ferramenta e também decresce até zero. As elevadas tensões de compressão e o fato da tensão de cisalhamento não variar com a tensão normal,

indica que nas proximidades da ponta da ferramenta ocorre o contato total entre a raiz do cavaco e a superfície de saída da ferramenta.

Figura 20 Modelo de distribuição de tensões em usinagem



Fonte: Proposto por Zorev, 1963, citado por Santos 2007.

Onde:

τ_{st} = tensão cisalhante na região de aderência;

l_{st} = comprimento da região de aderência;

l_f = comprimento total das regiões de aderência e de escorregamento.

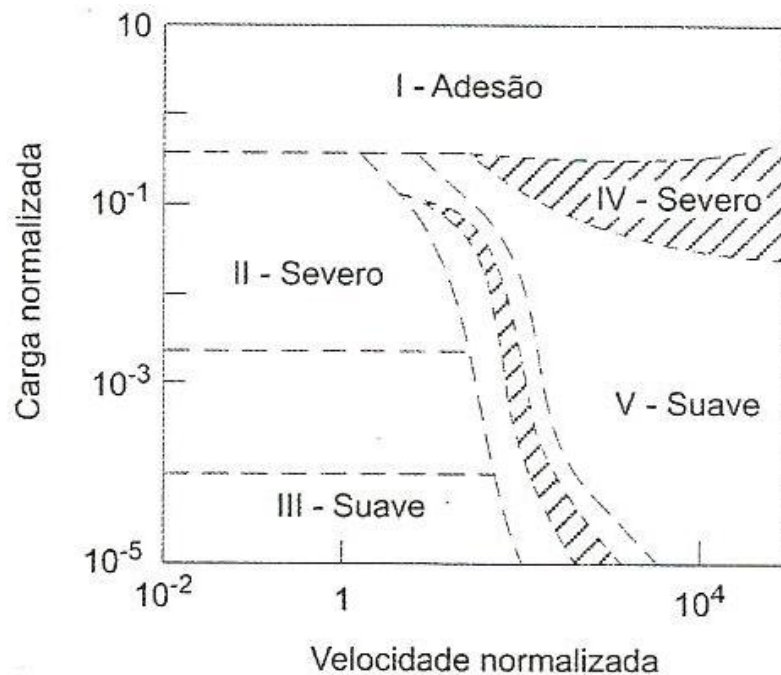
Na região de aderência, $A_r = A$ prevalece o regime III. Na de escorregamento $A_r \ll A$ vale o regime I. Dessa forma, a força total, tangente à superfície da ferramenta, é a soma das forças tangenciais que atuam em cada uma das regiões.

Em determinadas condições especiais, a zona de aderência pode ser suprimida, prevalecendo apenas as de escorregamento.

Devido às diferentes condições na interface cavaco-ferramenta, existe a necessidade de um estudo criterioso de cada uma.

A presença da zona de aderência é ainda evidenciada através da análise da Figura 21, Hutchings, 1995 citado por Santos, 2007. Mostra-se no diagrama de regimes de desgaste, definidos pela velocidade e pela carga normalizada, que a velocidade normalizada é a razão entre as velocidades de deslizamento da condução do calor. A carga normalizada é definida pela divisão do valor da carga normal aplicada pela área de contato e pela menor dureza entre os materiais.

Figura 21 Mapa de regimes de desgaste obtidos no ensaio pino sobre disco em corpos-de-prova de aço



Fonte: Hutchings, 1995 citado por Santos, 2007

Onde:

$$\text{Velocidade normalizada} = v_d / v_{tc} \quad (3.1)$$

v_d = velocidade de deslizamento;

v_{tc} = velocidade de transferência de calor.

$$\text{Carga normalizada} = F_N / A \cdot HV \quad (3.2)$$

F_N = carga normalizada;

A = área de contato;

HV = Dureza Vickers.

O diagrama foi obtido por meio de ensaios de desgaste pino sobre disco. Definiram-se regiões de desgaste severo, suave, transição entre os dois regimes e uma região onde ocorre a adesão, determinada predominantemente pelo valor da carga normalizada.

Segundo o diagrama de regime de desgaste (Figura 21), a velocidade normalizada não apresenta influência significativa no regime I (adesão). Pode-se afirmar que o valor da carga normalizada é a variável determinante para valores dessa grandeza entre 10^{-1} e 10^0 .

Os resultados de ensaios de medição da força de corte na usinagem do aço ABNT 4340, com dois valores de dureza, são apresentados na Tabela 1.

Os valores de carga normalizada em forma de gráfico são mostrados na Figura 22. O limite entre os regimes de desgaste severo e por adesão é representado pela linha tracejada no gráfico. Note-se, que na usinagem do material com maior dureza (ensaio 1 a 7), os valores de carga normalizada mantiveram-se abaixo de 1. Já nos testes realizados com o de menor dureza (ensaios 8 a 14), os valores tenderam a variar em torno de 1. Em todas as situações, a localização dos pontos indica condições de adesão, o que é uma evidência a mais da existência da zona de aderência.

Com base nos resultados descritos na Tabela 1 e na Figura 22, constatou-se que a força normalizada adquire valores maiores na usinagem do material mais macio. Comparando os ensaios realizados nas mesmas condições de corte os valores de carga normalizada obtidos com esse material foram sempre maiores, resultados que podem ser explicados pelas forças de corte não apresentarem diferenças significativas, e a dureza estar no denominador da expressão para o cálculo da carga normalizada.

Tabela 1 Força de corte e carga normalizada para o torneamento do aço ABNT 4340 com diferentes durezas

Ensaio	v_c (m/min)	f (mm/rev.)	a_p (mm)	F_c (N)	A (mm ²)	HV	F_N
1	240	0,20	1,0	522,83	0,2	345	$7,72 \cdot 10^{-1}$
2	160	0,20	1,0	559,62	0,2		$8,28 \cdot 10^{-1}$
3	200	0,16	1,0	394,03	0,16		$7,28 \cdot 10^{-1}$
4	200	0,20	1,0	462,03	0,2		$6,83 \cdot 10^{-1}$
5	200	0,24	1,0	535,54	0,24		$6,59 \cdot 10^{-1}$
6	200	0,20	1,2	597,18	0,24		$7,35 \cdot 10^{-1}$
7	200	0,20	0,8	379,71	0,16		$7,01 \cdot 10^{-1}$
8	200	0,20	1,0	539,25	0,2	250	$1,10 \cdot 10^0$
9	240	0,20	1,0	484,61	0,2		$9,88 \cdot 10^{-1}$
10	160	0,20	1,0	511,19	0,2		$1,04 \cdot 10^0$
11	200	0,24	1,0	569,63	0,24		$9,68 \cdot 10^{-1}$
12	200	0,16	1,0	450,38	0,16		$1,15 \cdot 10^0$
13	200	0,20	0,8	362,28	0,24		$9,76 \cdot 10^{-1}$
14	200	0,20	0,8	362,28	0,16		$9,23 \cdot 10^{-1}$

Fonte: Santos, 2007

Onde:

V_c = velocidade de corte;

f = avanço;

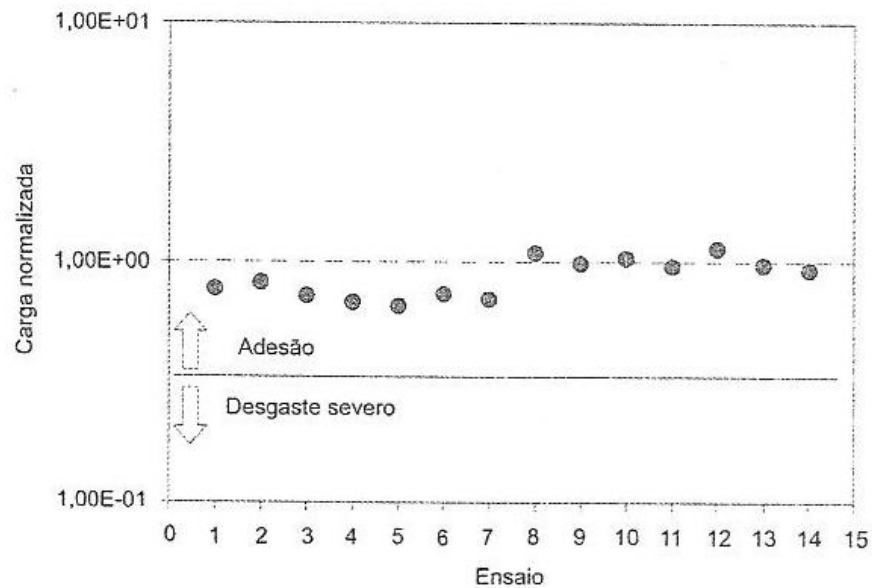
a_p = profundidade ou largura da usinagem

F_c = carga;

A = área de contato;

F_N = carga normalizada.

Figura 22 Valores de força normalizada no diagrama de regimes de desgaste



Fonte: Santos, 2007.

3.5 Desgaste e vida da ferramenta de corte

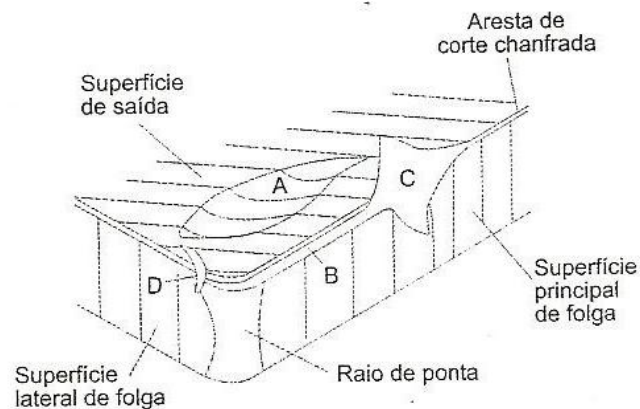
3.5.1 Desgaste nas ferramentas de corte

No processo de usinagem, a ação de cortar muda a forma e, portanto, a geometria original da ferramenta de corte. Verifica-se um desgaste progressivo nas superfícies de folga e de saída da ferramenta.

De acordo com Santos (2007), durante a usinagem, ocorre o contato físico da ferramenta com a peça e do cavaco com a ferramenta, em um determinado meio e condições dinâmicas de corte. Isso, conseqüentemente, acarreta mudanças na geometria e na forma original da aresta da ferramenta, em virtude da ocorrência de desgaste progressivo.

Na Figura 23, são mostradas as principais áreas de desgaste e as três diferentes formas: flanco, cratera e entalhe. Na seqüência, são apresentados os mecanismos associados a cada uma dessas formas.

Figura 23 Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte



Fonte: Dearnley, Trent E Wrigh,1982, citado por Santos, 2007

Baseado em Gonçalves (2011), pode-se afirmar que:

a) A perda da capacidade de corte é causada por desgaste ou por ocorrência de algum tipo de avaria. A avaria é resultado de condição severa a que é submetida a ferramenta de corte, como condições de corte acima das recomendáveis, vibração ou choque mecânico. O desgaste, por sua vez, é resultado da remoção gradual de material da ferramenta, em um processo que é influenciado pelo material da peça de trabalho, tipo de operação, rigidez da máquina, rigidez na interface peça-ferramenta, velocidade de corte e velocidade de avanço.

b) Quando o desgaste da ferramenta prevalece em relação às avarias, podem-se estabelecer critérios (valores limites), acima dos quais a rugosidade da peça não é mais satisfatória, as tolerâncias dimensionais da peça não podem ser mantidas, ou os esforços de corte aumentam de forma a promover valores críticos de potência e danos no corpo da ferramenta dado ao aumento de temperatura de corte.

c) Em operações de desbaste, os valores limites dos desgastes são maiores, determinados por fatores tais como: quebra da aresta cortante, aumento da força de usinagem, vibrações do conjunto máquina-ferramenta-peça ou ainda sobrecarga do sistema de acionamento.

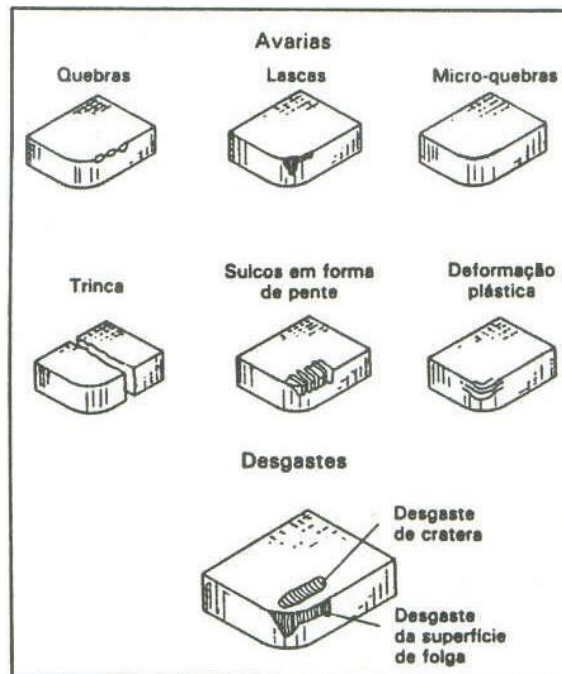
Da forma exposta, atribui-se à perda da capacidade de corte da ferramenta dois tipos de danificação: os desgastes e as avarias, conforme é mostrado na Figura

24. Os desgastes são danificações de maior ocorrência, podendo ser classificados como:

- a) desgaste de cratera na superfície de saída, devido ao atrito entre o cavaco e a ferramenta;
- b) desgaste na superfície de folga, devido ao atrito entre a peça e a ferramenta.

De acordo com a norma ISO-3685:1993, o desgaste de cratera é denominado KT e o desgaste na superfície de folga VB.

Figura 24 Avarias e desgastes de uma ferramenta



Fonte: Gonçalves, 2011

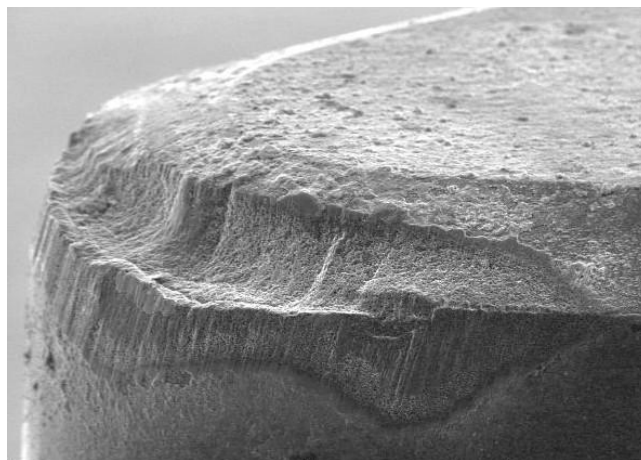
De acordo com Marcondes (1990), a craterização excessiva provoca o enfraquecimento da aresta. A aresta de corte pode se romper e provocar um mau acabamento, além de aumento do consumo de potência. Como causas pode-se citar a abrasão resultante do atrito do cavaco na superfície de saída da pastilha e a difusão atômica gerada por elevadas temperaturas nesta mesma região. A máxima profundidade de cratera está próxima ao ponto médio do comprimento de contato entre o cavaco e a superfície de saída, onde a temperatura atinge seu maior valor. A posição varia de acordo com o material usinado, ocorrendo, normalmente, próximo da aresta de corte.

Desgaste por aresta postiça. Segundo Marcondes (1990), são pequenas fraturas de aresta que provocam o mau acabamento da superfície e um desgaste de flanco excessivo. Sob certas circunstâncias e condições de operação, um grande entalhe é formado na APC (aresta postiça de corte), na extremidade livre do cavaco, levando ao enfraquecimento da aresta.

Desgaste de flanco, de acordo com Marcondes (1990), é o desgaste natural da ferramenta e pode provocar lascamento da aresta e abreviar a vida do fio de corte. Geralmente é o principal fator a limitar a vida das ferramentas de corte. Decorre da perda do ângulo de folga da ferramenta, ocasionando um aumento da área de contato entre a superfície de folga e o material da peça, tornando maior o atrito naquela região. Todo processo de usinagem causa desgaste de flanco, provocando a deteriorização do acabamento superficial e a perda das características dimensionais da peça. Este desgaste é incentivado pelo aumento da velocidade de corte. Um rápido desgaste frontal pode ser evitado reduzindo-se a velocidade de corte sem modificar o avanço ou utilizando-se uma ferramenta revestida, com maior resistência ao desgaste.

Antes que um desses desgastes ganhe grandes proporções, colocando o processo de corte em risco, a ferramenta deverá ser reafiada ou substituída. A Figura 25 permite identificar o desgaste de cratera nas ferramentas de corte (STOETERAU, 2007).

Figura 25 Desgaste de cratera na ferramenta de corte



Fonte: Stoeterau, 2007

É comum o desgaste de flanco ser acentuado na ponta de corte, quando a velocidade de corte é alta. Quando o desgaste na aresta transversal é maior que o das arestas principais de corte, existe então, uma indicação do uso de avanço acima do desejado (FERRARESI, 1976).

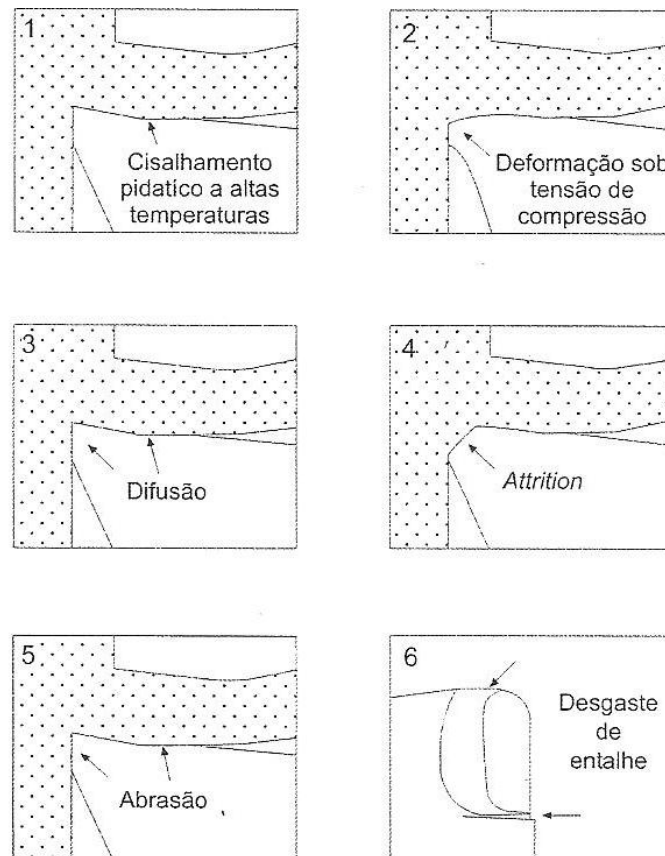
Os desgastes das ferramentas podem ser medidos de forma direta ou indireta. A medição direta pode ser feita em oficina através de lupa ou relógio comparador, em laboratório através de microscópio ou perfilômetro e na própria máquina através de sensores de fibras ópticas. A medição indireta pode ser feita medindo-se na própria peça usinada as dimensões esperadas (através de instrumentos de medição do tipo paquímetro ou micrômetro) ou a rugosidade (através de rugosímetro de apalpamento, instrumento óptico ou digitalização de imagem).

As medições do desgaste VB da ferramenta e a definição de valores práticos empregados como critérios de desgaste (desbaste e acabamento), permitem a obtenção da curva de vida do par peça-ferramenta e a programação das condições de usinagem.

3.5.2 Mecanismo e forma de desgaste

De acordo com Santos (2007) em condições normais de corte, uma das formas de desgaste apresentadas na Figura 26 irá prevalecer e se desenvolver por diversos mecanismos. A literatura apresenta variações na classificação dos mecanismos de desgaste, porém, grande parte considera pelo menos seis diferentes mecanismos e processos de desgaste (FERRARESI, 1976).

Figura 26 Mecanismos e processos de desgaste que podem acontecer nas ferramentas de corte



Fonte: Trent e Wright, 1991

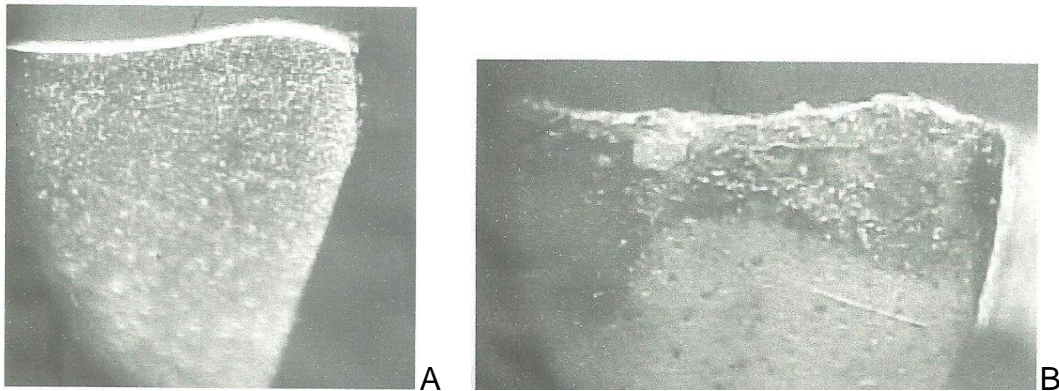
Os mecanismos como difusão, abrasão ou *attrition*, citados por Santos (2007), atuam tanto isoladamente quanto em conjunto, promovendo desgastes através de deformação plástica por cisalhamento, altas tensões de compressão ou entalhe. Na Figura 26 podem ser considerados mecanismos os de numerais 3, 4 e 5, enquanto são processos de desgaste os de números 1, 2 e 6. Na sequência, são definidos cada um destes.

Deformação plástica superficial por cisalhamento a altas temperaturas. Não é propriamente um mecanismo, mas sim um processo de desgaste ocorrendo mais provavelmente na usinagem com alto ponto de fusão em ferramentas de aço rápido. As tensões cisalhantes na interface cavaco-ferramenta são suficientes para causar deformação plástica superficial. Devido às altas temperaturas desenvolvidas, a resistência ao escoamento do material da ferramenta, próximo à interface, é reduzida.

Como consequência o material da ferramenta é arrancado da superfície, formando uma cratera. Figura 27

Deformação plástica da aresta de corte sob altas temperaturas de compressão. É mais um processo do que um mecanismo de desgaste, que ocorre na usinagem dos materiais de alta dureza. A combinação de altas tensões de compressão com elevadas temperaturas na superfície de saída, pode provocar deformação plástica da aresta de corte das ferramentas de aço-rápido e metal duro. Geralmente acontece a altas velocidades de corte e avanço, levando a uma falha catastrófica Figura 26(2). A deformação plástica da aresta pode ser observada na Figura 27.

Figura 27 Aspecto da aresta de corte de uma broca de metal duro deformada plasticamente. a) ferramenta nova; b) ferramenta após chegar ao final de vida



Fonte: Santos, 2007

Mecanismo de desgaste por difusão. Este mecanismo envolve a transferência de átomos de um material para outro e é dependente da temperatura e solubilidade dos elementos da zona de fluxo. A área desgastada, quando observada no microscópio, é lisa. Na usinagem, as velocidades relativas entre ferramenta e peça ou cavaco e ferramenta são altas, e o tempo de contato entre estes materiais é muito pequeno. Isso tornaria desprezível o mecanismo de difusão se não fosse a existência de uma zona de aderência (morta ou de fluxo) na interface cavaco-ferramenta (TRENT e WRIGHT, 1991). A saturação desta zona de aderência pode funcionar como uma barreira à difusão.

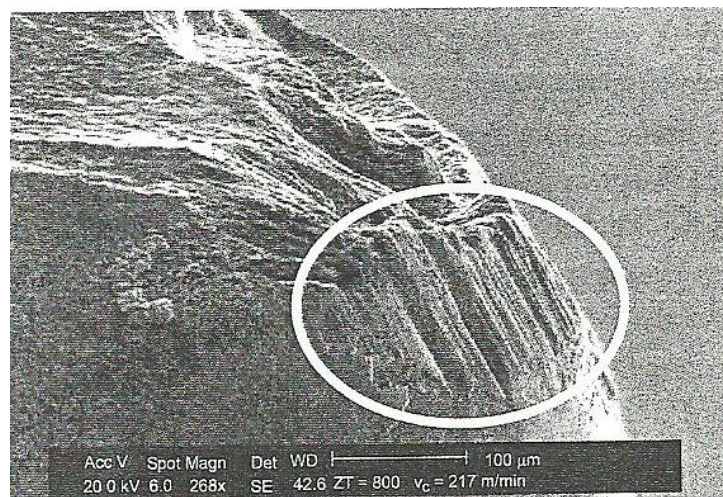
Essa zona não é estável e se renova periodicamente, garantindo, assim, o fluxo difusivo. Esse mecanismo de desgaste pode atuar nas superfícies de saída e

de folga, e a taxa de desgaste aumentará com a elevação da velocidade de corte e avanço Figura 26 (3).

Mecanismo de desgaste por aderência e arrastamento (attrition). Ocorre, geralmente, a baixas velocidades de corte, onde o fluxo de material sobre a superfície de saída torna-se irregular. A APC (área postiça de corte) aparece e o material sobre a superfície de saída torna-se menos contínuo. Sob essas condições, fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto com o fluxo de material. Esse fenômeno acontece na zona de escorregamento, por exemplo durante o fresamento, com uso de profundidade de corte irregular ou falta de rigidez do equipamento Figura 26 (4). No microscópio, as áreas desgastadas por *attrition* têm aparência áspera.

Mecanismo de desgaste por abrasão. Envolve a perda de material por microsulcamento, microcorte ou microlascamento, causado por partículas de elevada dureza relativa. Estas partículas podem estar contidas no material da peça (óxidos, carbonetos e carbonitretos), ou são as partículas da própria ferramenta arrancadas por *attrition*, por exemplo. Este mecanismo de desgaste é muito importante na usinagem com pastilhas revestidas, cerâmicas puras e mistas Figura 26 (5). Marcas de desgaste são identificadas na Figura 28.

Figura 28 Identificação de marcas de desgaste abrasivo



Fonte: CAMPOS, 2004, citado por SANTOS, 2007

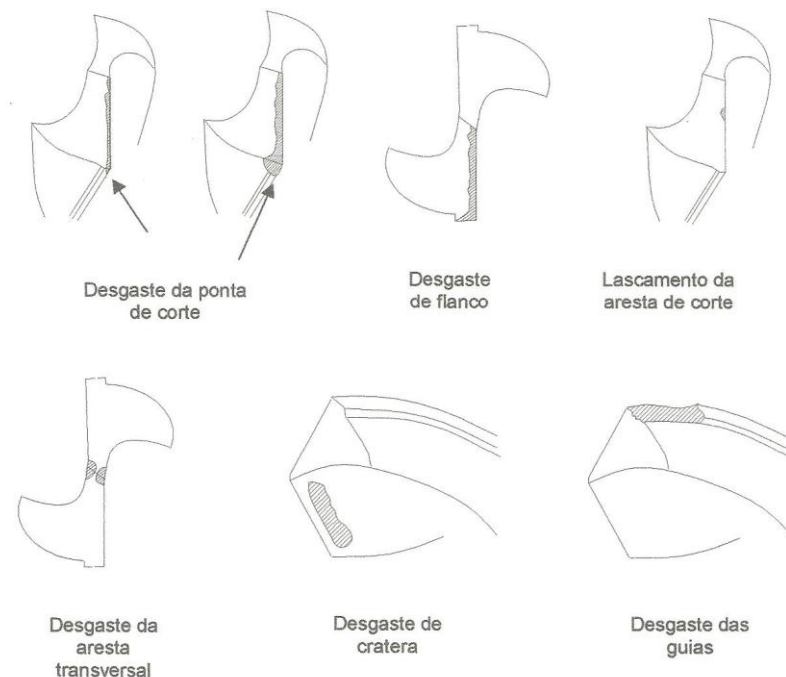
Desgaste de entalhe. Não é propriamente um mecanismo, mas sim uma forma de desgaste. Porém, ainda não existe um consenso na literatura que explique

exatamente o que provoca o desgaste. Ele ocorre, principalmente, na usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas e com elevado grau de encruamento (tais como: ligas de níquel, titânio, cobalto e aço inoxidável). Nas regiões onde acontece este tipo de desgaste, as condições de escorregamento prevalecem e o mecanismo envolve abrasão e transferência de material (difusão e *attrition*). São bastante influenciados por interações com a atmosfera. Existem evidências de que óxidos se formam continuamente e aderem na ferramenta naquelas regiões. A quebra das junções de aderência entre os óxidos e a ferramenta pode, ocasionalmente, remover material da superfície desta última (WRIGHT e BIAGGI, 1981, citado por SANTOS 2007).

3.5.3 Desgaste nas brocas helicoidais

No caso específico do processo de furação, objeto desta dissertação, as formas de desgaste apresentam algumas particularidades em relação às observadas nos processos de torneamento e fresamento. Kanai *et al.* (1979) distinguem sete formas de desgaste de brocas, mostradas na Figura 29.

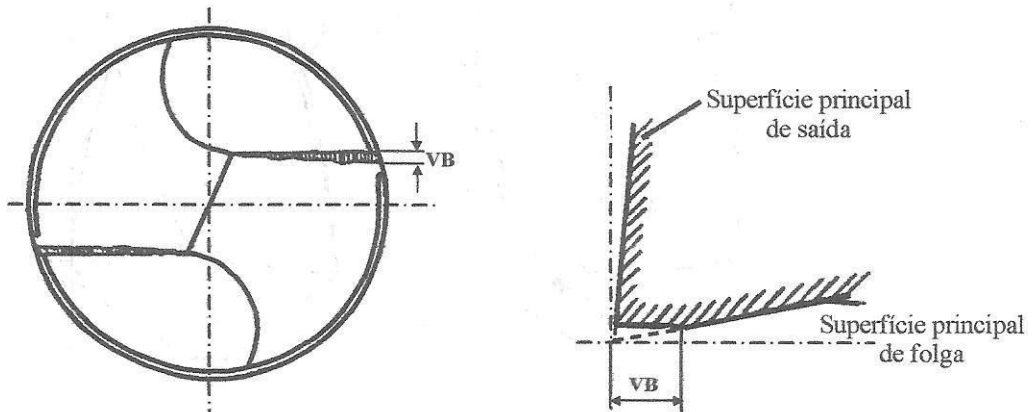
Figura 29 Formas de desgaste em brocas



Fonte: KANAI *et al.*, 1979

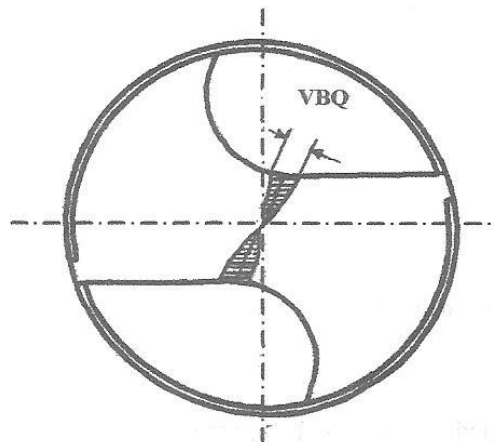
Os desgastes nas brocas helicoidais se apresentam em várias regiões do corte nas Figuras 30, 31 e 32 onde são representados os desgastes nas arestas principais de corte nas arestas transversais da broca e nas arestas secundárias de corte.

Figura 30 Representação do desgaste nas arestas principais de corte



Fonte: NOVASKI, 1996

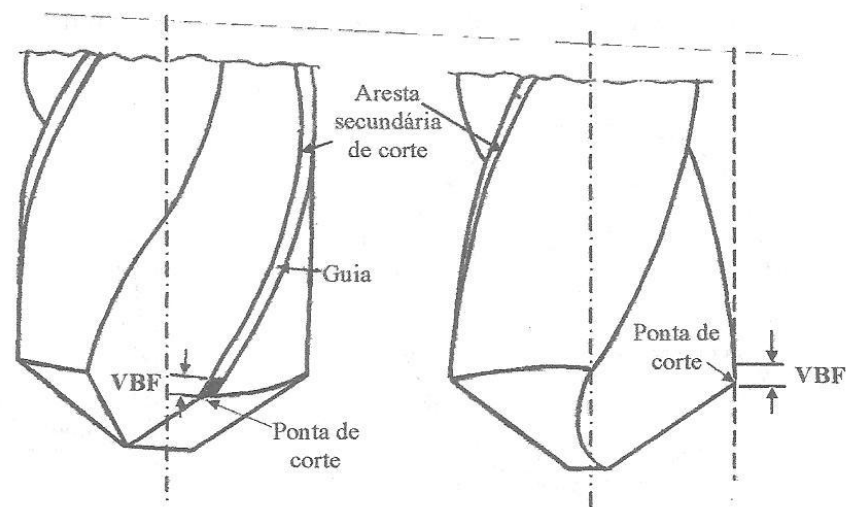
Figura 31 Representação do desgaste na aresta transversal da broca



Fonte: NOVASKI, 1996

Nos processos normais de furação, sendo utilizados parâmetros de usinagem adequados, os desgastes ocorrem na aresta transversal e principalmente nas arestas principais de corte (Figura 31).

Figura 32 Respresentação do desgaste na aresta secundária de corte



Fonte: NOVASKI, 1996

3.5.4 Vida das ferramentas

Vida da ferramenta, segundo Ferraresi (1976), significa: “o tempo em que a mesma trabalha efetivamente, sem perder o corte ou até que se atinja um critério de fim de vida previamente estabelecido”.

De acordo com Santos (2007) o fim de vida de uma ferramenta de corte é definido pelo grau de desgaste previamente estabelecido. O tamanho deste desgaste dependerá de inúmeros fatores. Entre outros, pode-se citar:

- a) receio de quebra da cunha cortante;
- b) elevadas temperaturas na interface cavaco-ferramenta;
- c) as tolerâncias dimensionais estabelecidas no projeto já estarem comprometidas;
- d) o acabamento da superfície usinada não ser mais satisfatório;
- e) aumento nas dimensões das rebarbas;
- f) elevação da força de usinagem;
- g) nível de ruído maior;
- h) crescente nível de vibração;
- i) outros.

3.5.4.1 Como expressar a vida da ferramenta

Fixado um critério para fim de vida como, por exemplo, o estabelecido na norma ISO 3685 (1993), ou em experiências acumuladas anteriormente, a vida da ferramenta pode ser expressa de diversas maneiras:

- a) número de peças produzidas;
- b) percurso de avanço (mm);
- c) percurso efetivo de corte (km);
- d) velocidade de corte para determinado tempo de vida (exemplo: $V_{c60} = 150\text{m/min}$);
- e) volume de material removido;
- f) outros.

Para condições de corte pré-fixadas, tais como: geometria da ferramenta, velocidade de corte, profundidade de corte e rigidez do sistema, torna-se possível através de ensaios, definir as curvas de desgaste e de vida da ferramenta, empregando-se a seguinte metodologia:

- a) para um determinado lote de peças de mesmo material, tomam-se algumas amostras para usinagem;
- b) para cada amostra ou grupo de amostras deve ser estabelecido uma velocidade de corte;
- c) a cada ensaio de usinagem são promovidas medições de desgaste da ferramenta em função do tempo;
- d) registram-se as curvas de desgaste para cada velocidade de corte adotada em função do tempo de corte;
- e) segue a fixação do valor de desgaste, adotado como critério de vida da ferramenta em função do acabamento superficial da peça ou das variações dimensionais da peça acima de valores limites estabelecidos pela tolerância da peça;
- f) para cada tempo de corte anotado à respectiva velocidade de corte, ao atingir o desgaste limite (critério de desgaste), fixa-se um ponto no gráfico de desgaste em função do tempo de corte, conforme é mostrado na Figura 33;

g) com os pontos obtidos, se torna possível obter um segundo gráfico relacionando a vida da ferramenta (obtida do tempo de corte) com a velocidade de corte. Tal relação, na forma dilog, define a curva de vida da ferramenta e estabelece a equação da curva formulada por Taylor como:

$$T * v_c^x = K \quad (3.3)$$

onde:

T = vida da ferramenta em minutos;

v_c = velocidade de corte em m/min;

K e x = constantes para cada par ferramenta, denominados coeficientes da equação de Taylor.

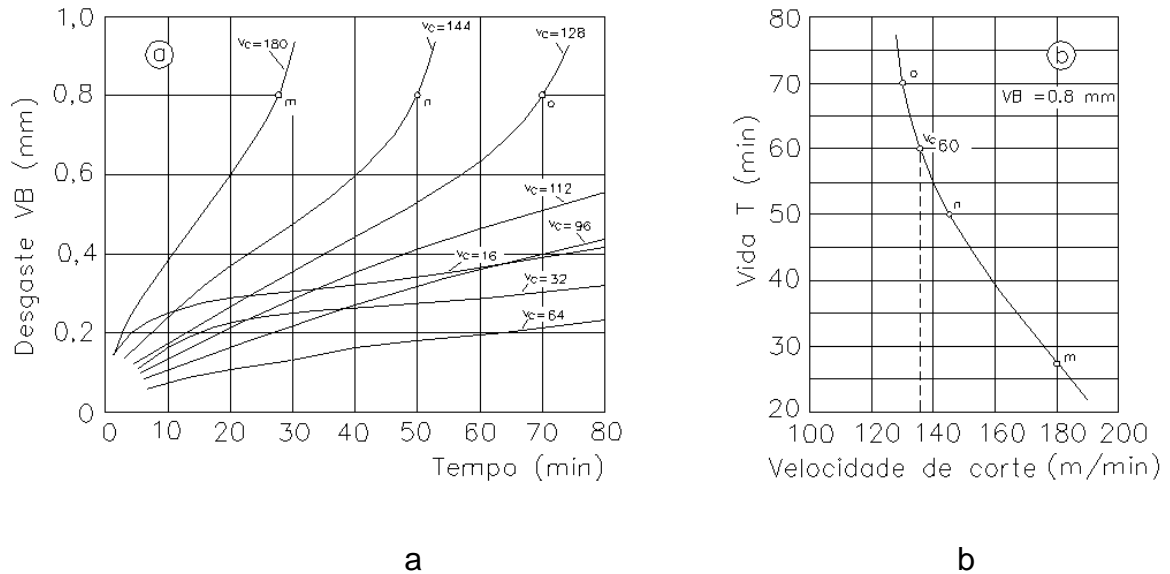
3.5.4.2 Ensaio de vida – determinação da equação de Taylor

O ensaio de vida de ferramentas de corte é um ensaio de longa duração e tem como objetivo obter a vida da ferramenta em função da velocidade de corte. Para isso são levantadas as curvas de evolução do desgaste como as mostradas na Figura 33 (a). Com base no comportamento dessas curvas é estabelecido o critério de fim de vida, que corresponde ao valor máximo do desgaste admissível, como exemplo (0,8 mm na Figura 33) e determinados os valores de vida das ferramentas. A seguir é plotado um gráfico da vida da ferramenta em função da velocidade de corte, conforme mostrado na Figura 33 (b). É sabido que a equação de vida da ferramenta, denominada equação de Taylor, apresenta a forma:

$$T = K * v_c^{-x} \quad (3.4)$$

Por meio da linearização da curva de vida mostrada na Figura 33 (b) obtém-se os valores dos coeficientes da equação de Taylor.

Figura 33 Curvas típicas de evolução de desgaste ao longo do tempo e de vida de ferramentas em função da velocidade de corte



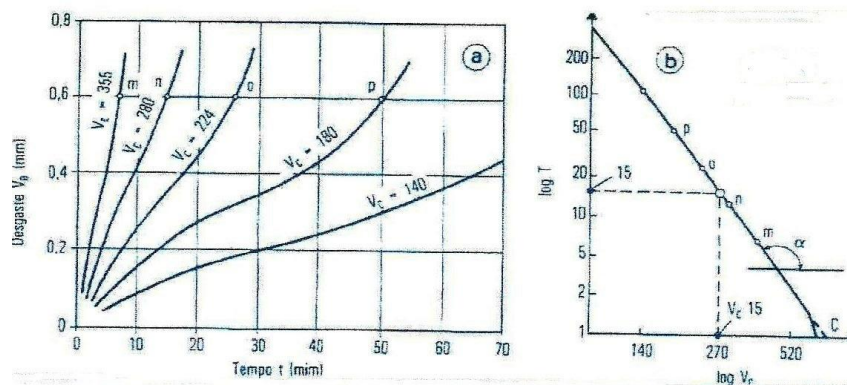
Fonte: Santos, 2005

Dessa forma, a equação de Taylor fornece valores da vida (T) da ferramenta para diferentes velocidades de corte do par peça-ferramenta a uma determinada condição de usinagem.

Por exemplo, para $T=15$ minutos, tem-se a chamada velocidade de corte vc_{15} (Figura 34 b). O valor "x" da fórmula original de Taylor, ou "y" da fórmula modificada ($v_c \cdot T^y = C$), corresponde ao coeficiente angular da reta ($y = -\cotg \alpha$). Com os valores de v_c e "y" ou "x", tem-se o valor da constante "C" ou "K", respectivamente.

A Figura 34 representa as curvas de desgaste (a) e de vida da ferramenta (b).

Figura 34 Curvas de desgaste e de vida da ferramenta



Fonte: GONÇALVES, 2011.

A representação dilogarítmica da função $T = F(V_c)$ se aproxima de uma reta, cuja equação pode ser expressa originalmente por:

$$T * v_c^x = K \quad (3.5)$$

Muitas vezes encontra-se na literatura a equação de Taylor expressa sob a forma:

$$v_c * T^y = C \quad (3.6)$$

onde:

$$y = 1/x; e \quad (3.7)$$

$$C = K^y \quad (3.8)$$

Os parâmetros x e K , y e C , variam com o material da peça, material da ferramenta, área e forma da secção de corte e ângulos da ferramenta. Às velocidades de corte dadas por equações deste tipo, são denominadas velocidades ótimas de corte.

Empregando-se a fórmula de Taylor para duas velocidades de corte diferentes, tem-se:

$$V_c * T^y = V_c' * T' = C \quad (3.9)$$

ou ainda:

$$T'/T = (V/V')^{1/y} \quad (3.10)$$

3.6 Usinabilidade dos Materiais

Os ensaios de usinabilidade são divididos em duas categorias básicas, que são ensaios que requerem usinagem e ensaios que não requerem usinagem, com subdivisões entre estas categorias. A primeira destas faz distinção entre os testes relativos (ranking testes), que indicam a usinabilidade relativa entre dois ou mais pares ferramenta-peça para condições específicas de usinagem, e os testes absolutos, que indicam os méritos de dois ou mais pares ferramenta-peça para uma dada faixa de usinagem. Adicionalmente, uma outra distinção é feita entre os ensaios de usinabilidade diz respeito à duração dos ensaios (curta e longa duração) (Amorim, 2002).

De acordo com Santos (2005), o significado de usinabilidade é associado à facilidade (ou a dificuldade) de se usinar um material. A sua definição, portanto, é bem mais complexa, devido à grande quantidade de fatores que podem ser levados

em consideração para qualificar a usinagem. Diante dessas dificuldades, a quantificação da usinabilidade de um material é feita levando-se em conta um dos fatores que a influenciam, denominados *parâmetros de usinabilidade*. Como exemplos de parâmetros de usinabilidade, podem ser citados:

- a) cavaco formado;
- b) força e potência de usinagem;
- c) temperatura de corte;
- d) vida da ferramenta;
- e) integridade superficial da peça usinada;
- f) propriedades físicas ou mecânicas dos materiais;
- g) formação de rebarbas.

Devido ao grande número de parâmetros de usinabilidade, um material pode apresentar usinabilidade melhor que outro segundo um determinado critério e pior em relação a outro critério.

Os procedimentos experimentais utilizados para a determinação da usinabilidade constituem os *ensaios de usinabilidade*. Mills e Redford (1983) classificam os ensaios em duas categorias básicas:

- a) ensaios que requerem usinagem;
- b) ensaios que não requerem usinagem.

Nos ensaios que não requerem usinagem a usinabilidade é obtida com base na composição química, propriedades físicas ou na microestrutura do material da peça usinada.

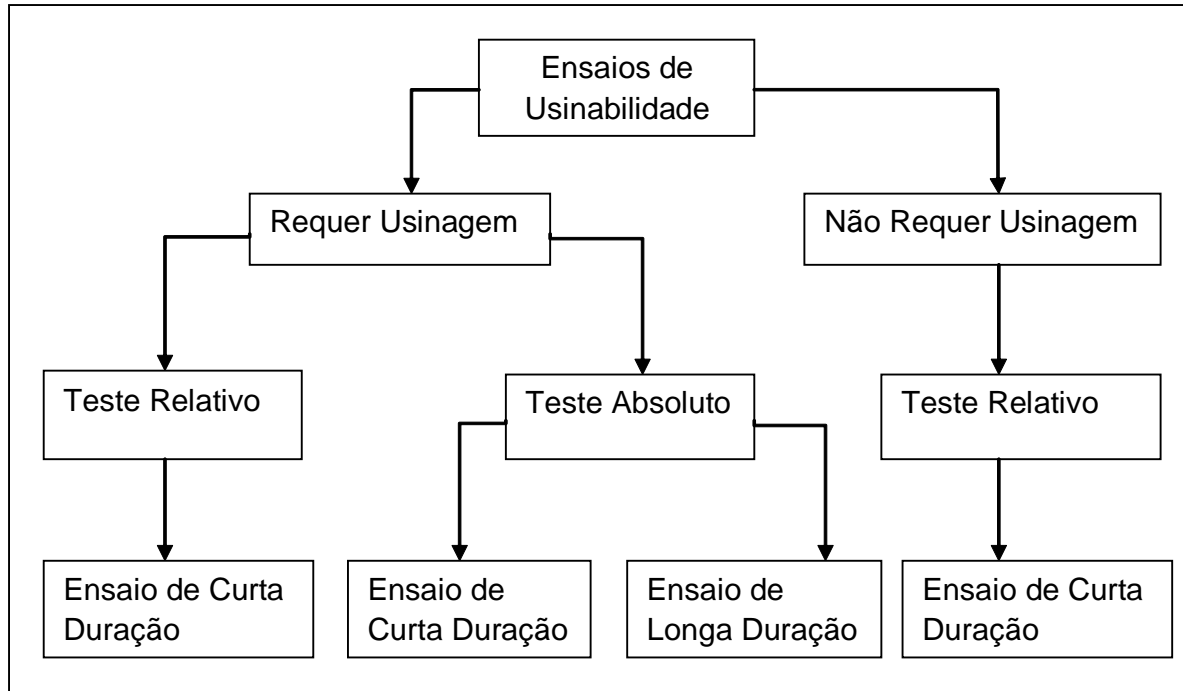
Quanto à natureza dos resultados obtidos, os ensaios de usinabilidade são classificados em:

- a) testes de ranqueamento (“ranking tests”), ou testes relativos;
- b) testes absolutos.

Nos testes de ranqueamento é determinada a usinabilidade relativa entre duas ou mais combinações peça-ferramenta, em condições de corte estabelecidas.

Os testes absolutos fornecem a usinabilidade relativa em faixas de condições de corte.

Figura 35 Classificação dos ensaios de usinabilidade



Fonte: Mills e Redford, 1983

Os ensaios de usinabilidade, no processo de furação, podem também ser classificados quanto ao tempo de duração em:

- a) ensaio de furação convencional, exemplo: testes de longa duração;
- b) ensaio de furação a pressão constante, exemplo: testes de curta duração.

Apesar dos diferentes critérios de classificação, os ensaios de usinagem apresentam uma certa relação entre si. Os testes que não requerem usinagem são sempre classificados como testes de ranqueamento. Os testes absolutos são sempre de longa duração.

3.6.1 Ensaio com aplicação de pressão constante

O ensaio de furação a pressão constante é considerado um dos testes de ranqueamento mais conhecidos (MILLS e REDFORD, 1983). O teste consiste em

aplicar uma força constante na direção de avanço e na medição do intervalo de tempo para a ferramenta realizar um determinado deslocamento. Nesse caso o intervalo de tempo é tomado como parâmetro de usinabilidade. O percurso descrito pela ferramenta em um intervalo de tempo pré-fixado também pode ser tomado como parâmetro de usinabilidade. O ensaio pode ser aplicado nos processos de torneamento e furação.

Os pesos fixados ao porta-ferramenta por meio de um cabo garantem que a pressão aplicada pela ferramenta sobre a peça seja constante.

A escolha do ensaio de usinabilidade por aplicação de pressão constante no processo de furação foi feita devido à simplicidade da construção do equipamento e de sua grande potencialidade de geração de resultados.

a) Composição química

A comparação de usinabilidade entre materiais que diferem entre si tanto com relação à composição química, quanto na microestrutura pode ser feita por meio do ensaio proposto. Pode-se determinar, por exemplo, a influência de um determinado elemento em uma liga ou como a microestrutura pode influenciar a usinabilidade de materiais com a mesma composição química. Nessa categoria de ensaios podem ser incluídos os testes comparativos entre materiais com a mesma especificação nas versões tradicionais e com usinabilidade melhorada.

b) Influência da geometria das brocas

Existe no mercado uma grande variedade de brocas helicoidais com diferentes geometrias. O ensaio apresentado nesta proposta é um procedimento simples para fazer um estudo comparativo do desempenho dessas ferramentas.

c) Influência de revestimento

Os revestimentos são um importante fator de diferenciação de desempenho entre ferramentas de corte. Os resultados de ensaio de usinabilidade com aplicação de pressão constante permite avaliar a influência do revestimento depositado sobre ferramentas com a mesma geometria.

d) Condições de aplicação de fluidos de corte

A influência da aplicação de fluido de corte no processo de furação é outro parâmetro que pode ser analisado por meio do ensaio proposto. Para isso devem ser mantidas constantes as condições de corte, geometria da ferramenta e a carga aplicada. As variáveis são o tipo, concentração e vazão de fluidos de corte.

e) Uso do Critério de Chauvenet

Caso haja variabilidade nos dados, será usado o que estabelece o Critério de Chauvenet, com a equação:

$$R = \frac{|X_1 - X_m|}{S} \geq 1,96 \quad (3.11)$$

Onde:

R = resultado da operação pelo Critério de Chauvenet, que deverá ser igual ou superior a 1,96 para 10 amostras;

X_1 = o dado analisado;

X_m = a média dos 10 dados;

S = o desvio padrão da amostra.

3.6.1.1 Comparação de resultados do ensaio de furação com pressão constante com os resultados do ensaio de vida

Outro campo de aplicação do ensaio de furação com pressão constante que merece ser investigado é relacionado ao estudo da potencialidade deste tipo de ensaio substituir os ensaios de vida das ferramentas de corte, que são mais demorados e demandam mais recursos. Para isso é necessário que sejam comparados os resultados de ensaios de vida com os obtidos no ensaio de furação com pressão constante e a partir daí deve-se verificar em que aspectos o ensaio de furação apresenta resultados que podem ser relacionados aos dos ensaios de longa duração.

As principais características deste tipo de ensaio de usinabilidade são a simplicidade e a rapidez com que os resultados são obtidos, o que contribui para a confiabilidade dos resultados obtidos, uma vez que ferramentas estatísticas podem ser utilizadas pois o ensaio viabiliza a realização de réplicas dos testes. Todos esses benefícios justificam o desenvolvimento de pesquisas que permitam a determinação do campo de aplicação desse tipo de ensaio.

4 METODOLOGIA

Os procedimentos adotados para a realização dos ensaios apresentados neste capítulo são divididos em quatro etapas, que abordam características dos materiais, das ferramentas, das condições adotadas para os ensaios de vida das ferramentas e ensaios de usinabilidade de curta duração.

O critério utilizado para os testes de furação convencional foi o teste absoluto baseado na vida da ferramenta, com o método do número de furos realizados por broca. A seleção de dois tipos de brocas helicoidais de haste reta, sendo uma de afiação cruzada revestida e a outra de afiação cônica, sem revestimento; o uso de um centro de usinagem para realização dos testes; foi desenvolvido um programa com os parâmetros pré-definidos e inserido no sistema de Controle Numérico Computadorizado (CNC); foram definidos que seriam 03 testes com cada tipo de broca, para três tipos de aço, o fim dos testes seriam por quebra, sobrecarga na máquina ou desgaste acentuado da broca. Anteriormente foi utilizado um material com os procedimentos acima, para ajuste de parâmetros. Os resultados foram anotados para posterior análise.

A avaliação dos testes foi feita a cada 36 furos, havia a parada programada da máquina, para análise dos cavacos, das condições da broca e conferência dos parâmetros da máquina.

A metodologia utilizada para os testes de furação a pressão constante foi o teste relativo, baseado na pressão específica de furação. Foi feita a seleção de 07 tipos de brocas helicoidais de haste reta, sendo uma de afiação cônica, sem revestimento, duas de afiação cruzada revestida, uma de metal duro, uma de aço inox, uma revestida e uma não revestida com afiação específica; foi desenvolvido um programa para o processamento dos furos e inserido no Controlador Lógico Programável (PLC) da máquina, foram definidos que seriam 03 testes com cada tipo de broca e que cada broca faria 10 furos. Para o ensaio de curta duração, os corpos de prova foram divididos em dez regiões distribuídas ao longo de sua superfície. A sequência de furação foi aleatória.

4.1 Materiais furados

Foram utilizados 02 (dois) materiais de aço ao carbono e 2 (dois) aços de baixa liga, conforme descrito na Tabela 4.1.

Dimensões dos corpos de prova:

- a) para o ensaio de vida: 1 (uma) barra 4" x 4" x 400 mm, de cada material;
- b) para o ensaio de curta duração: 1(uma) barra 4" x 4" x 200 mm de comprimento, de cada material.

Tabela 2 Composição química do material utilizado nos testes

Material	Composição Química (%)									
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S	Al	P	Cu
ABNT 1020	0,16	0,18	1,09	0,02	0,01	0,02	0,008	0,032	0,01	0,01
ABNT 1045	0,45	0,27	0,73	0,08	0,01	0,06	0,021	0,015	0,021	0,17
ABNT 4140	0,40	0,25	0,80	0,94	0,17	0,09	0,026	0,035	0,024	0,17
ABNT 4340	0,39	0,28	0,66	0,77	0,22	1,67	0,001	0,033	0,006	0,10

Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 3 apresenta as características mecânicas dos materiais usados nos testes, conforme citado por Lopes, 2013.

Tabela 3 Características mecânicas do material utilizado nos testes

MATERIAL	DUREZA (HB)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	TENSÃO RUPTURA (MPa)	LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa) x 10 ⁵	ALONGAMENTO (%)
ABNT 1020	111	165	380	244	2,0	25
ABNT 1045	163	310	565	346	2,0	16
ABNT 4140	270	663	920	443	2,1	15
ABNT 4340	290	872	980	510	2,1	17

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 Ferramentas

Para o ensaio com furação convencional no Centro de Usinagem foram usadas as brocas A e B:

- a) Broca A. Ferramenta selecionada através de catálogo do fabricante DORMER, broca helicoidal com haste cilíndrica em aço rápido DIN 338, afiação cruzada – referência A114 – ângulo da ponta 118° - diâmetro de 8,00 mm. Com cobertura de TiN (Nitreto de Titânio) na ponta.
- b) Broca B. Ferramenta selecionada através de catálogo do fabricante VONDER, broca helicoidal com haste cilíndrica em aço rápido DIN 338, afiação cônica – ângulo da ponta 120° - diâmetro de 8,00 mm. Sem cobertura.

Para o ensaio de furação a pressão constante, além das brocas A e B, foram usadas as brocas C, D, E, F e G.

- c) Broca C: Ferramenta selecionada através de catálogo do fabricante LENOX TWILL, broca helicoidal com haste cilíndrica em aço rápido DIN 1870, afiação cruzada – referência TW431 – ângulo da ponta 118° - diâmetro de 8,00mm. Com cobertura de TiN na ponta.
- d) Broca D: Ferramenta selecionada através do catálogo Titex Plus, broca helicoidal com haste cilíndrica em metal duro, ângulo da ponta 118° - diâmetro de 8,00mm.
- e) Broca E: Ferramenta selecionada através de catálogo do fabricante DORMER, broca helicoidal com haste cilíndrica em aço inoxidável DIN 338, afiação cruzada – referência A108 – ângulo da ponta 135° - diâmetro de 8,00mm.
- f) Broca F: Ferramenta selecionada através de catálogo do fabricante OSG, broca helicoidal com haste cilíndrica em aço rápido, referência 511, ângulo da ponta 130° , bitola de 8,00mm, com cobertura de TiN ao longo de todo comprimento do canal.
- g) Broca G: Ferramenta selecionada através de catálogo do fabricante OSG, broca helicoidal com haste cilíndrica em aço rápido, referência 8567, ângulo da ponta 130° , diâmetro de 8,00mm.

As brocas utilizadas nos testes estão representadas na Figura 36.

Figura 36 Brocas utilizadas nos ensaios de furação a pressão constante



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Máquina ferramenta

Os ensaios de vida das ferramenta foram realizados em um Centro de Usinagem Romi da linha Discovery modelo 560 com comando numérico GE Fanuc 21i-MB, Figura 37. Na Tabela 4 são apresentadas as características principais do Centro de usinagem.

Figura 37 Centro de Usinagem vertical, modelo Discovery 560 (ROMI)



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4 Características do Centro de Usinagem Discorevy 560

Especificação técnica	Valores	Especificação técnica	Valores
Faixa de velocidades	7 a 7500 rpm	Potência total instalada	15kVA
Avanço rápido (eixos x/y)	30m/min	Curso long. da mesa (x)	560mm
Avanço rápido (eixo z)	20m/min	Curso transv. da mesa (y)	406mm
Avanço de corte	1 a 15m/min	Curso vert. do cabeçote	508mm
Potência do motor principal CA	11kW/15cv	Comando	GE-Fanuc 21i-MB

Fonte: Intermáquinas, 2013

Os ensaios de furação com aplicação de pressão constante foram realizados no equipamento mostrado na Figura 38. A Tabela 5 apresenta os principais parâmetros para a operação da furadeira utilizada para a realização dos testes de curta duração

Figura 38 Equipamento para ensaio de furação a pressão constante



Fonte: Elaborado pelo autor

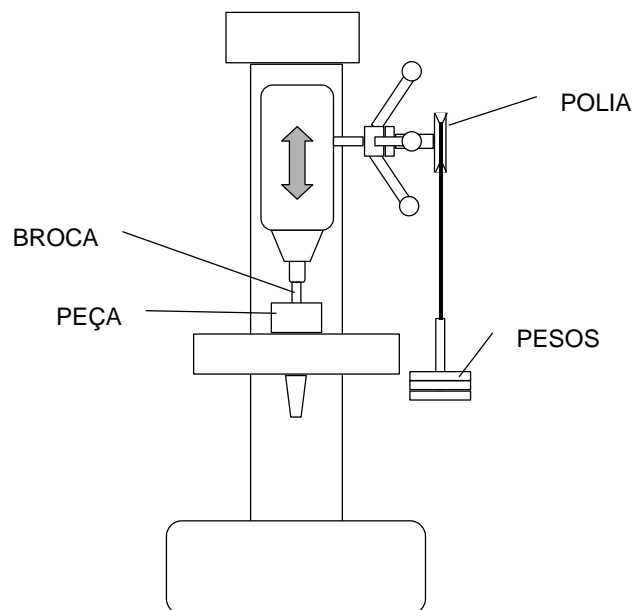
Tabela 5 Características do Equipamento para ensaio de furação a pressão constante

Especificação técnica	Valores	Especificação técnica	Valores
Faixa de velocidades	120 a 2580 rpm	Curso long. da mesa (x)	500mm
Capacidade máxima de furação (diâmetro)	31,5mm	Curso transv. da mesa (y)	175mm
Potência do motor principal	1,5kW/2,0HP	Curso eixo-árvore	130mm

Fonte: MANROD 2013.

O princípio de funcionamento do equipamento do ensaio de usinabilidade por meio da aplicação de pressão constante no processo de furação é mostrado na Figura 39.

Figura 39 Representação esquemática do ensaio de furação com pressão constante



Fonte: Santos, 2005

A preparação do equipamento, no caso uma furadeira de coluna, consiste na retirada da mola de retorno e adaptação de um conjunto de polias, cabo, e pesos que têm por objetivo aplicar a pressão constante na furação. O intervalo de tempo em que a ferramenta completa um percurso de avanço previamente fixado é tomado como parâmetro de usinabilidade.

4.4 Ensaio de Vida das Brocas (furação convencional)

Para a realização dos ensaios de vida das brocas foram estabelecidas condições de corte iniciais mostradas na Tabela 6.

Tabela 6 Parâmetros de usinagem (pré-teste)

Parâmetros de usinagem	
Velocidade de corte (v_c)	35 m/min
Avanço (f)	0,20 mm/rev
Comprimento do furo (furo cego) (l)	40 mm

Fonte: Elaborada pelo autor

Passos para a execução dos ensaios:

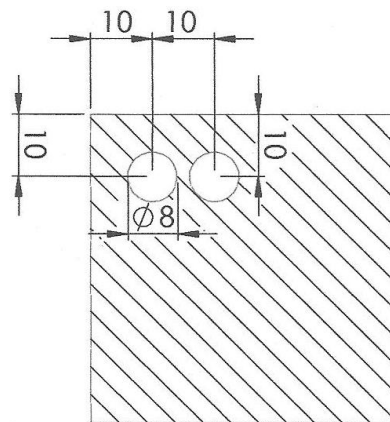
- a) montagem da barra medindo 100 X 100 X 400 mm na morsa do Centro de usinagem, posicionamento centralizado da peça e fixações necessárias;
- b) medir a distância (X) da face da morsa à extremidade da peça, com paquímetro;
- c) medir a distância (Z) até a face da peça, com paquímetro;
- d) inserir estes dados, juntamente com os parâmetros da Tabela 6 no programa O3000 e O3001 do Centro de Usinagem, conforme anexos A e B;
- e) posicionar a broca no centro peça, ligar o Centro de Usinagem, descer o cabeçote manualmente até a broca facear a peça, inserir estes dados no programa e retornar à tela de partida;
- f) ligar o Centro de Usinagem e iniciar os testes, com a refrigeração desligada;
- g) acompanhar o comportamento da máquina, broca e peça durante os testes;
- h) a cada 36 furos realizados avaliar as condições da broca.

O comportamento das brocas nas condições iniciais foi avaliado e foram feitas alterações mostradas nas Tabelas 6, 7 e 8.

O critério de fim de vida adotado foi a falha catastrófica, caracterizada pela quebra ou perda da capacidade de corte das ferramentas.

A distribuição dos furos nos corpos de prova é mostrada na Figura 40.

Figura 40 Desenho esquemático da furação para o ensaio de vida



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 7 Condições de ensaio aço ABNT 1045, com a broca B

Aço ABNT 1045			
1º ensaio – broca B			
v_c	35m/min.	Vida (furos) B1 = 4	Conclusão: condição severa Alterar condições de corte.
f	0,2mm/rev.	Vida (furos) B2 = 4	
l (furo cego, furação direta)	40mm	Vida (furos) B3 = 1	

Fonte: Elaborado pelo autor

Após a quebra das brocas com somente 04 furos efetuados, constatou-se que as condições estavam muito severas e foram alterados os parâmetros para continuação dos testes, conforme Tabela 8.

Tabela 8 Condições de ensaio aço ABNT 1045, brocas A e B

Aço ABNT 1045			
2º ensaio – brocas A e B			
v_c	25m/min.	Vida média A = 150,67	Conclusão: Resultados aceitáveis
f	0,14mm/rev.	Vida média B = 165	
l (furo cego, furação direta)	30mm		

Fonte: Elaborado pelo autor

Constatou-se que os parâmetros eram razoáveis para realização dos testes, mudamos o material, iniciamos novos testes com os parâmetros iniciais, e realizamos os testes com as brocas A e B. Constatamos que com a profundidade de 40mm de furo, o cavaco impedia a saída da broca, conforme Tabela 9.

Foram feitos novos testes para ajuste de parâmetros, conforme apresentado na Tabela 9.

Selecionamos o aço ABNT 1045 para realização do pré-teste por ser um aço de dureza e resistência que permitiram a utilização tanto da broca revestida como da broca não revestida e por permitir uma variação da velocidade. Como foram feitos vários pré-testes o material restante não foi suficiente para realizar o teste de furação convencional, que demanda grande quantidade de material. Portanto este aço foi utilizado somente para o pré-teste e para os ensaios de furação a pressão constante, não sendo com o mesmo realizado o ensaio de furação convencional.

Tabela 9 Condições estabelecidas ensaio do Aço ABNT 4140, com a broca A

Aço ABNT 4140			
3º ensaio – broca A			
V_c	35m/min.	Vida (furos) A1 = 4	Conclusão: Cavaco impede a saída da broca, ocasionando a quebra.
f	0,2mm/rev.	Vida (furos) A2 = 1	
l (furo cego, furação direta)	40 mm	Vida (furos) A3 = 1	

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base na análise anterior definiu-se efetuar os testes usando o pica-pau e alterando a profundidade do furo para 30,0mm.

O pica-pau é um programa incremental, com a finalidade de remoção de cavaco, desenvolvido de forma que se estabelece um plano de recuo, a divisão de corte Q, (que é o avanço por corte) e a posição final, juntamente com o tempo de espera. Figura 41.

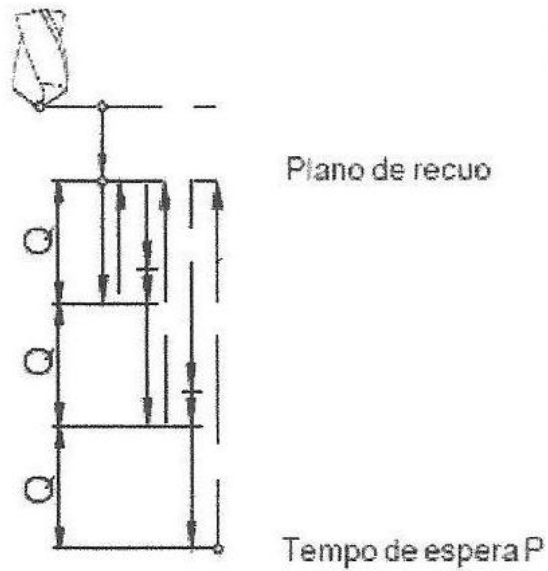
Para os testes de furação convencional foram definidos :

Plano de recuo: 3,00mm

Q = 5,00mm

Tempo de espera P: 1,00s

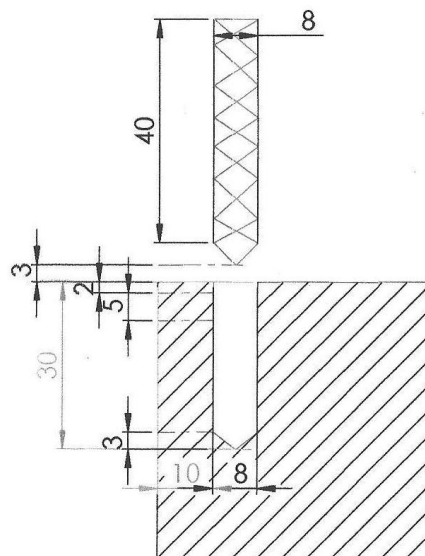
Figura 41 Ciclo de furação, uso do pica-pau



Fonte: Intermáquinas, 2012

No programa 03001 foi alterado o valor de Z para (-30). As condições finais para realização dos testes estão definidas na Tabela 10. Conforme esquematizado nas Figuras 41 e 42 a máquina foi regulada para iniciar o furo a 3,0mm da face do material, com penetração de 5,0mm e retorno à posição de 3,0mm acima da face do material.

Figura 42 Seqüência de operações para penetração da broca, durante a execução do furo



Fonte: Elaborado pelo autor

4.5 Condições finais

Após realizar os ajustes necessários foram estabelecidos os parâmetros da Tabela 10 para realização dos testes. Nesta tabela não foram incluídos os parâmetros relativo ao aço ABNT 1045 porque este aço foi utilizado somente para pré-teste e para o ensaio de furação com pressão constante

Tabela 10 Condições estabelecidas para realização dos testes

Material	V_c (m/min)	f (mm/rev.)	l (mm)	Observação
Aço ABNT 4140	35	0,2	30	Com o pica-pau
Aço ABNT 1020	35	0,2	30	Com o pica-pau
Aço ABNT 4340	35	0,2	30	Com o pica-pau

Fonte: Elaborada pelo autor

4.6 Ensaio de furação com pressão constante (curta duração)

A sequência de ajuste e partida da furadeira está descrito no Anexo C.

Seqüência de preparação para o ensaio:

- a) adequação da carga para geração de avanço compatível com o par broca – peça;
- b) ajuste da rotação (verificação com tacômetro);
- c) ensaio;
- d) anotar o tempo medido e reiniciar o teste.

Os ensaios foram feitos considerando os parâmetros:

Carga: 94,6 \pm 0,6kgf

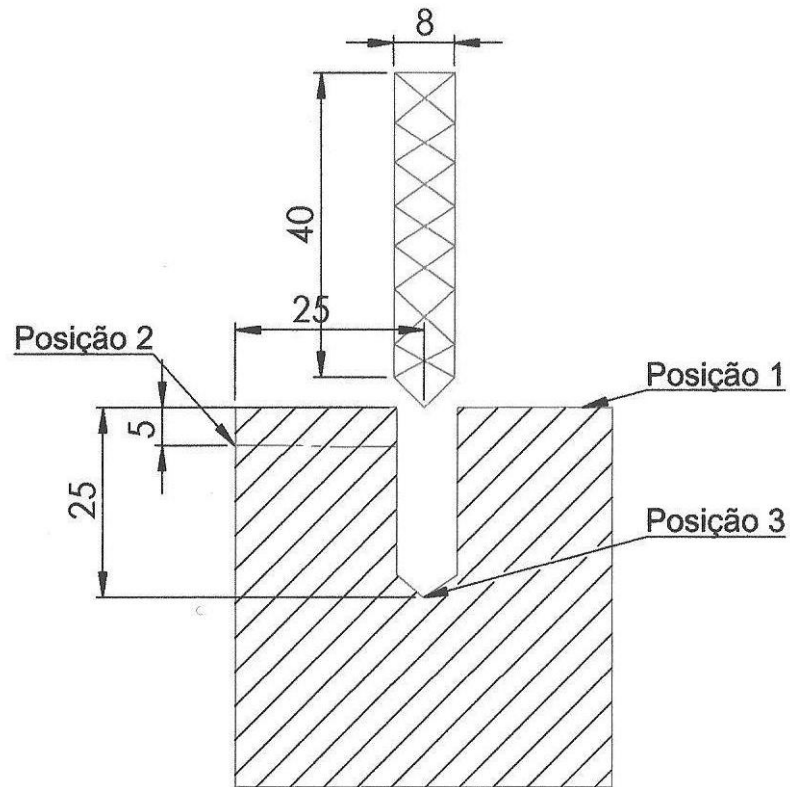
Rotação: 1392rpm.

A carga foi estabelecida de forma empírica, de maneira a atender a rotação estabelecida e a capacidade da máquina.

Na Figura 43 indicamos diâmetro do furo de 8,0mm, para um furo com o comprimento útil de 20,0mm, considerando 5,0mm como transiente de entrada.

Para o ensaio de furação a pressão constante, os corpos de prova foram divididos em dez regiões distribuídas ao longo de sua superfície. A sequência de furação foi aleatória.

Figura 43 Desenho esquemático do processo de furação com pressão constante



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 44 é mostrado o detalhamento da furação em uma peça em teste. Nesta Figura a máquina foi ajustada para realizar 10 furos, retornar à posição inicial no eixo X, deslocando 10mm no eixo Z e reiniciar a furação, durante 4 sequência, após realizar 40 furos parar para inspeção da peça, da broca e das condições estabelecidas para o teste.

Figura 44 Detalhamento dos furos na amostra



Fonte: Elaborado pelo autor

5 RESULTADOS

Na análise dos resultados, foi considerado primeiramente o ensaio de vida, analisando o comportamento das brocas em relação aos materiais; a influência do material na vida das brocas e foi feita uma análise dos desgastes das brocas. Para cada teste foram feitas mais duas réplicas para dar maior confiabilidade e garantir a repetibilidade.

A mesma análise foi feita para o teste de usinabilidade a pressão constante.

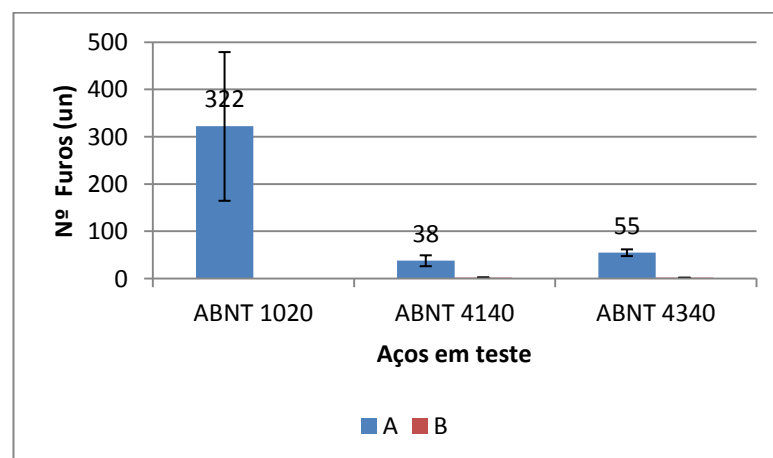
E, finalmente foi feita uma análise comparativa dos testes de usinabilidade pelo método convencional com o método a pressão constante.

5.1 Ensaio de vida

5.1.1 A influência do material no processo de furação

Sobre a influência do material no processo de usinagem, pela análise dos dados apresentados na Figura 45, pode-se afirmar que o aço ABNT 1020 tem um comportamento de menor resistência à penetração da broca, o que diminui o desgaste contribuindo para que elas tenham uma vida maior em termos de números de furos realizados, comparado com os aços ABNT 4140 e 4340.

Figura 45 Teste com os aços ABNT 1020, 4140 e 4340



Fonte: Elaborado pelo autor

O aço ABNT 1020 tem a dureza de 111 HB e Limite de Resistência de 165MPa, o aço ABNT 4140 tem a dureza de 270 HB E Limite de Resistência de 663MPa e o aço ABNT 4340 tem a dureza de 290 HB e o Limite de Resistência de 872MPa.

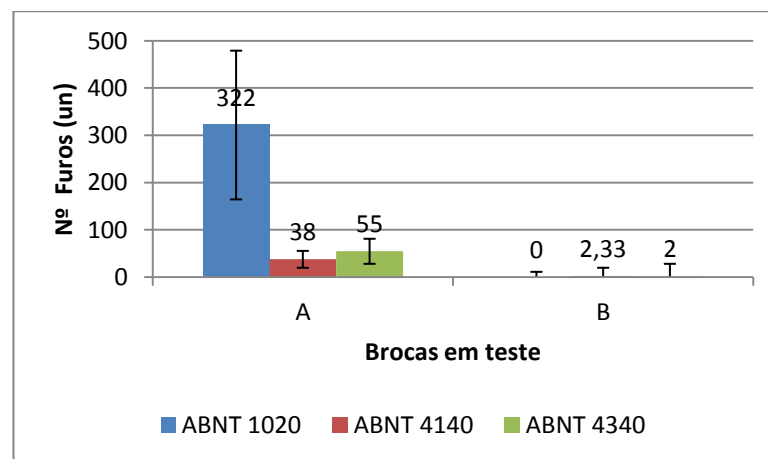
Comparando as médias dos aços. O aço ABNT 1020 apresenta usinabilidade melhor que o aço ABNT 4340, e o aço ABNT 4340 apresenta usinabilidade melhor que o aço ABNT 4140. Pelas médias observa-se que a usinabilidade do aço ABNT 4340 é aproximadamente 32% melhor que a do aço ABNT4140.

5.1.2 A influência da broca no processo de furação

A broca tipo A apresenta um comportamento muito bom no aço ABNT 1020, o que muda completamente ao ser usado nos aços ABNT 4140 e 4340, onde as brocas tipo A têm um comportamento médio, Figura 46. Isto é possivelmente por o aço ABNT 1020 ter o limite de resistência e a dureza mais baixos, o que facilita a ruptura do material para a penetração da broca.

Comparativamente o desempenho da broca tipo A é muito superior em relação à broca tipo B.

Figura 46 Testes com as brocas A e B



Fonte: Elaborado pelo autor

No aço ABNT 1020 não foi feito o teste com a broca B por falta de material. Nos aços ligados, ABNT 4140 e 4340 observa-se claramente que a broca B não deve ter seu uso recomendado para este tipo de material nas condições testadas.

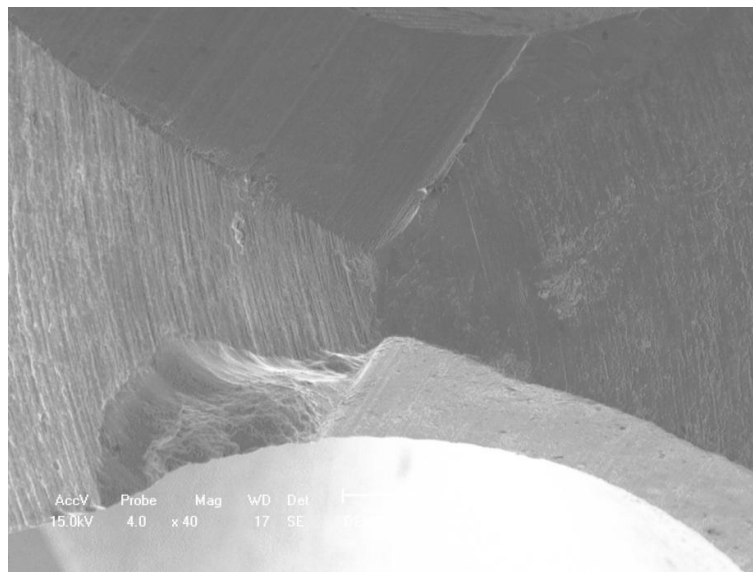
A broca de afiação cônica foi a primeira broca a ser desenvolvida e o seu rendimento é baixo, já a broca de afiação cruzada tem projeto de desenvolvimento mais moderno que possibilita uma redução dos esforços durante a usinagem e ainda tem o revestimento de TiN que também aumenta o seu rendimento associada ao fato de propiciar uma maior vida à ferramenta..

5.1.3 Formas e mecanismos de desgaste

Nesta seção são apresentadas imagens das regiões desgastadas das brocas, através das quais é feita a identificação das formas e dos mecanismos de desgaste predominantes.

Na Figura 47 é mostrado o centro da broca de afiação cruzada TiN, que teve a vida de 174 furos no aço ABNT 1020, onde se nota lascamento na ponta da broca.

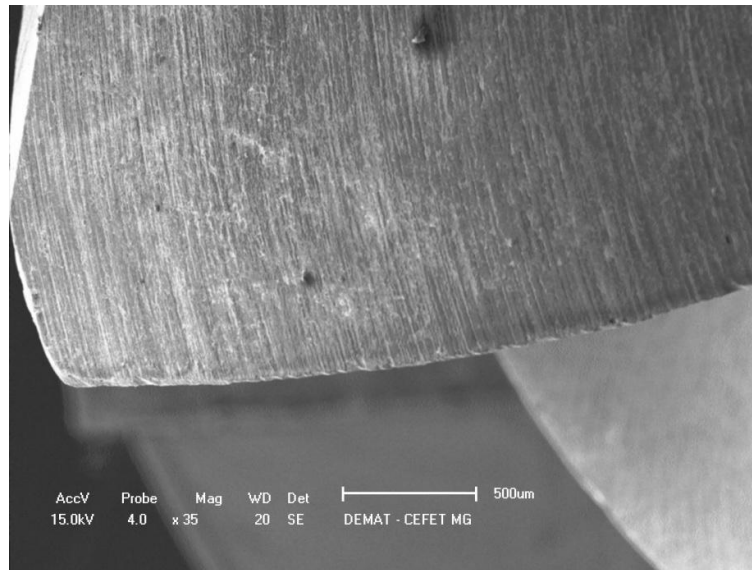
Figura 47 Centro da broca, ampliação 40x



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

Na Figura 48 é mostrada a extremidade da broca de afiação cruzada TiN, que teve a vida de 174 furos no aço ABNT 1020, onde se percebe a ausência de desgaste de flanco.

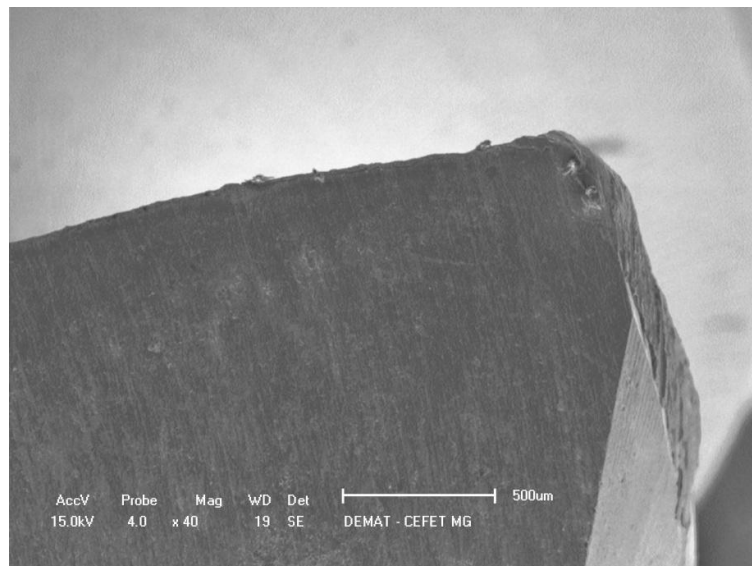
Figura 48 Extremidade da broca ampliação 35x



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

Na Figura 49 é mostrada a extremidade da broca de afiação cruzada com revestimento TiN que teve a vida de 174 furos no aço ABNT 1020, onde se percebe desgaste na guia cilíndrica.

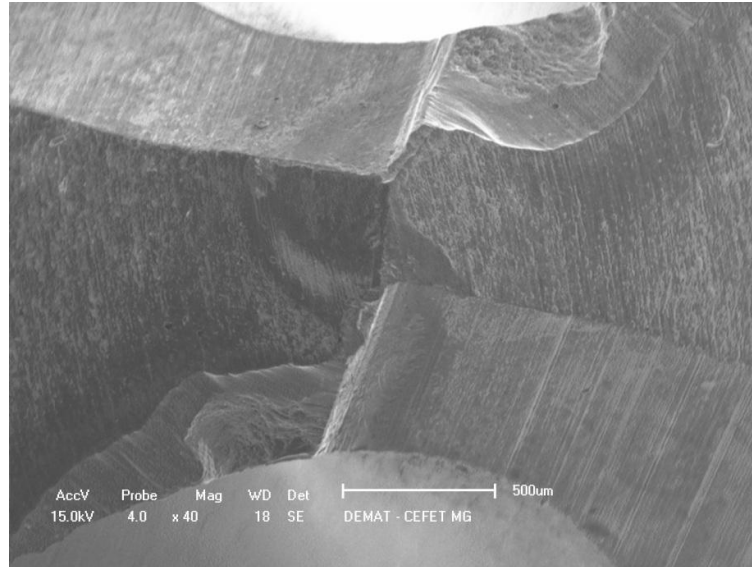
Figura 49 Extremidade da broca, ampliação 40x



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

Na Figura 50 é mostrado o centro da broca de afiação cruzada com revestimento TiN que teve a vida de 487 furos no aço ABNT 1020, onde se percebe lascamento. Ampliações da Figura 50 são mostradas no Anexo D.

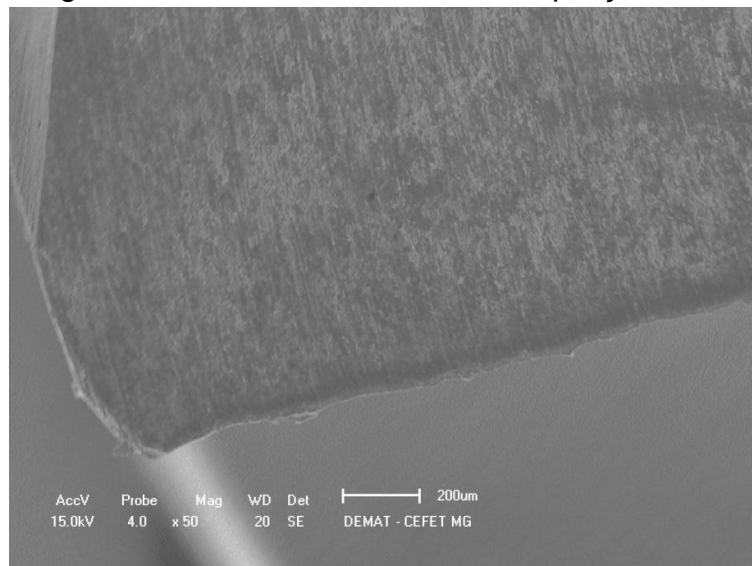
Figura 50 Centro da broca, ampliação 40x



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

Na Figura 51 é mostrada a extremidade da broca de afiação cruzada com revestimento TiN que teve a vida de 487 furos no aço ABNT 1020, onde se percebe ausência de desgaste de flanco.

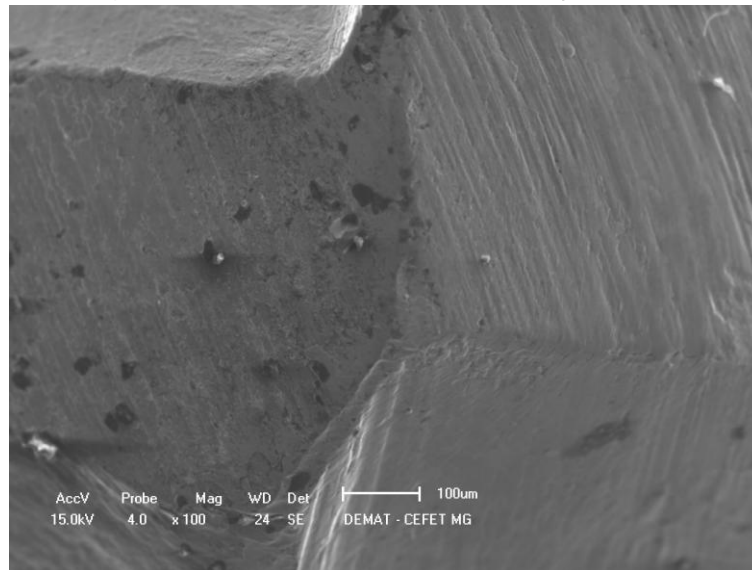
Figura 51 Extremidade da broca, ampliação 50x



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

Na Figura 52 é mostrado o centro da broca de afiação cruzada com revestimento TiN que teve a vida de 304 furos no aço ABNT 1020, onde se percebe lascamento. Ampliação da Figura 52 são mostradas no Anexo E.

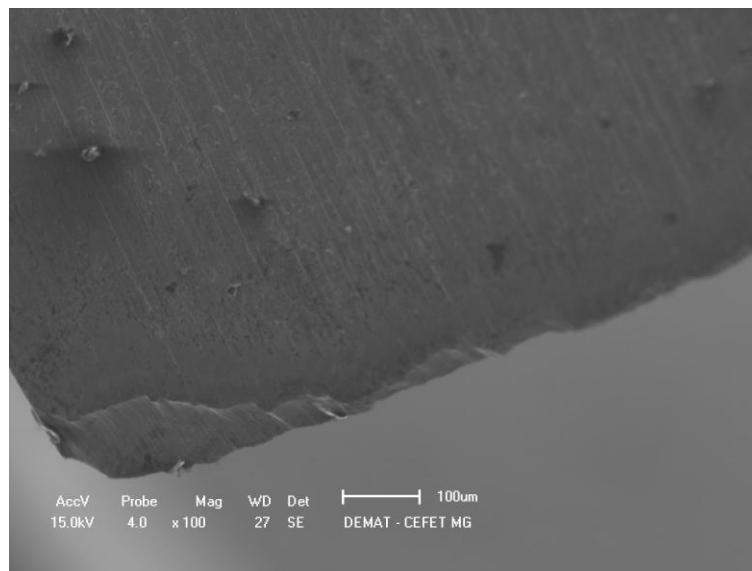
Figura 52 Centro da broca ampliação 100x



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

Na Figura 53 é mostrada a extremidade da broca de afiação cruzada com revestimento TiN que teve a vida de 304 furos no aço ABNT 1020, onde se percebe lascamento.

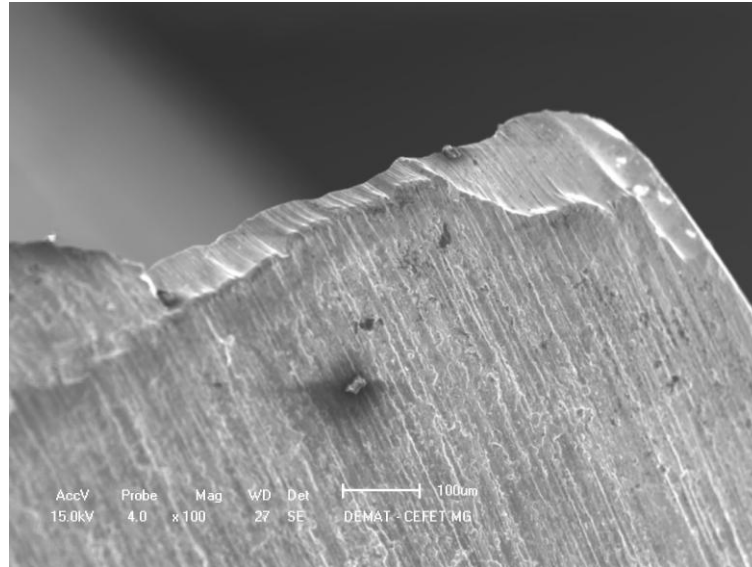
Figura 53 Extremidade da broca. ampliação 100x



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

Na Figura 54 é mostrada a extremidade da broca de afiação cruzada com revestimento TiN que teve a vida de 304 furos no aço ABNT 1020, onde se percebe lascamento e desgaste abrasivo.

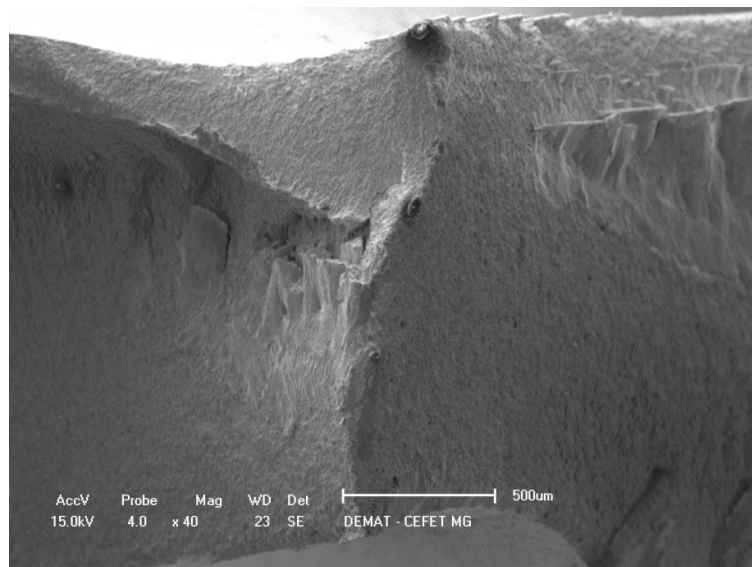
Figura 54 Extremidade da broca, ampliação 100x



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

Na Figura 55 é mostrado o centro da broca de afiação cruzada com revestimento TiN que teve a vida de 31 furos no aço ABNT 4140, onde se percebe lascamento.

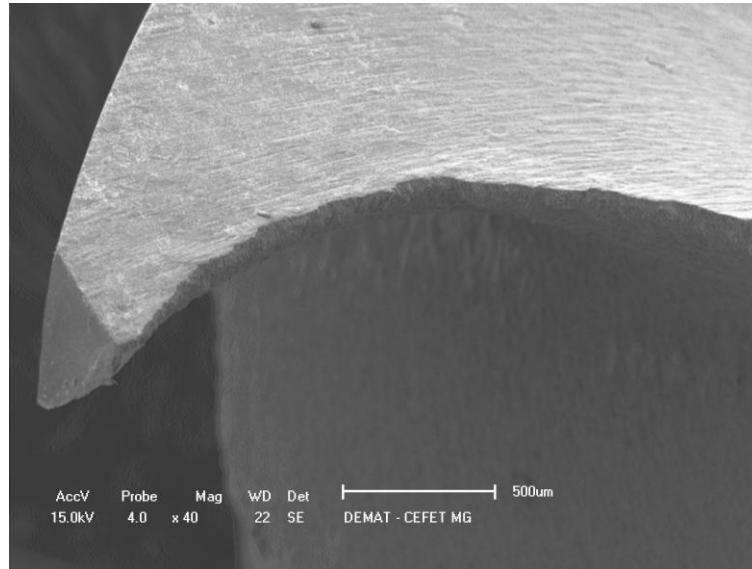
Figura 55 Centro da broca, ampliação 40x



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

Na Figura 56 é mostrada a extremidade da broca de afiação cruzada com revestimento TiN que teve a vida de 31 furos no aço ABNT 4140, onde se percebe pequeno desgaste de flanco.

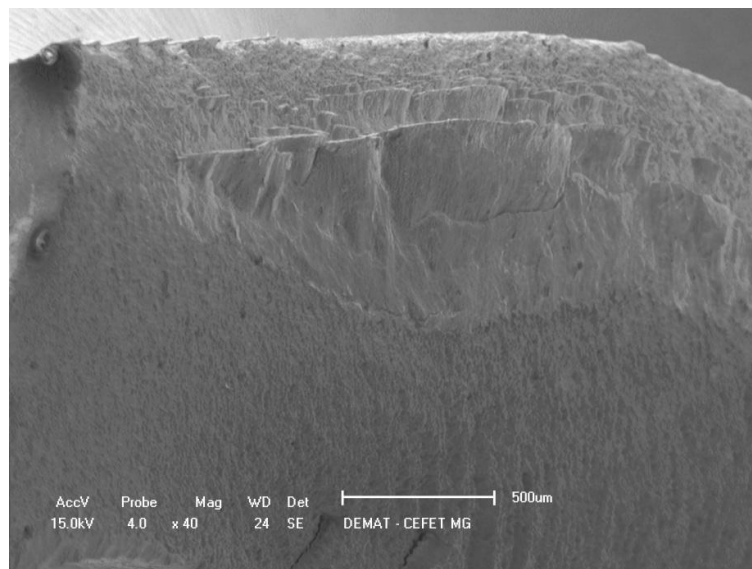
Figura 56 Extremidade da broca, ampliação 40x



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

Na Figura 57 é mostrada a extremidade da broca de afiação cruzada com revestimento TiN que teve a vida de 31 furos no aço ABNT 4140, onde se percebe lascamento na superfície de folga. Ampliação da Figura 57 no Anexo F.

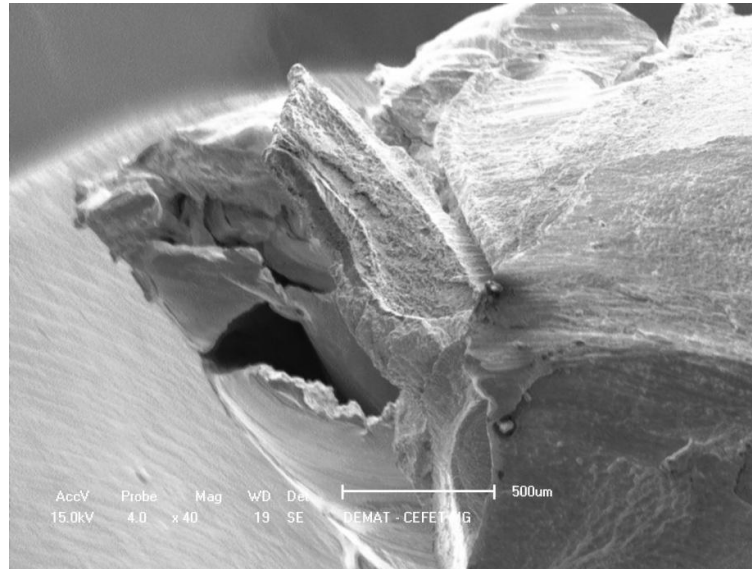
Figura 57 Extremidade da broca, ampliação 40x



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

Na Figura 58 é mostrado o centro da broca de afiação cruzada TiN que teve a vida de 31 furos no aço ABNT 4140, onde se percebe lascamento.

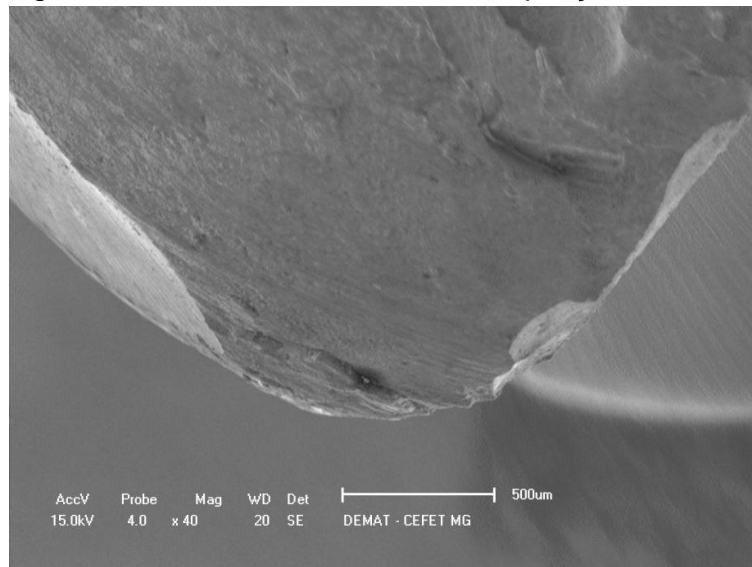
Figura 58 Centro da broca, ampliação 40x



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

Na Figura 59 é mostrado o centro da broca de afiação cruzada TiN que teve a vida de 31 furos no aço ABNT 4140, onde se percebe lascamento.

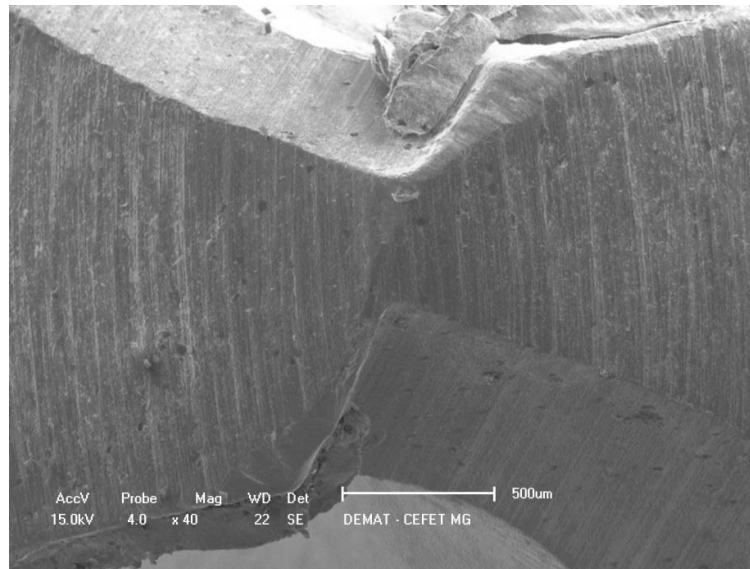
Figura 59 Extremidade da broca, ampliação 40x



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

Na Figura 60, centro da broca de afiação cruzada TiN que teve vida de 54 furos no aço ABNT 4340, se percebe material da peça aderido à broca.

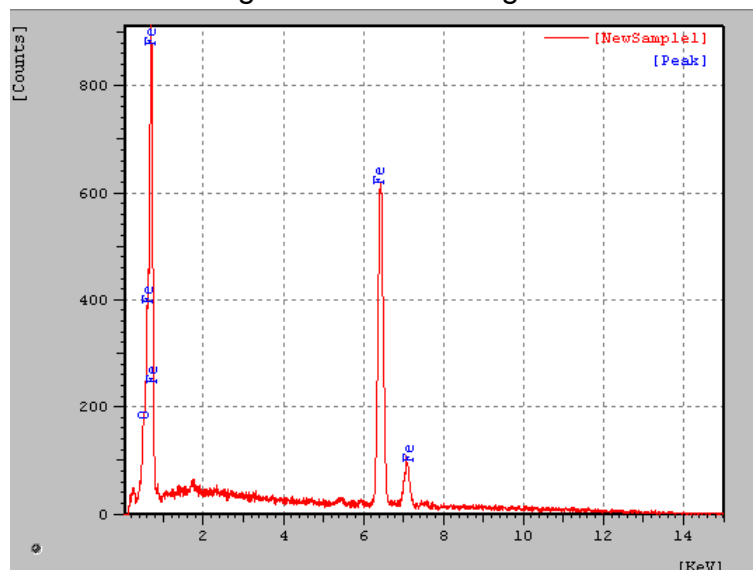
Figura 60 Centro da broca, ampliação 40x



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

Como nesta análise específica há a presença de Fe e O e ausência de Cr, W e Co, característicos da broca de aço rápido, de acordo com Chiaverini (1988, p 333), acredita-se que haja material da peça aderido na ponta da broca.

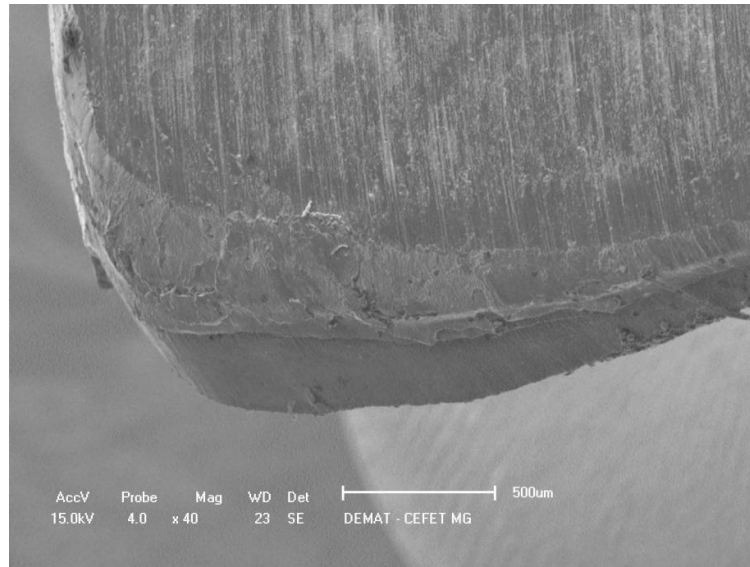
Figura 61 EDS da Figura 60



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

Na Figura 62 é mostrado o centro da broca de afiação cruzada TiN que teve a vida de 54 furos no aço ABNT 4340, onde se percebe desgaste abrasivo e lascamento.

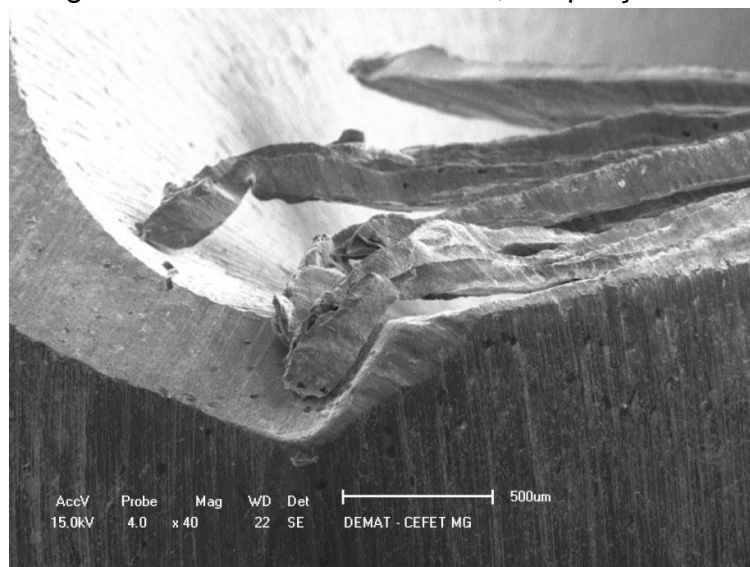
Figura 62 Extremidade da broca, ampliação 40x



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

Na Figura 63 é mostrado o centro da broca de afiação cruzada TiN que teve a vida de 54 furos no aço ABNT 4340, onde se percebe material da peça aderido à broca.

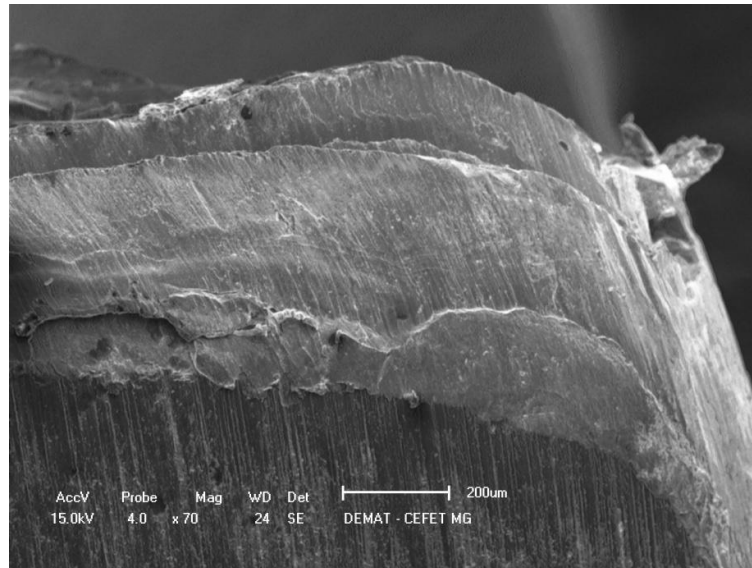
Figura 63 Extremidade da broca, ampliação 40x



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

Na Figura 64 é mostrado o centro da broca de afiação cruzada TiN que teve a vida de 54 furos no aço ABNT 4340, onde se percebe desgaste abrasivo e lascamento. Detalhamento no Anexo G.

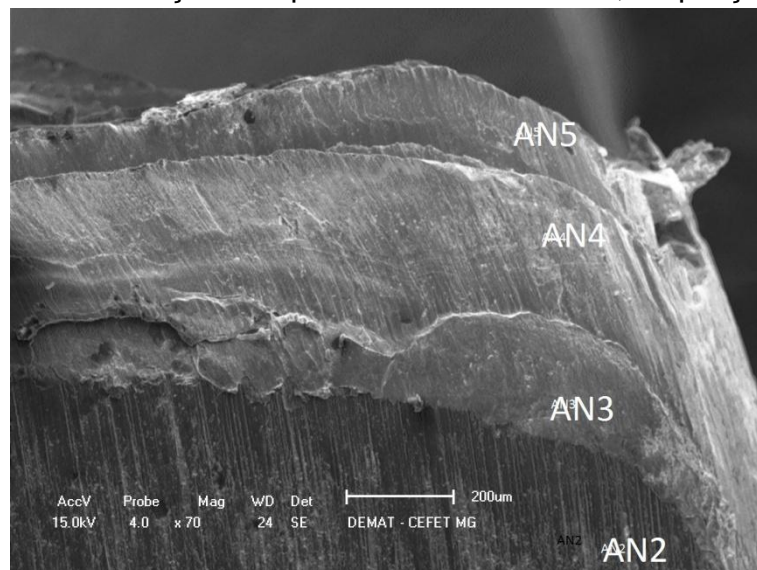
Figura 64 Extremidade da broca, ampliação 70x



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

A Figura 65 indica os pontos onde foram feitos EDS para avaliação detalhada do material da broca e do corpo de prova

Figura 65 Indicação dos pontos de análise EDS, ampliação 70X

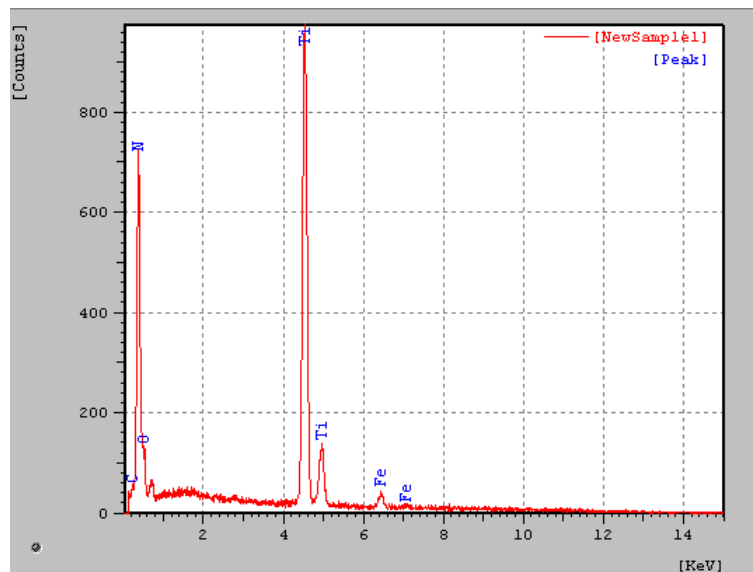


Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

O EDS (energy dispersive x-ray detector, EDX ou EDS) é um acessório essencial no estudo de caracterização microscópica de materiais. Quando o feixe de elétrons incide sobre um mineral, os elétrons mais externos dos átomos e os íons constituintes são excitados, mudando de níveis energéticos. Ao retornarem para sua posição inicial, liberam a energia adquirida a qual é emitida em comprimento de onda no espectro de raios-x. Um detector instalado na câmara de vácuo do MEV mede a energia associada a esse elétron. Como os elétrons de um determinado átomo possuem energias distintas, é possível, no ponto de incidência do feixe, determinar quais os elementos químicos estão presentes naquele local e assim identificar em instantes que mineral está sendo observado.

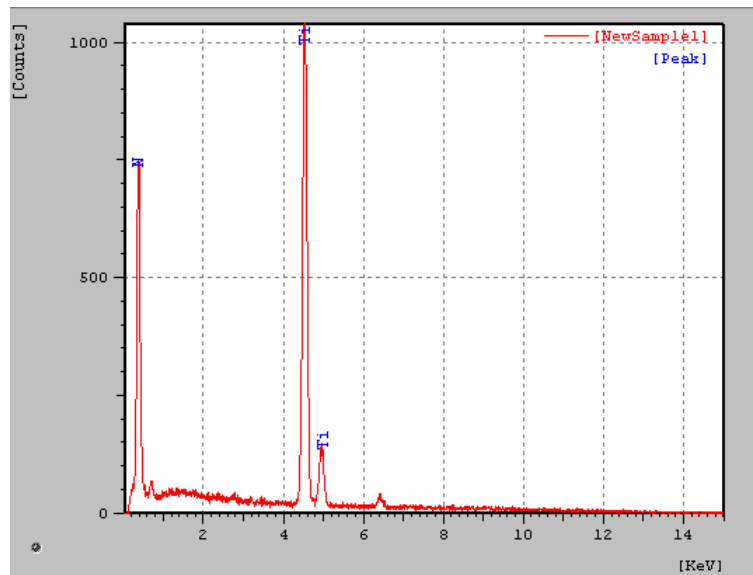
As Figuras 66 e 67 indicam no ponto AN2 e AN3 da figura 60 maior presença de N e Ti, o que possivelmente é somente material de revestimento da broca.

Figura 66 EDS no ponto AN2 da Figura 60



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

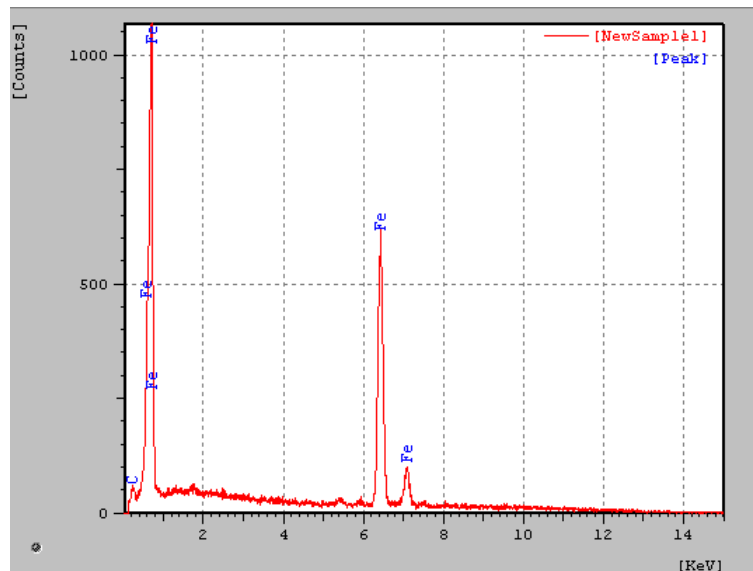
Figura 67 EDS no ponto AN3 da Figura 60



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

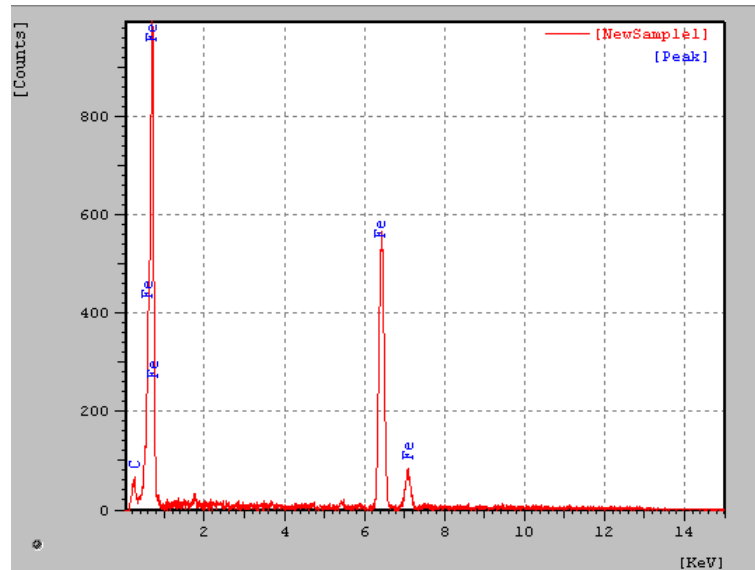
As Figuras 68 e 69 indicam no ponto AN4 e AN5 da figura 60 maior presença de Fe, o que possivelmente é de material da peça em aderido à broca.

Figura 68 EDS no ponto AN4 da Figura 60



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

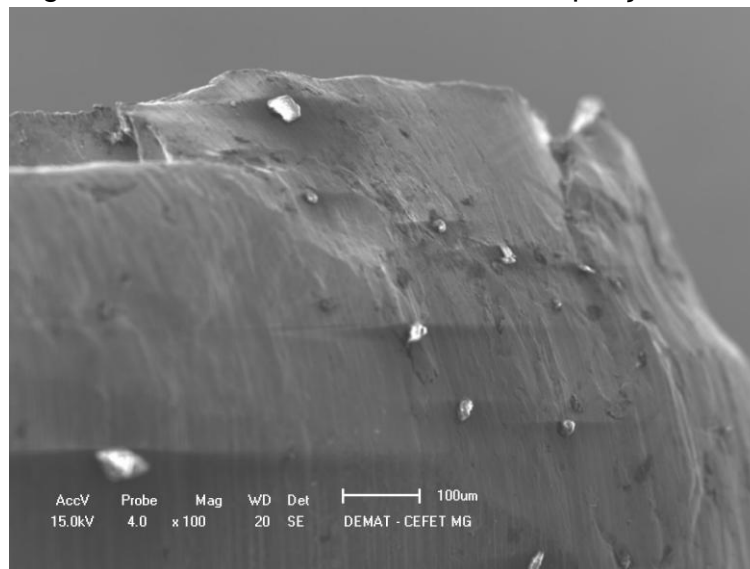
Figura 69 EDS no ponto AN5 da Figura 60



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

Na Figura 70 é mostrado o centro da broca de afiação cruzada TiN que teve a vida de 49 furos no aço ABNT 4340, onde se percebe a aresta de corte da broca desgastada.

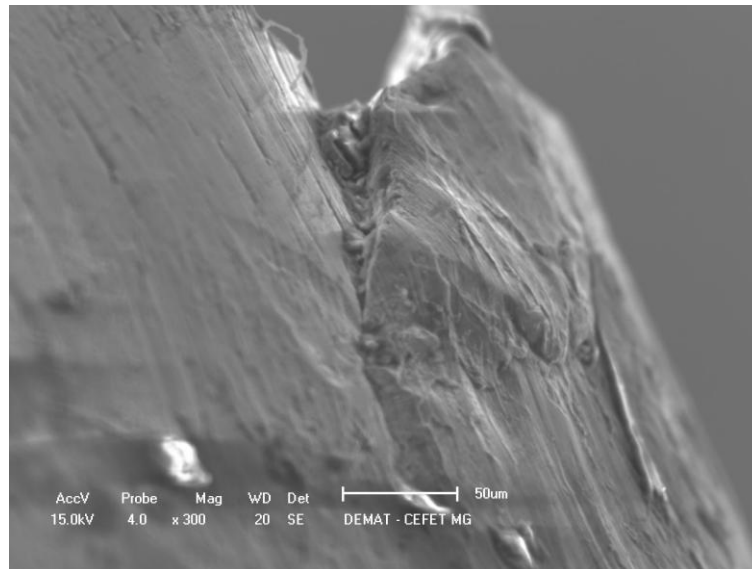
Figura 70 Aresta de corte da broca, ampliação 100x



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

Na Figura 71 é mostrado o detalhamento da Figura 70 onde se percebe deformação acentuada das guias.

Figura 71 Detalhe da Figura 70, ampliação 300x



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

Na Figura 72 é mostrado o centro da broca de afiação cruzada TiN que teve a vida de 63 furos no aço ABNT 4340, onde se percebe falha catastrófica com deformação da ponta da broca.

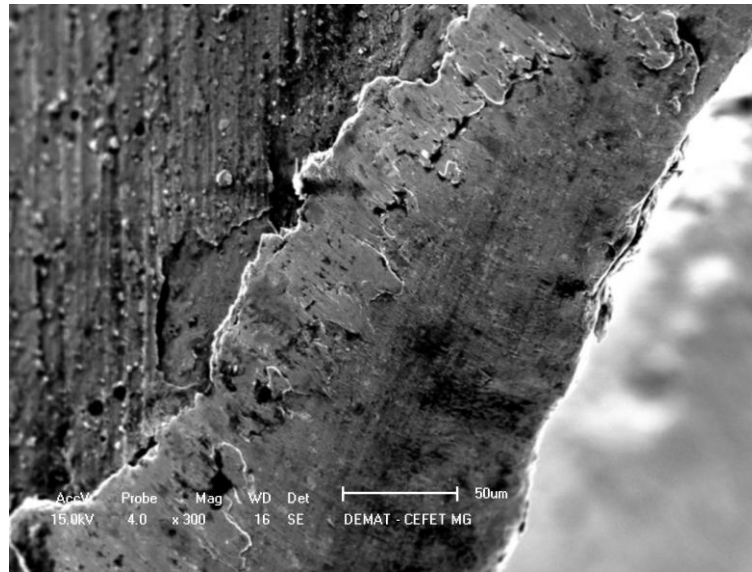
Figura 72 Centro da broca, ampliação 100x



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

Na Figura 73 é mostrada a ampliação da Figura 72, onde se percebe material aderido à broca.

Figura 73 Detalhe da Figura 72, ampliação 300x



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

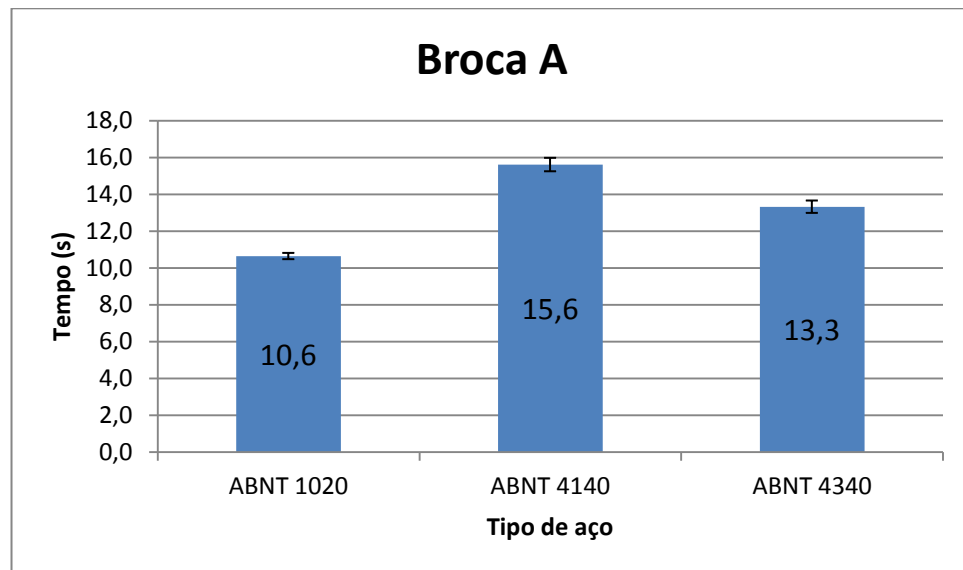
Constata-se que houve grande incidência de lascamento e de material aderido à broca, que também contribui para o lascamento. Esta incidência de lascamento contribuiu para a variabilidade de vida das brocas, pois o lascamento ocorre de modo abrupto, ao contrário das demais formas de desgaste, como desgaste de flanco e de cratera que obedecem a um comportamento regular.

5.2 Ensaio de furação com pressão constante

5.2.1 *Influência do material da peça no processo de furação*

Constata-se, na Figura 74 que a broca A teve um resultado melhor no aço ABNT 1020, seguido do aço ABNT 4340 e por último o aço ABNT 4140.

Figura 74 Ensaio de furação com pressão constante para os aços ABNT 1020, 4140 e 4340



Fonte: Elaborado pelo autor

5.2.2 Influência da geometria da broca

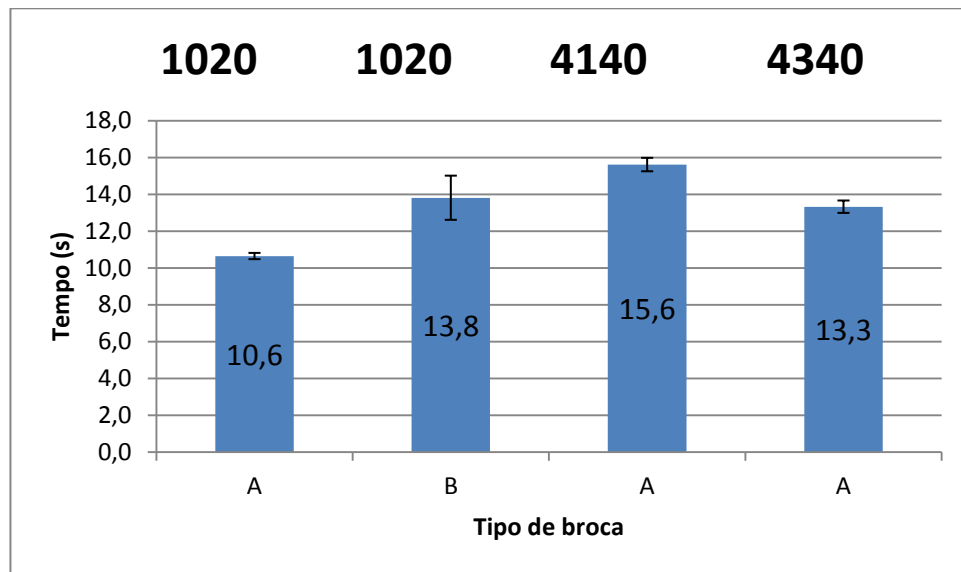
Na Figura 75 constata-se que no aço ABNT 1020, a broca A apresenta melhor desempenho que a broca B, o que é coerente com o resultado do ensaio de furação convencional. Isto ocorre devido à dureza e o limite de resistência do aço ABNT 1020 serem mais baixos o que facilita a penetração da broca no material da peça e o processo de corte.

Importante destacar que a broca A teve um comportamento melhor no aço ABNT 4340 do que no aço ABNT 4140. O que é coerente com os resultados dos testes dos ensaios convencionais (ensaio de vida) onde as brocas B não fizeram mais que dois furos nos aços ABNT 4140 e ABNT 4340.

O aço ABNT 4340 ter tido um rendimento melhor que o aço ABNT 4140 se deve possivelmente ao percentual maior de elementos de liga Cr e Mn no aço ABNT 4140, porque o Cr atribui maior resistência ao desgaste e o Mn aumenta a endurecibilidade.

Para os aços ABNT 4140 e 4340, como a broca B não fez mais que 3 furos no material ficou inviável a análise no ensaio de furação a pressão constante.

Figura 75 Ensaio de furação com pressão constante para as brocas A e B

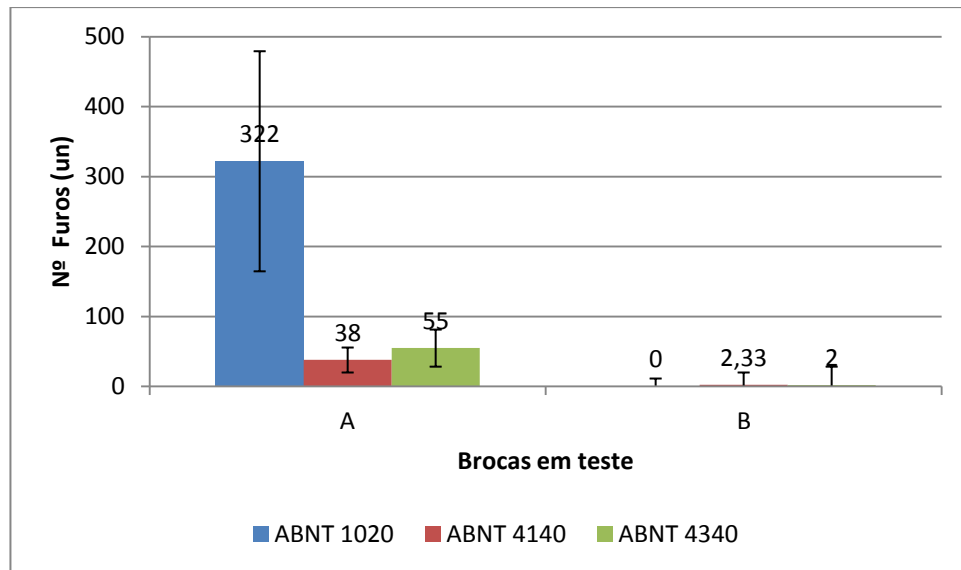


Fonte: Elaborado pelo autor

5.3 Comparação do ensaio de furação convencional com o ensaio de furação a pressão constante

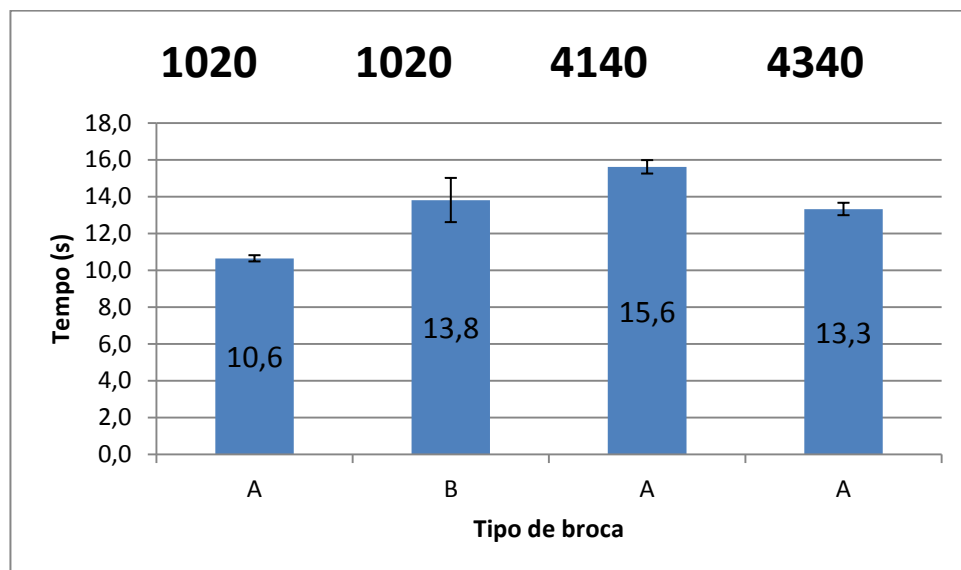
Comparando o ensaio de furação convencional com o ensaio de furação à pressão constante com relação ao tipo de broca (Figuras 76 e 77) constata-se que há coerência entre os dois resultados, a broca A teve um rendimento alto em relação ao número de furos (322 furos) e em relação ao tempo de usinagem (10,6 s) e constatou-se, também, que o aço ABNT 4340 teve um comportamento melhor nos dois ensaios, do que o aço ABNT 4140.

Figura 76 Testes com as brocas A e B



Fonte: Elaborado pelo autor

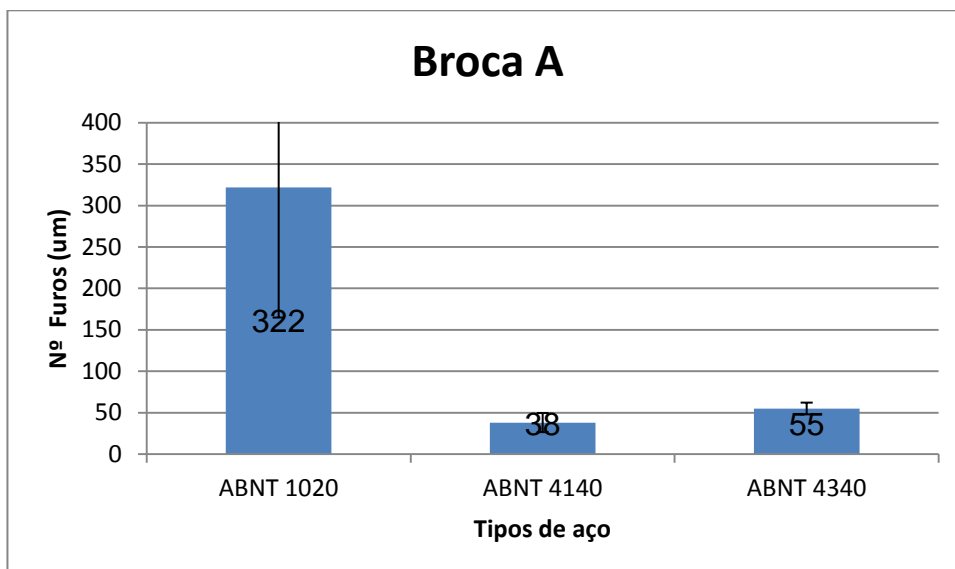
Figura 77 Ensaio de furação com pressão constante para as brocas A e B



Fonte: Elaborado pelo autor

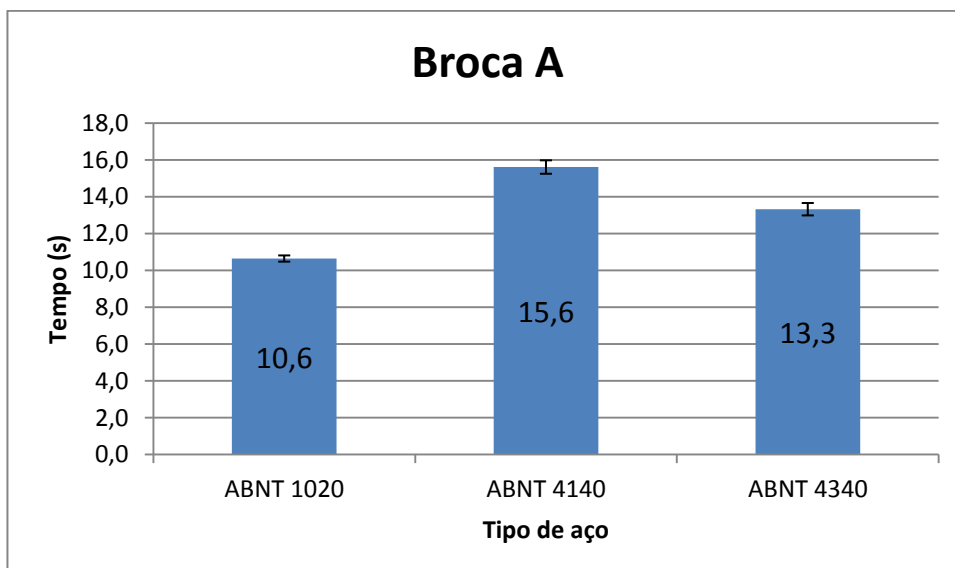
Na análise da influência do material no processo de usinagem constata-se que no ensaio de furação convencional, assim como no ensaio de curta duração a broca A teve o mesmo comportamento, ou seja, melhor rendimento para o aço ABNT 1020, segundo melhor rendimento para o aço ABNT4340, como é mostrado nas figuras 78 e 79.

Figura 78 Ensaio de furação convencional para os aços
ABNT 1020, 4140 e 4340



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 79 Ensaio de furação com pressão constante para a
broca A



Fonte: Elaborado pelo autor

Na análise da influência da geometria da broca os resultados dos ensaios de furação a pressão constante, foram compatíveis com os dos ensaios de furação convencional (ensaios de vida).

Com base nestes resultados, recomenda-se que o estudo do ensaio de furação a pressão constante possa ser aprofundado para, em situações específicas viabilizar sua utilização em alguns tipos de ensaios convencionais.

5.4 Outros ensaios de curta duração

Como o ensaio de usinabilidade com aplicação de pressão constante gerou resultados que permitiram a identificação de diferença de usinabilidade entre os materiais ensaiados e também da influência de tipo de broca, optou-se por utilizar o ensaio de usinabilidade com aplicação de pressão constante para o estudo da influência de um número maior de brocas.

5.4.1 Comparação geral

Para análise do comportamento das brocas nos ensaios de furação com pressão constante foi montada a Tabela 11 que apresenta o ângulo da ponta da broca, o tipo de afiação feita, o material do corpo da broca e se a mesma foi tratada com algum revestimento.

Tabela 11 Características das brocas utilizadas

	A	B	C	D	E	F	G
Ângulo da ponta	118	120	118	118	135	130	130
Afiação	Cruzada	Cônica	Cruzada	Especial	Cruzada	Especial	Especial
Material	Aço rápido	Aço rápido	Aço rápido	Metal duro	Aço inoxidável	Aço rápido	Aço rápido
Cobertura	TiN na ponta	Sem cobertura	TiN na ponta	Sem cobertura	Sem cobertura	TiN toda hélice	Sem cobertura

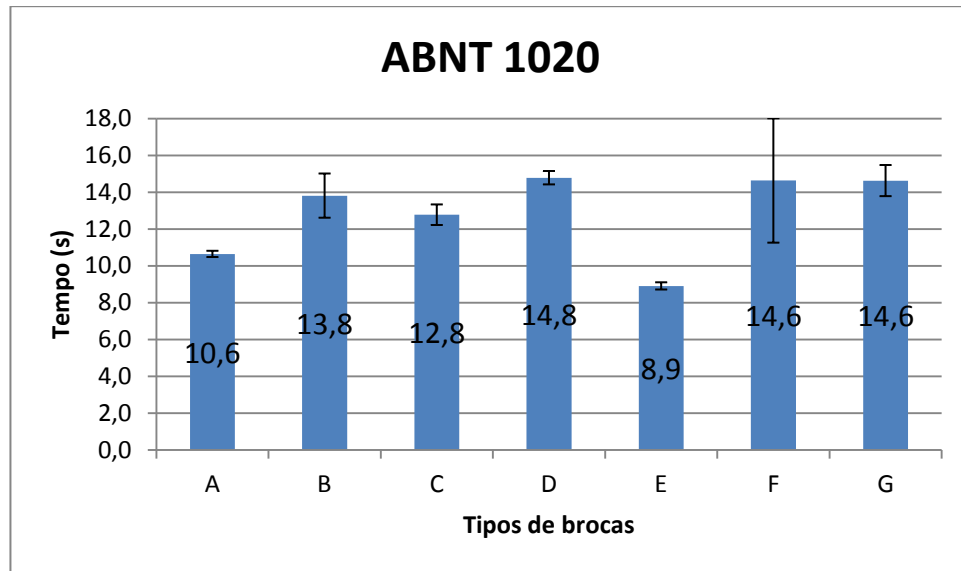
Fonte: Elaborada pelo autor

A broca F, seguida da broca C e da broca E obtiveram os melhores tempos de usinagem, no aço ABNT 1045. Outro tempo bom foi da broca E no aço ABNT 1020 e da broca C no aço ABNT 4340.

Na Figura 80, observa-se que a broca E teve um melhor rendimento, com um tempo de 8,9 segundos, seguida da broca A. As brocas D, F e G tiveram rendimento

pior para o aço ABNT 1020. Este baixo rendimento possivelmente está relacionado com o tipo de afiação das brocas, pois somente as brocas com afiação especial tiveram este rendimento.

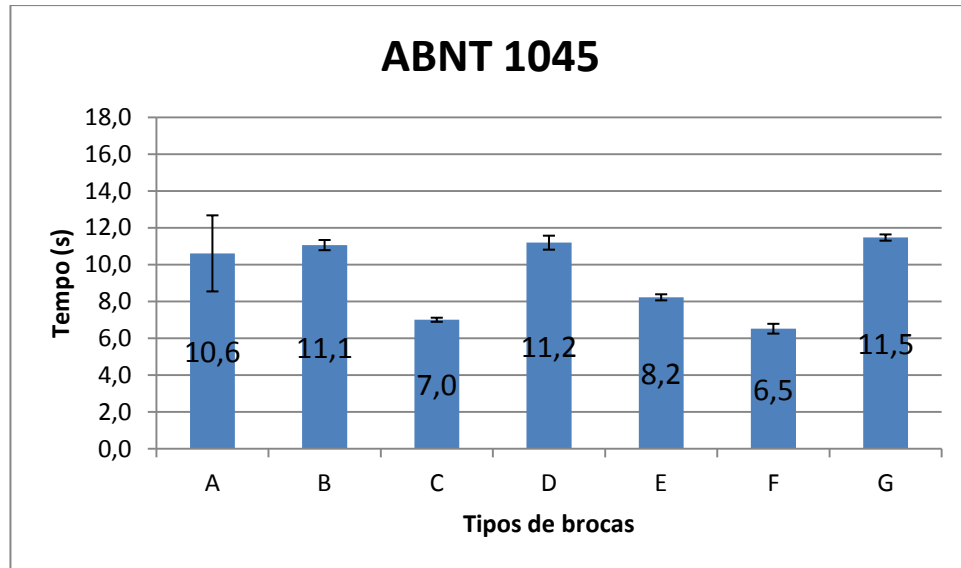
Figura 80 Ensaio com furação a pressão constante para o aço ABNT 1020



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 81 a broca F teve o melhor rendimento, seguida das brocas C e E. Para o aço ABNT 1045, a broca com o pior rendimento foi a broca G. O aço ABNT 1045 apresentou uma média de tempo de furação mais baixo em relação aos outros materiais.

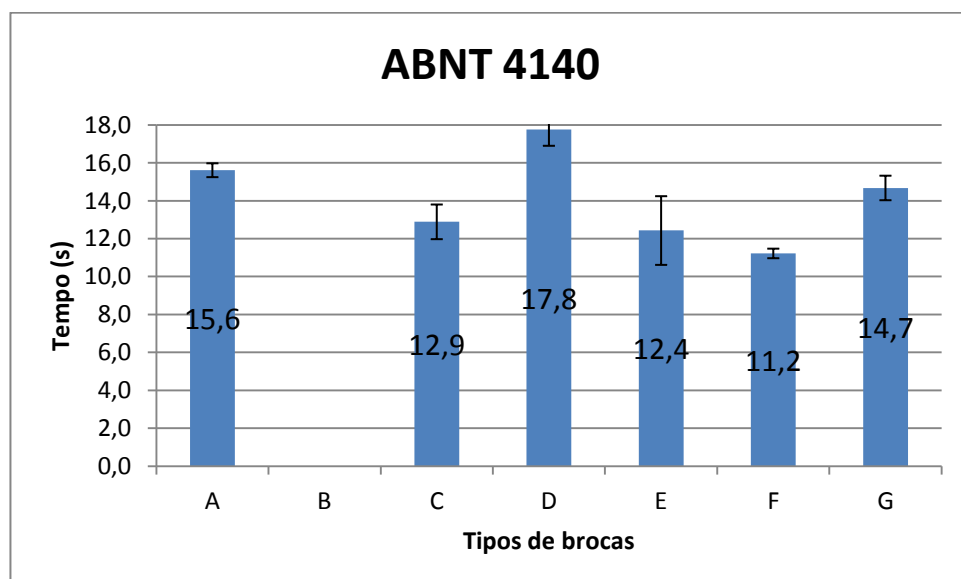
Figura 81 Ensaio com furação a pressão constante no aço ABNT 1045



Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 82 observa-se que a broca F obteve o melhor rendimento. As outras brocas tiveram um rendimento ruim, considerando os aços ABNT 1020, 1045 e 4340. A broca B não conseguiu efetuar os 10 furos do ensaio. O baixo desempenho da broca D se deve possivelmente à composição química do aço ABNT 4140 com um percentual representativo de Mn e Cr aliado ao tipo de afiação.

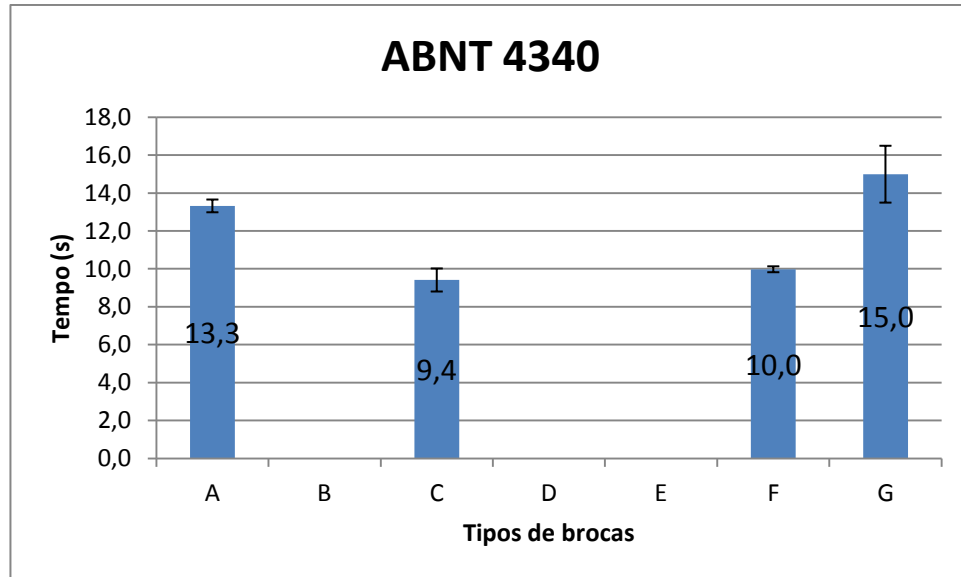
Figura 82 Ensaio de furação com pressão constante no aço ABNT 4140



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 83 observa-se que a broca C obteve o melhor rendimento, seguida da broca F. As broca A e G não obtiveram bom resultado. As brocas B, D e E não conseguiram realizar os 10 furos para o teste.

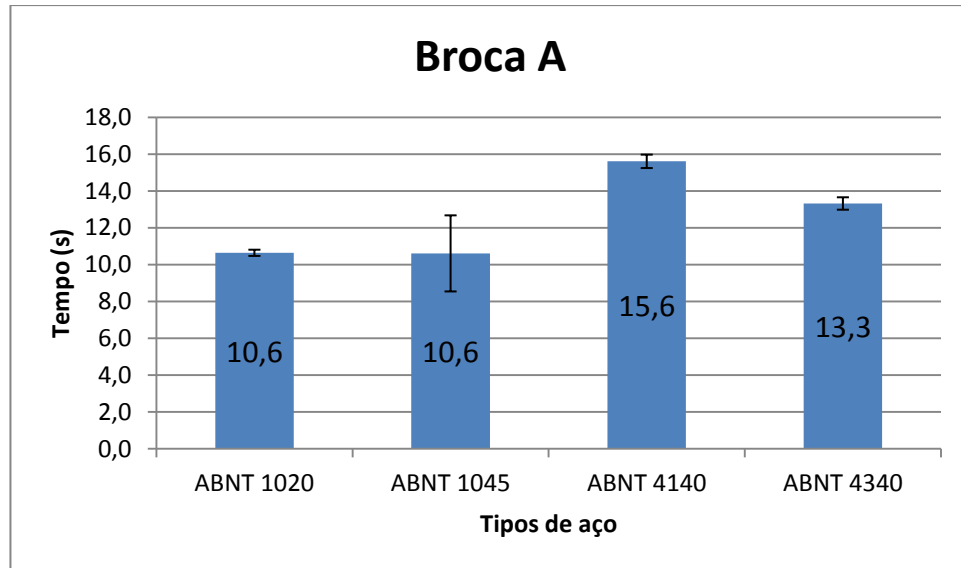
Figura 83 Ensaio com furação a pressão constante no aço ABNT 4340



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 84 observa-se que a broca A teve o mesmo rendimento para os aços ao carbono, e obteve um rendimento melhor para o aço ABNT 4340 do que para o aço ABNT 4140. É possível que a coincidência de valores seja devido a alguma incrustação no aço ABNT 1045, gerando um grande desvio padrão igualando o valor com o aço ABNT 1020.

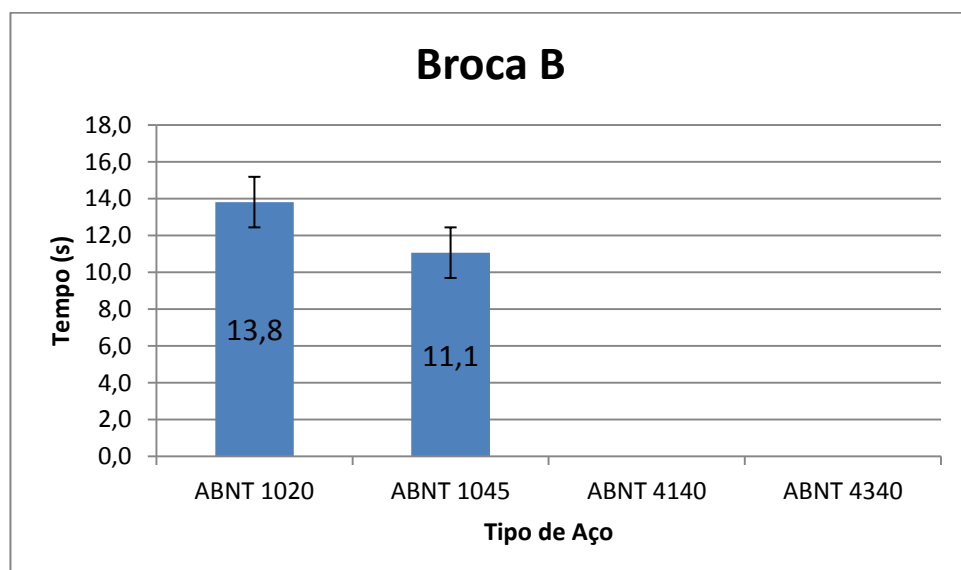
Figura 84 Ensaio com furação a pressão constante Broca A



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 85, observa-se que a broca B teve um rendimento melhor no aço ABNT 1045 e que esta broca não conseguiu realizar o ensaio para os aços ligados. A justificativa da melhor usinabilidade do aço ABNT 1045 se deve possivelmente ao percentual de P (fósforo) na sua composição, que duza vezes maior que a do anço ABNT 1020, o P aumenta a usinabilidade do metal.

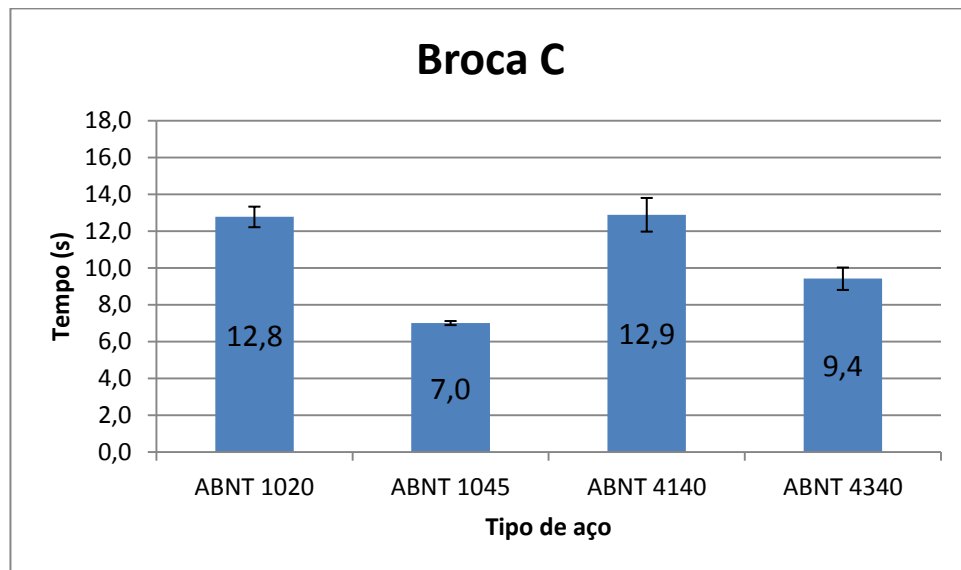
Figura 85 Ensaio com furação a pressão constante broca B



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 86 observa-se que a broca C obteve um excelente resultado no aço ABNT 1045, seguida de um bom resultado no aço ABNT 4340 e que nos aços ABNT 1020 e 4140 obteve um resultado mediano. Para o aço ABNT 1045 acredita-se que o baixo percentual de Cr e Mn aliado ao alto teor de Cu e de P (fósforo) tenham contribuído para a melhoria da usinabilidade.

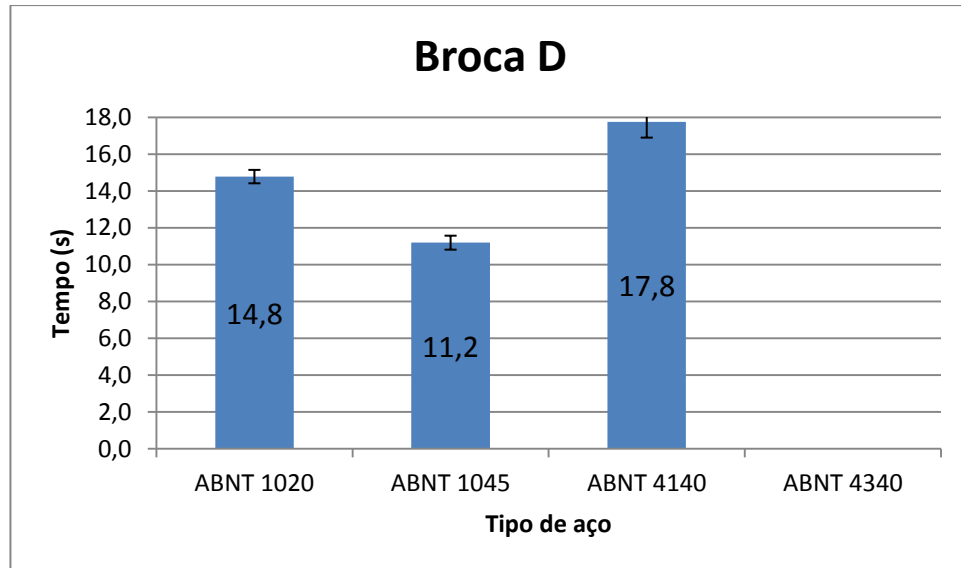
Figura 86 Ensaio com furação com pressão constante broca C



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 87 observa-se que a broca D teve um bom resultado no aço ABNT 1045, um resultado ruim no aço ABNT 1020 e o pior resultado de todos os testes no aço ABNT 4140.

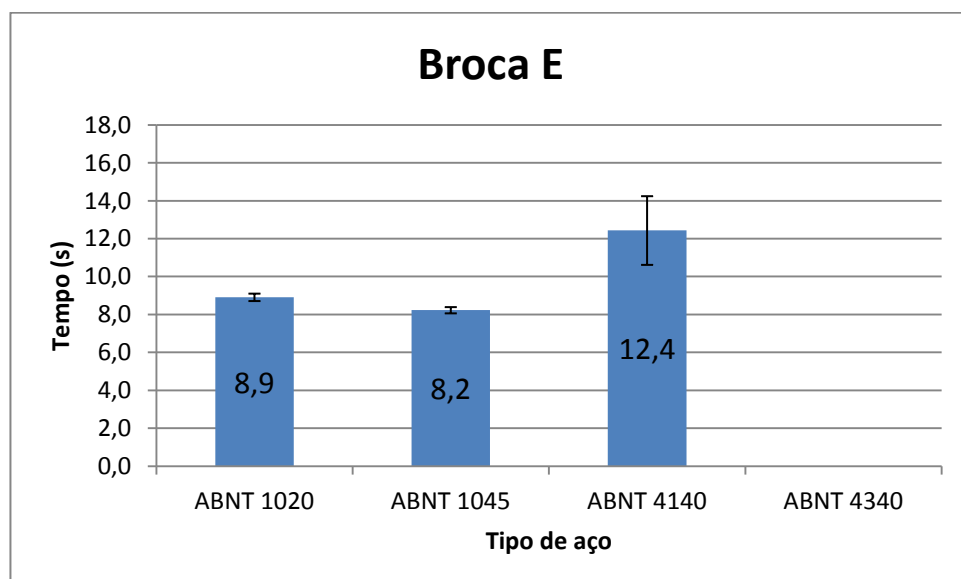
Figura 87 Ensaio com furação com pressão constante broca D



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 88 observa-se que a broca E obteve um bom resultado no aço ABNT 1045, seguido do aço ABNT 1020 e um resultado mediano para o aço ABNT 4140. A broca E não conseguiu efetuar os 10 furos para teste no aço ABNT 4340. O rendimento da broca E se justifica por ser uma broca sem cobertura de TiN o que atribuiria uma maior resistência.

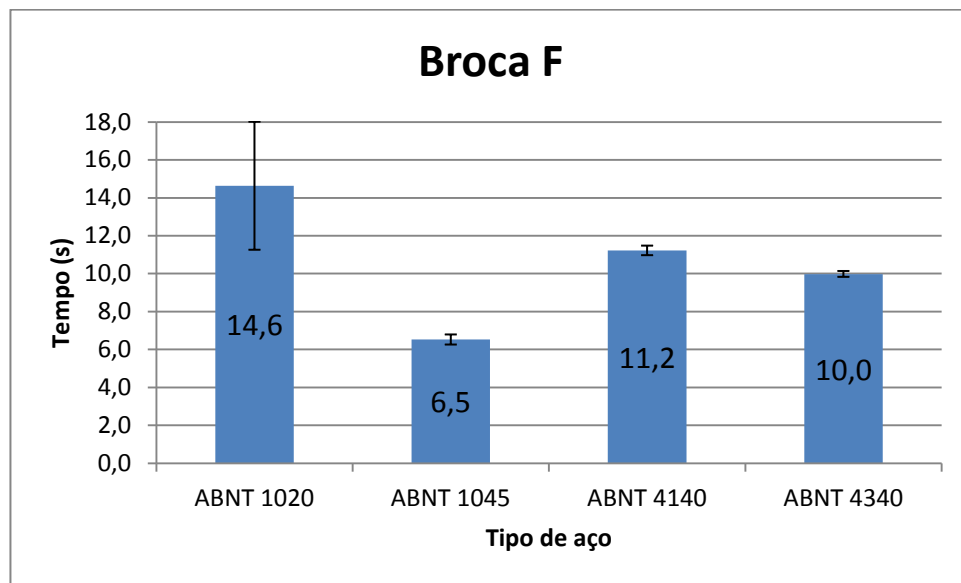
Figura 88 Ensaio com furação com pressão constante broca E



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 89 observa-se que a broca F obteve o melhor resultado de todos os testes no aço ABNT 1045, obteve resultado mediano para os aços ABNT 4340 e 4140 e um péssimo resultado para o aço ABNT 1020. O comportamento das brocas F (Figura 89) e G (Figura 90) no aço ABNT 1020 apresentou desvio padrão alto, possivelmente o tipo de afiação não seja adequado para furação nesta faixa baixa de dureza (111 HB).

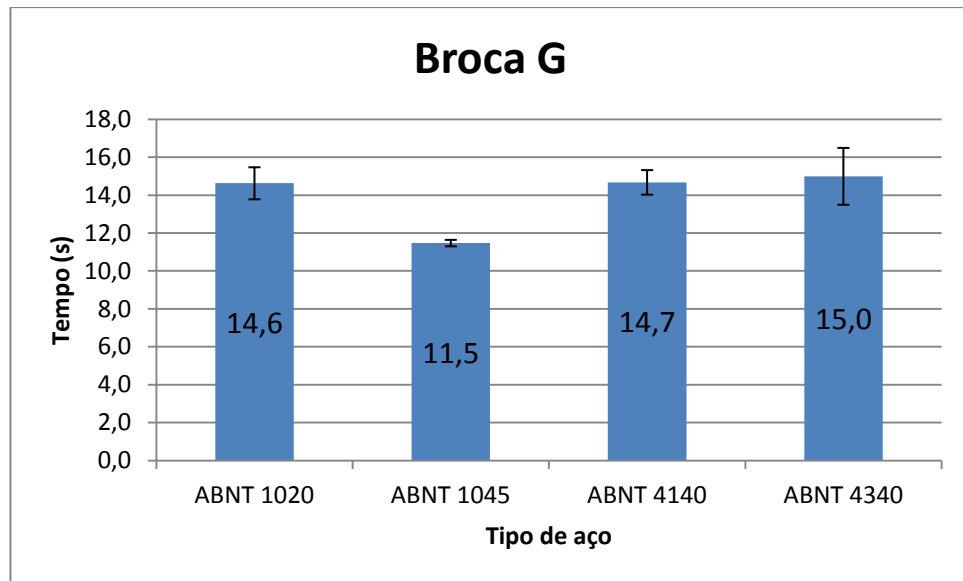
Figura 89 Ensaio com furação com pressão constante broca F



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 90 observa-se que a broca G teve um resultado médio para o aço ABNT 1045 e um resultado ruim para os outros materiais, comparado com a broca F.

Figura 90 Ensaio com furação com pressão constante broca G



Fonte: Elaborado pelo autor

5.4.2 Influência do revestimento ao longo da hélice para as brocas A e C

Nas Figuras 84 e 86 observa-se que a broca C obteve um rendimento melhor para os aços ABNT 1045, 4140 e 4340. Como o revestimento da broca C é um pouco maior que o da broca A, sugere-se que para o mesmo tipo de broca a extensão do revestimento interfere positivamente.

5.4.3 Influência do revestimento nas brocas F e G

Nas Figuras 89 e 90 observa-se que a broca F obteve um rendimento melhor para os aços ABNT 1045, 4140 e 4340 e rendimento igual para o aço ABNT 1020. Como a broca F tem toda hélice revestida e a broca G não, sugere-se que para o mesmo tipo de broca o revestimento interfere positivamente no rendimento.

6 CONCLUSÕES

O ensaio de furação a pressão constante apresenta potencial tendência de ser utilizado em substituição do ensaio de vida ou ensaio convencional, mas para isto recomenda-se a realização de novos testes ratificando os resultados encontrados.

Conforme esperado o aço ABNT 1020 apresenta usinabilidade superior aos aços ABNT 4140 e 4340 em relação à vida da broca em furos e ao tempo de furação em segundos, na faixa de velocidade estudada. No entanto foi percebido que o aço ABNT 4340 apresentou usinabilidade superior ao aço ABNT 4140, isto possivelmente devido à composição química dos mesmos.

A forma de desgaste predominante foi o lascamento da aresta de corte ocorrida nos ensaios de furação convencional.

A combinação da composição química interfere diretamente na usinabilidade dos materiais.

O tipo de afiação da broca, combinando com o ângulo da ponta e a inclusão ou não de revestimento interferem diretamente na vida das brocas.

6.1 Sugestão para trabalhos futuros

Realizar ensaios de furação convencional e ensaios de furação a pressão constante em outros tipos de aço, utilizando brocas revestidas e não revestidas, com o uso de fluido de corte. Estes ensaios são para ratificar os resultados obtidos nesta dissertação.

Realizar ensaios de furação a pressão constante com brocas com características diferentes, aplicando fluido de corte., visando dar continuidade neste estudo.

Realizar ensaios de furação a pressão constante nos aços para moldes de diversos fabricantes e com características mecânicas diferentes. A fabricação de moldes tem uma demanda muito grande e a furação é um dos principais itens na sua fabricação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, Heraldo José. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 131f. Dissertação (Mestrado). Engenharia Mecânica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Rio Grande do Sul.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6175**: Processos mecânicos de usinagem. Rio de Janeiro, 1971.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6163**: Processos mecânicos de usinagem. Rio de Janeiro, 1990.

ASM International. Handbook Comitee. Metal Handbook: **machining prepared under the direction of the ASM International**. 9 ed. Metals Park, Ohio: Hadbook Committee, 1989.

CALLISTER JR, Willian D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. T Ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 2008. 705 p.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 6 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1988. 576 p.

FERRARESI, Dino. **Fundamento da usinagem dos metais**. 6 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1976. 751 p.

GONÇALVES, M. T. T. **Desgaste e vida das brocas de corte**. Disponível em <[Http://www.itapeva.unesp.br/docentes/tadeu/\[081911090820\]CAP%201%20%20%20Desgaste.pdf](http://www.itapeva.unesp.br/docentes/tadeu/[081911090820]CAP%201%20%20%20Desgaste.pdf)>. Acesso em: 27 set. 2011.

INTERMÁQUINAS. Comércio de Máquinas e Equipamentos Ltda. COSA. **Manual de Programação e Operação**. Centro de Usinagem. Fanuc Série Oi. Disponível em <http://www.cosa.com.br/manuais/centro_usinagem1.pdf> Acesso em 04 jan 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3685**: Tool-life testing with single-point turning tools. Geneve, 1993.

KANAI, M. KANDA, Y., 1979, “**Statistical Characteristics of Drill Wear and Drill Life for the Standardized Performance Tests**”. Annals of the CIRP, pp. 61 – 66.

LIN, C. KANG, S. K. EHMANN, K. F. Helical micro-drill point desing and grinding. **Journal of Engineering for Industry**., v. 117, p. 277-287, ago. 1995.

LOPES, José A. Esquerdo. **Resistência mecânica dos Materiais**. Apostila de Resistência dos Materiais. FATEC.-SO. Sorocaba – SP. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/57154859/RESISTENCIA-MECANICA-MATERIAIS-PROF-ESQUERDO>. Acesso em 05 mar 2013.

MANROD, Quality Machines. **Catálogo**. Furadeira Fresadora de Bancada com correia MR200. Disponível em: <HTTP://WWW.manrodqualitymachines.com.br/produto.asp?produto=14>. Acesso em: 12 mar 2013.

MARCONDES, Francisco Carlos. **A história do metal duro**. 1ed. Brasil: CPA Consultoria de Projetos e Artes Ltda, Unida Artes Gráficas e Editora Ltda, 1990. 234 p.

MCGEOUGH J. A. **Advanced methods of machining**. 1 ed. London: Chapman and Hall Ltd, 1988. 247 p.

MILLS, B. AND REDFORD, A.H. **Machinability of engineering materials**. England: Applied Science Publishers, 1983. 174 p.

NOVASKI, O. **Contribuições ao Processo de Furação com Brocas Helicoidais**. 1996. 131f. Tese (livre docência) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – São Paulo.

SANTOS, S. C. **Proposta de padronização do ensaio de usinabilidade com aplicação de pressão constante**. 2005. 17f. Projeto FAPEMIG. DAEM Centro Federal de Educação Tecnológica – Minas Gerais, Departamento Acadêmico de Engenharia mecânica.

SANTOS, Sandro C. **Estudo da influência de revestimentos e da aplicação de fluido de corte no desempenho de brocas de aço-rápido e de metal duro integral na usinagem de ferro fundido cinzento**. 2002. 200f. Tese (Doutorado) – Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – Minas Gerais.

SANTOS, Sandro Cardoso. SALES, Wisley Falco. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. 1 ed. São Paulo: Actiliba, 2007. 246 p.

STEMMER, CASPAR E. **Ferramentas de corte I**. 3 ed. Florianópolis: EdUFSC, 1995. 249 p.

SHAW, Milton C. **Metals cutting principles**. 3 ed. Oxford: University Press. 549 p.

TÖNSHOF, H. K. SPINTIG, W., KÖNIG, W., NEISES, A. Machining of holes. Developments in drilling technology. In: Scientific Technical Committes – CIRP, 43. 1994. **Annals of the CIRP, Vol. 43**. p. 551-561.

TRENT, E. M. WRIGHT, P. K. **Metal cutting.** 4 ed. Woburn: Butterwhrth-Heinemann, 2000. 439p.

STOETERAU, Rodrigo L. **Usinagem com ferramenta de geometria definida.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/PMR2202> Acesso em: 19 Fev 2013.

STOETERAU, Rodrigo L. **Processo de Usinagem. Desgaste de ferramentas.** Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <http://www.lmp.ufsc.br/disciplinas/Stoterau/Aula-05-U-2007-1-desgaste.pdf>. Acesso em: 21 Fev 2013.

Anexo A: Programa utilizado na operação do Centro de Usinagem

Programa utilizado na operação do Centro de Usinagem

PROGRAMA 03000	PROGRAMA 03001
G1902; B400; D102; H102; I0; J0; K0	G1902; B102; D400; H102; I0; J127; K0
G1902; B400; D102; H102; I-127; J0; K0	N10 G81; G91; Y-10; G90; Z-40; Q5; R3; K5;
G1902; B400; D400; H102; I0; J127; K0	F270
N10 G17; G21; G90; G94	N20 G80
N20 G53; Z-110; H0	N30 Y-0
N30 T-19 (Broca 8mm)	N40 G91; X10
N40 M6	N50 M99
N50 G54; S1353; M3	
N60 G0; X-157; Y10	
N70 G43; Z5; H19; D19	
N80 X-137; Y-6	
N90 M98; P73001	
N100 G80	
N110 G53; Z-110; H0	
N120 M30	

Anexo B: Programa para teste de furação a pressão constante

Programa para teste de furação a pressão constante, usado na furadeira Manrod 200

		Calibraç ão	Operaç ão automática		
Ligar motor	I1	I9	I10	Q1	EV1
Desligar motor	I2			Q2	EV2
Partida	I3			Q3	EV3
Posição 1	I4			Q4	Motor
Posição 2	I5			Q5	Calibra ção
Posição 3	I6			Q6	Operaç ão
Reserva	I7				
Reserva	I8				
Reserva	I11	I12			
Reserva		Encode r		Referên cia	

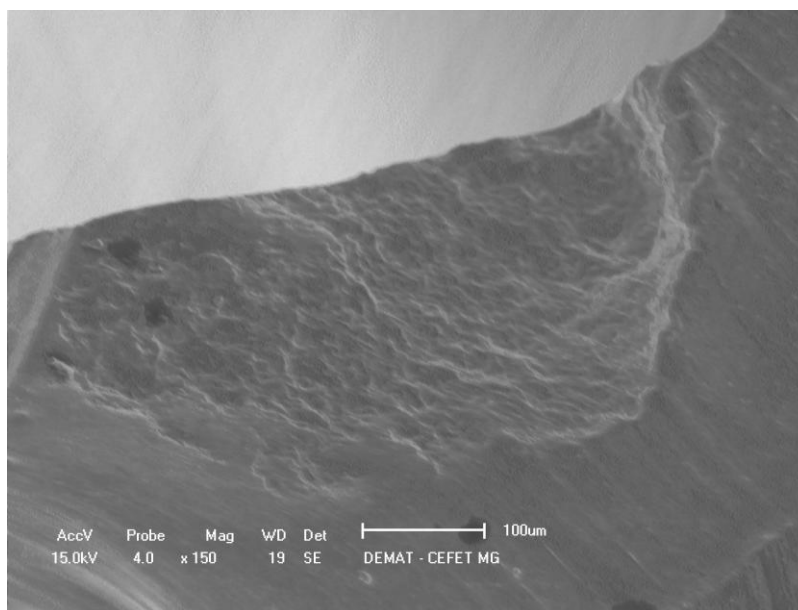
Anexo C: Sequência de operação do equipamento para ensaio de furação

- a) montar uma peça de aço ABNT 1020, como peça de sacrifício, para avaliação do comportamento da furadeira e do programa;
- b) fixar a peça na morsa;
- c) acionar a chave seletora I9, esta chave coloca a máquina no modo calibração e aciona a válvula de alívio EV3 (eixo Z);
- d) acionar a chave seletora I1, para ligar o motor Q4;
- e) liberar a manivela do eixo do mandril e aproximar, manualmente a broca da face da peça;
- f) quando a broca tocar a peça acionar a chave seletora I4;
- g) deslocar a broca por 5mm, para definição do transiente do furo, acionar a chave seletora I5;
- h) deslocar a broca por 20mm, para definição da profundidade do furo, acionar a chave seletora I6.
- i) voltar manualmente ao repouso mecânico e desligar o motor acionando a chave seletora I2;
- j) acionar a chave seletora I10 para colocar a furadeira em modo de operação automática;
- k) acionar a chave seletora I3 para a partida da furadeira, esta chave vai ligar o motor Q4 e acionar a válvula de alívio EV1 que irá liberar a carga à pressão constante, que fará com que a ferramenta desça até a peça (Figura 4.8, posição 1) , continuar por 5mm (Figura 4.8, posição 2) e iniciar a contagem do tempo para fazer o furo com 20mm de profundidade (Figura 4.8, posição 3);
- l) ao atingir a posição 3, a válvula de alívio EV2 é acionada, liberando a carga, e o eixo volta à posição de repouso;
- m) anotar o tempo medido e reiniciar o teste.

Anexo D: Ampliação das Figuras 50A e 50B

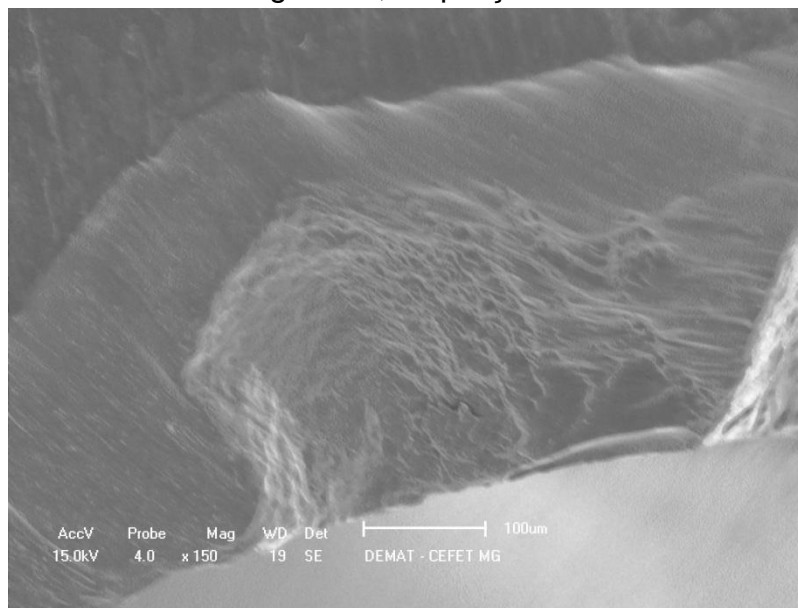
Nas Figuras 50A e 50B são mostradas as ampliações da Figura 50, onde se percebe o detalhe do lascamento.

Figura 50A Detalhe da área do lascamento da Figura 50, ampliação 150x



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

Figura 50B Detalhe da área do lascamento da Figura 50, ampliação 150x

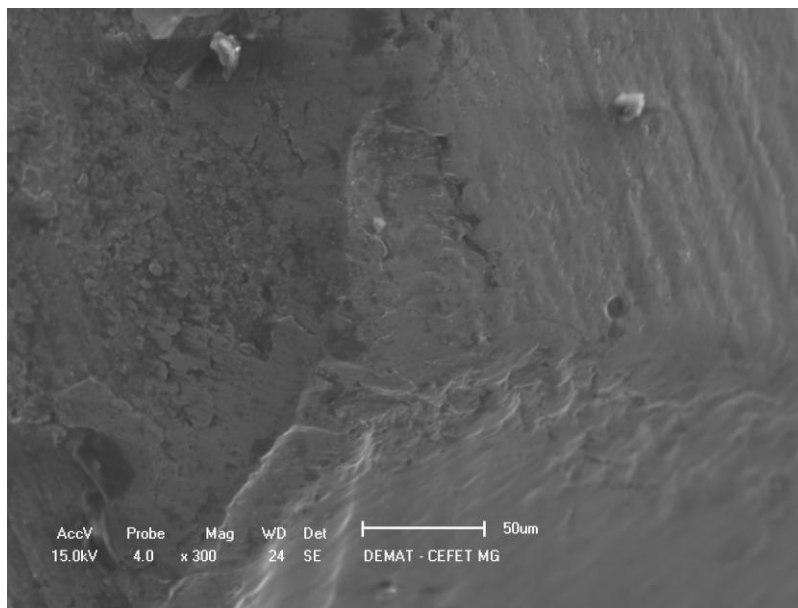


Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

Anexo E: Ampliação da Figura 52

Na Figura 52A é mostrada a ampliação da Figura 52, onde se percebe o detalhe do lascamento.

Figura 52A Detalhe do lascamento mostrado na
Figura 52, ampliação 300x

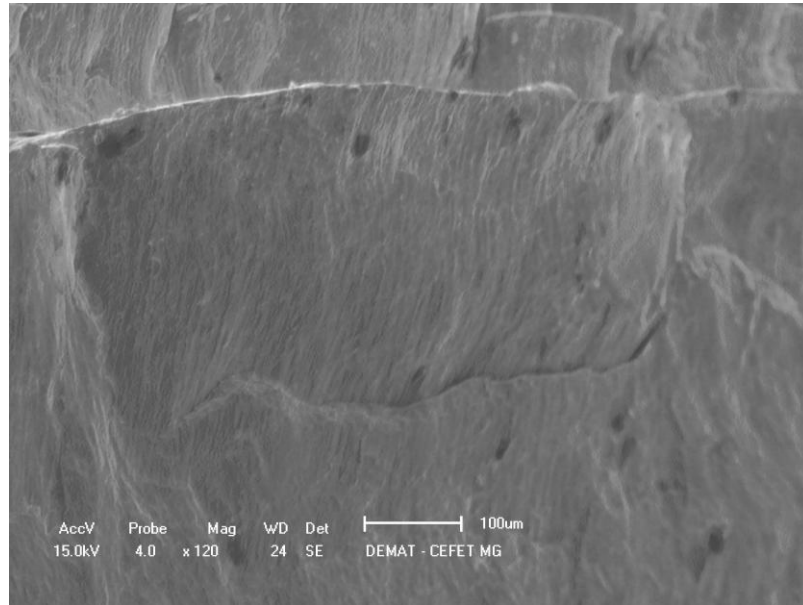


Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

Anexo F: Ampliação da Figura 57

Na Figura 57A é mostrada a ampliação da Figura 57, extremidade da broca, onde se percebe lascamento na superfície de folga.

Figura 57A Detalhe da extremidade da broca, ampliação 120x

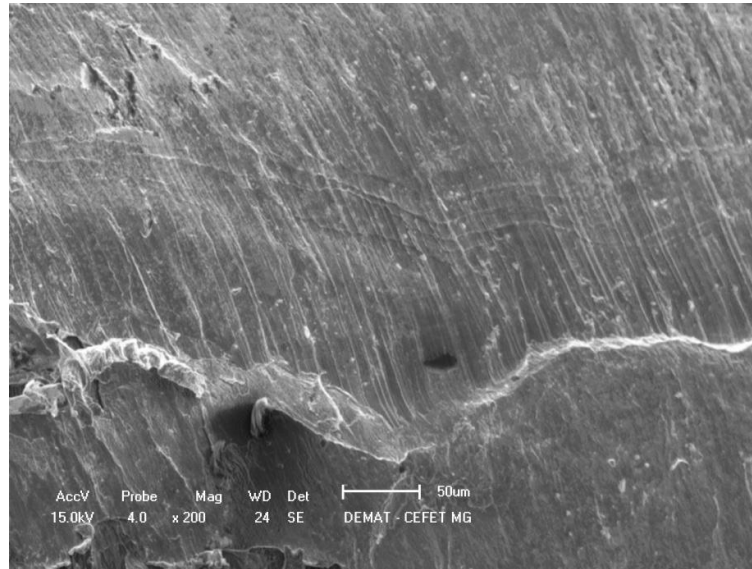


Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG

Anexo G: Ampliação da Figura 64

Na Figura 64A é mostrado o detalhamento da Figura 64, onde se percebe desgaste abrasivo e lascamento.

Figura 64A Detalhamento da Figura 64, ampliação 200x



Fonte: Laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET MG