

José Aécio Gomes de Sousa

Desempenho de Ferramentas Reafiadas - Furação



Universidade Federal de Uberlândia

Faculdade de Engenharia Mecânica

2011

José Aécio Gomes de Sousa

Desempenho de Ferramentas Reafiadas - Furação

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processo de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Álisson Rocha Machado

Co-orientador: Prof. Dr. Éder Silva Costa

Uberlândia – MG

2011

***“Aquilo que você mais sabe ensinar,
é o que você mais precisa aprender”.
(Richard Bach)***

*Aos meus pais, Raimundo e Maria das Dores,
cujo exemplo de simplicidade, honestidade e trabalho
tem sido um norteador para a minha vida.*

Agradecimentos

À Deus, pela sua infinita bondade, amor e companhia nesses anos tão decisivos. Sua presença me trouxe paz, segurança e alívio nas horas angustiantes.

Ao Prof. Dr. Álisson Rocha Machado pelo incentivo, amizade e orientação, imprescindíveis à realização do presente trabalho. O tempo passa, mas a amizade fica juntamente com o conhecimento.

À Universidade Federal de Uberlândia/Faculdade de Engenharia Mecânica/Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem – LEPU, pela infra-estrutura essencial à realização desta dissertação.

À Universidade Federal do Ceará pela preciosa e indispensável formação.

Ao professor Éder Silva Costa por sugestões tão certeiras.

Ao meu irmão Raimundo Nonato pelo entusiasmo e motivação.

Aos amigos do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem – LEPU, Cláudio Gomes do Nascimento, Daniel de Andrade Cristovão e Marcelo do Nascimento Sousa, pelo companheirismo e amizade.

Aos familiares e amigos de Fortaleza, por entenderem minha ausência nos momentos felizes de suas vidas que juntos deveríamos compartilhar.

À FPT, nas pessoas dos Srs. Lucas Adriano, Orlando Garcia e Amilton Cory pelo fornecimento do material e apoio durante a pesquisa.

À OSG Sulamericana de Ferramentas Ltda, nas pessoas dos Srs. Pedro Vaz, Rodrigo Katsuda e Coiti Fukushima pelo fornecimento das ferramentas.

À CAPES, à FAPEMIG e ao CNPq pelo suporte financeiro.

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

SOUSA, J. A. G., 2011, “Desempenho de Ferramentas Reafiadas - Furação”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 147 p.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	x
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
I - INTRODUÇÃO.....	1
II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 – O Processo de Furação.....	4
2.1.1 - Histórico.....	4
2.1.2 - Definições.....	5
2.1.3 - Geometria das Brocas.....	10
2.1.4 - Desvios Geométricos.....	16
2.2 - Esforços de Usinagem na Furação.....	20
2.2.1 - Forças.....	21
2.2.2 - Torque.....	24
2.2.3 - Medições de Esforços na Furação.....	25
2.3 - Materiais de Ferramentas Para Furação.....	26
2.3.1 - Brocas de Metal Duro.....	28
2.3.2 - Brocas Revestidas	30
2.5 - Desgaste e Vida das Brocas.....	36
2.5.1 - Formas de Desgaste.....	36
2.5.2 - Mecanismos de Desgaste.....	40
2.5.3 - Vida de Brocas.....	41
2.5.4 - Fatores que Influenciam a Vida de Brocas.....	42
2.6 - Fluidos de Corte Aplicados na Furação.....	44
2.6.1 - Funções dos Fluidos de Corte.....	45
2.6.2 - Classificação dos Fluidos de Corte.....	47
2.6.3 – Direções e Métodos de Aplicação.....	48
2.6.3.1 – Direções de Aplicação dos Fluidos de Corte.....	48
2.6.3.2 – Método de Aplicação dos Fluidos de Corte.....	49
2.7 - Reafiação de Ferramentas de Corte.....	49
2.7.1 - Técnicas de Reafiação.....	51

2.7.2 - Reafiação de Brocas sem Revestimento.....	53
2.7.3 - Reafiação de Brocas Revestidas.....	53
2.7.4 - Número de Reafiações.....	54
2.8 - Teoria Estatística.....	54
2.8.1 - Teste de Hipóteses.....	54
2.8.2 - Comparação de 2 Tratamentos.....	55
III - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	59
3.1 - Materiais Usinados, Ferramentas de Corte e Máquina-Ferramenta.....	60
3.1.1 - Materiais Usinados.....	60
3.1.2 - Ferramentas de Corte.....	63
3.1.3 - Máquina-Ferramenta.....	64
3.2 - Ensaios Experimentais.....	67
3.2.1 - Brocas com Revestimento TiAlN.....	67
3.2.1.1 - Influência da Reafiação.....	67
3.2.1.2 - Influência da Metodologia de Recobrimento.....	69
3.2.1.3 - Influência entre reafiação OSG x FPT.....	70
3.2.2 - Brocas com revestimento AlCrN.....	72
3.2.3 - Brocas sem Revestimento.....	73
3.3 - Parâmetros de Corte e Meio Lubri-Refrigerante Utilizados.....	74
3.4 - Parâmetros Monitorados / Medidos nos Experimentos.....	75
3.4.1 - Vida e Desgaste das Ferramentas de Corte.....	75
3.4.2 - Torque e Força de Avanço.....	77
3.4.3 - Qualidade dos Furos Usinados.....	78
IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	82
4.1 - Análise do Desgaste.....	82
4.1.1 - Ferramentas com Revestimento TiAlN.....	82
4.1.2 - Ferramentas com Revestimento AlCrN.....	84
4.1.3 - Ferramentas sem Revestimento.....	86
4.1.4 – Comparações do Desgaste no Fim de vida das Brocas.....	87
4.1.4 - Comparação de 2 Tratamentos.....	88
4.2 - Esforços de Usinagem.....	89
4.2.1 - Ferramentas com Revestimento TiAlN.....	89
4.2.1.1 - Força de Avanço.....	89
4.2.1.2 - Torque.....	92
4.2.2 - Ferramentas com Revestimento AlCrN.....	95
4.2.2.1 - Força de Avanço.....	95

4.2.2.2 - Torque.....	98
4.2.3 - Ferramentas Sem Revestimento.....	99
4.2.3.1 - Força de Avanço.....	99
4.2.3.2 - Torque.....	101
4.2.4 - Comparação Entre os Revestimentos.....	102
4.2.5 - Comparação de 2 Tratamentos.....	104
4.3 - Qualidade dos Furos Usinados.....	105
4.3.1 - Ferramentas com Revestimento TiAlN.....	105
4.3.1.1 - Desvio de Circularidade.....	105
4.3.1.2 - Desvio de Cilindricidade.....	108
4.3.2 - Ferramentas com Revestimento AlCrN.....	112
4.3.2.1 - Desvio de Circularidade.....	112
4.3.2.2 - Desvio de Cilindricidade.....	113
4.3.3 - Ferramentas Sem Revestimento.....	114
4.3.3.1 - Desvio de Circularidade.....	114
4.3.3.2 - Desvio de Cilindricidade.....	116
4.3.4 - Comparação Entre os Revestimentos.....	117
4.3.5 - Comparação de 2 Tratamentos.....	119
4.4 - Rugosidades dos Furos Usinados.....	119
4.4.1 - Ferramentas com Revestimento TiAlN.....	119
4.4.2 - Ferramentas com Revestimento AlCrN.....	124
4.4.3 - Ferramentas Sem Revestimento.....	126
4.4.4 - Comparação Entre os Revestimentos.....	128
4.4.5 - Comparação de 2 Tratamentos.....	130
V - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	131
VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	136

SOUSA, J. A. G., 2011, "Desempenho de Ferramentas Reafiadas – Furação", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 147 p.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Letras Latinas

A.....	Rugosidade
A_{α}	Superfície principal de folga
A'_{α}	Superfície secundária de folga
A_{γ}	Superfície de saída
APC.....	Aresta postiça de corte
a_p	Profundidade de corte
B.....	Ondulação
b.....	Largura de usinagem (mm)
C.....	Orientação das Irregularidades
CAE.....	Computer Aided Engineering
CNC.....	Controle Numérico Computadorizado
CVD.....	Chemical Vapor Deposition
d.....	Diâmetro (mm)
D.....	Diâmetro da broca (mm)
EP.....	Extrema Pressão
FEA.....	Finite Element Analysis
f.....	Avanço (mm/volta)
F_u	Força de usinagem
F_c	Força de corte
F_f	Força de avanço
F_p	Força passiva
h.....	Espessura de corte
h'	Espessura do cavaco
KB, KT, KM.....	Parâmetros do desgaste de cratera
k_c	Pressão específica de corte
k_f	Pressão específica de avanço
L/D.....	Relação comprimento diâmetro do furo
l_f	Comprimento de furação

MQF.....	Mínima quantidade de fluido de corte
M_t	Momento torçor
n	Rotação da ferramenta (rpm)
P_f	Plano admitido de trabalho
P_o	Plano ortogonal da ferramenta
P_p	Plano dorsal da ferramenta
P_r	Plano de referência da ferramenta
P_s	Plano de corte da ferramenta
PVD.....	Physical Vapour Deposition
R_a	Rugosidade média R_a
r_ϵ	Raio de quina
R_t	Rugosidade total
R_z	Rugosidade média R_z
S	Aresta principal de corte
S'	Aresta secundária de corte
T	Torque
t_f	Tempo de furação
VB_B	Desgaste de flanco médio
$VB_{Bmáx}$	Desgaste de flanco máximo
v_c	Velocidade de corte
VC, VN.....	Parâmetros do desgaste de entalhe
v_e	Velocidade efetiva de corte
v_f	Velocidade de avanço

Letras Gregas

α	Ângulo de folga
β	Ângulo da cunha
ε	Ângulo de ponta
γ	Ângulo de saída
ϕ	Ângulo de cisalhamento
σ	Ângulo de ponta da broca
λ	Ângulo de inclinação
ψ	Ângulo da aresta transversal
λ_c	Comprimento de amostragem
χ	Ângulo de posição

Abreviaturas

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI - American Iron and Steel Institute

ISO – International Organization for Standardization

SOUSA, J. A. G., 2011, "Desempenho de Ferramentas Reafiadas – Furação", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 147 p.

RESUMO

Este trabalho avaliou o desempenho de brocas helicoidais escalonadas antes e após a operação de reafiação, além de considerar a variação na forma de reafiação que poderá ser empregada a uma broca após esta atingir o limite de desgaste não mais aceitável. As seguintes variáveis também foram consideradas: tipo do revestimento (sem revestimento, TiAlN e AlCrN) e o tipo de re-recobrimento após reafiação (sem recobrir novamente, recobrindo sobre aquele já existente e recobrindo após remoção do recobrimento anterior). Os parâmetros avaliadores do desempenho foram: taxa de desgaste, vida da ferramenta, força de avanço, torque, desvios geométricos (circularidade e cilindridade) e rugosidade superficial. Todos os resultados foram comparados com o desempenho de uma broca nova. Os testes de vida foram realizados na linha de produção da empresa FPT (*Fiat Powertrain Technologies*) em Betim - MG. As reafiações das ferramentas foram feitas nas empresas *OSG Sulamericana de Ferramentas Ltda* em Bragança Paulista – SP e na FPT. Os demais testes e investigações foram realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Os resultados mostraram que, em geral, as brocas reafiadas tiveram pior desempenho que as brocas novas. Dentre as ferramentas revestidas com TiAlN, apenas as ferramentas que passaram pelo processo de decapagem (retirada do revestimento) + reafiação + recobrimento (inserção de um novo revestimento TiAlN) foram as que obtiveram valores mais próximos das ferramentas que não foram submetidas ao processo de reafiação (ferramentas novas). Foi observado que as ferramentas reafiadas na *OSG Sulamericana* apresentaram desempenhos ligeiramente melhores que as ferramentas reafiadas na FPT. Os resultados também mostraram que, mesmo usinando uma quantidade menor de furos, as brocas sem revestimentos foram as que apresentaram maiores taxas de desgaste em relação às ferramentas revestidas. Tais brocas produziram, na maioria dos testes, as maiores forças de avanço, os maiores torques, as maiores rugosidades e os maiores desvios geométricos.

Palavras-chaves: brocas reafiadas, furação, força de avanço, brocas escalonada, qualidade de furos.

SOUSA, J. A. G., 2011, "Desempenho de Ferramentas Reafiadas – Furação", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 147 p.

ABSTRACT

The present work evaluated the performance of step drills, new and after regrinding. The way of regrinding the drills after they reached the end of tool life criterion was also varied. The following variables were also considered: type of coatings (uncoated, TiAlN e AlCrN) and the routine of re-coating them after regrinding (no recoating, recoating over the previous coating and recoating after removing the previous coating). The output parameters considered for determining the machining performance were: tool wear rate, tool life, thrust force, torque, form desviors (roundness and cylindricity) and surface roughness (parameters Ra, Rz and Rt). All the results were compared to those obtained by a new tool (first time used). The tool life test were carried out at the shop floor of Fiat Powertrain Technologies - FPT in Betim – MG. The regrinding processes were performed both at Fiat Powertrain Technology – FPT and at OSG Sulamericana de Ferramentas Ltda in Bragança Paulista – SP. The other tests were carried out at the Machining Teaching and Research Laboratory – LEPU of Federal University of Uberlândia – UFU. The results showed that in general the reground tools showed worse performance than the new tools. Among the TiAlN coated tools only those that have undergone the process of cleanness of the previous coating and then reground and recoated (with the same type of coating) showed results close to the new tools. It was found that the tools reground at OSG Sulamericana de Ferramentas Ltda showed performance slightly better than those reground at Fiat Powertrain Technologies – PPT. The results also showed that even though a smaller number of holes has been machined, the uncoated drills presented higher wear rates than the coated tools. These tools also showed, practically in all tests, higher thrust force and torque, higher form desviors and worse surface roughness.

Key-words: reground drills, drilling process, thrust force and torque, step drills, quality of machined holes.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A grande maioria das peças de qualquer tipo ou formato produzido nas indústrias tem pelo menos um furo, e somente uma parte muito pequena já vem com o furo pronto do processo de obtenção da peça em bruto (fundição ou forjamento, por exemplo) (DINIZ et al., 2006). As indústrias utilizam vários processos de usinagem para a obtenção de furos nas peças, cada um com suas características e importâncias dentro da manufatura. A usinagem eletroquímica, usinagem por feixe de elétrons, furação convencional, entre outros, são alguns dos processos de usinagem empregados para aberturas de furos em peças.

Por ser mais competitivo e flexível, a furação convencional é o processo de usinagem mais utilizado para a abertura de furos. Este processo representa 33% do número e, aproximadamente, 25% do tempo de todas as operações de usinagem (TÖNSHOFF et al., 1994). A importância desse processo pode ser constatada, por exemplo, quando se observa a quantidade de furos que devem ser usinados durante a fabricação de blocos para motores de veículos automotivos: são cerca de 75 furos para motores de 4 cilindros, e 150 para motores de 8 cilindros.

O processo de furação ocorre sob condições relativamente severas. Segundo Stemmer (1992), essas condições severas ocorrem devido à velocidade de corte não ser uniforme na ponta da broca, além do fluido de corte enfrentar dificuldade para chegar à cunha da ferramenta, onde deveria atuar como refrigerante e lubrificante, bem como colaborar para a remoção dos cavacos da área que está sendo furada. Antes do furo ser executado, devem-se considerar especificações técnicas, como: dureza do material, usinabilidade, comprimento, diâmetro, característica do furo (passante ou cego; geometria do furo), tolerância dimensional e acabamento da superfície usinada.

Um dos problemas do processo de furação é a retirada dos cavacos de dentro do furo. Se os cavacos não forem formados de maneira tal que propiciem sua fácil evacuação, eles podem causar o entupimento do furo, aumento do torque e da temperatura de corte, provocando, assim, um maior desgaste da ferramenta. O desgaste ocorre geralmente pela perda progressiva de material, ocasionando mudanças na forma da ferramenta a partir de seu estado original. Esse fenômeno ocorre principalmente nas condições mais críticas e são fortemente dependentes da combinação do material da peça a ser usinada, do material da ferramenta e da geometria do cavaco. A evolução do desgaste pode comprometer o acabamento dos furos, a circularidade e a cilindricidade. Quando as ferramentas apresentam alto grau de desgaste, a usinagem pode ser comprometida devido ao baixo rendimento, proveniente exclusivamente por problemas de aquecimento excessivo, aumento do esforço de

corte e acabamento de baixa qualidade na superfície usinada, além de ocasionar aumento do tempo de confecção das peças. Dessa forma, existirá sempre um limite de desgaste que determinará o fim de vida de uma ferramenta ou quando esta deverá ser substituída. Para tanto poderá ser usada uma broca nova ou uma broca reafiada.

Nas indústrias que trabalham com a alta produtividade, a utilização de velocidades de corte elevadas faz com que o atrito na aresta de corte ultrapasse a temperatura admitida pelo material da ferramenta, ocasionando uma perda da capacidade de corte (BORK, 1995). Quando a broca atinge seu fim de vida, a reafiação acaba virando uma alternativa para evitar o descarte da mesma, entretanto, tem-se dúvidas quanto ao desempenho das brocas após serem reafiadas, principalmente no caso de brocas revestidas. Geralmente as ferramentas passam de 3 a 15 vezes pelo processo de reafiação e revestimento, dependendo do tipo e das condições de operação que a mesma está realizando. A reafiação de brocas helicoidais, além de suprir boa parte do consumo de matéria-prima, acaba se tornando uma solução para que as brocas, que antes estavam desgastadas, continuem sendo utilizadas. Segundo Ostronoff (2007), a reafiação uma única vez da ferramenta de corte já garante o custo-benefício, podendo depois ser descartada.

De acordo com estimativas realistas, uma broca helicoidal, por exemplo, tem condições de readquirir até 90 % de sua capacidade depois de reafiada a um custo que pode ser de até 10 % de uma nova (OSTRONOFF, 2007). Entretanto, a reafiação de brocas severamente danificadas pode ser economicamente inviável de serem realizadas. Por isso é importante saber definir limites de furos (ou qualidade) antes da ponta da broca atingir elevados valores de desgaste. Em geral, as grandes indústrias têm um setor de afiação de ferramentas para restaurar o contorno e o perfil de corte das ferramentas desgastadas.

Este trabalho se justifica pelo fato do processo de furação com brocas helicoidais ser ainda a operação de usinagem mais utilizada no setor metal-mecânico. As perdas anuais com descarte dessas ferramentas sem a verdadeira necessidade somam milhões de dólares. A reafiação dessas ferramentas desgastadas entra como uma alternativa de redução dos custos.

O objetivo principal deste trabalho é comparar o desempenho de brocas helicoidais escalonadas antes e após a operação de reafiação, além de verificar a melhor forma de reafiação que poderá ser empregada a uma broca após esta atingir o limite de desgaste não mais aceitável. As variáveis a serem consideradas foram: tipo do revestimento (inclusive sem) e o tipo de recobrimento (sem recobrir novamente, recobrindo sobre aquele já existente e recobrindo após remoção do recobrimento anterior). Os parâmetros avaliadores do desempenho foram: taxa de desgaste, vida da ferramenta, força e torque, além de desvios geométricos (desvio de cilindridade, desvio de circularidade e rugosidade superficial). Todos os resultados foram comparados com o desempenho de uma broca nova. Os testes de vida

foram realizados na linha de produção da empresa FPT (*Fiat Powertrain Technologies*) em Betim - MG. As reafiações das ferramentas foram feitas nas empresas OSG Sulamericana de Ferramentas Ltda, em Bragança Paulista – SP e na FPT. Os demais testes e investigações foram realizados no LEPU / FEMEC / UFU em Uberlândia - MG.

O trabalho foi dividido em 3 etapas. Na etapa 1 avaliou-se o desempenho das brocas com revestimento TiAlN. Nesta etapa foi possível comparar o desempenho de uma broca nova com uma reafiada em termos de força, torque e desvios geométricos (desvio de cilindridade, desvio de circularidade e rugosidade superficial). Também foi comparado o tipo de reafiação entre as duas empresas analisadas (OSG x FPT) e, por fim, foi analisado a melhor forma de reafiação (sem recobrir novamente, recobrindo sobre aquele já existente e recobrindo após remoção do recobrimento anterior). Na etapa 2 foi analisado o desempenho das ferramentas, novas e reafiadas, com revestimento AlCrN através do monitoramento da força, torque e desvios geométricos (cilindridade, circularidade e rugosidade superficial). Na etapa 3 os testes foram similares aos da etapa 2 sendo que neste caso as brocas em análise se encontravam sem revestimento. Foi acompanhado o desenvolvimento da força, torque e desvios geométricos (cilindridade, circularidade e rugosidade superficial).

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, além deste. No capítulo II é apresentada uma revisão bibliográfica, em que são abordados conhecimentos teóricos necessários ao bom entendimento do trabalho. No capítulo III são descritos, detalhadamente, os procedimentos adotados para a realização dos experimentos, bem como os materiais, ferramentas, máquinas e equipamentos utilizados na pesquisa. O capítulo IV traz a apresentação e discussão dos resultados obtidos. No capítulo V são apresentadas as principais conclusões da dissertação e sugeridos temas para trabalhos futuros. As referências bibliográficas, utilizadas na pesquisa e na elaboração do texto, são apresentadas no capítulo VI, completando, dessa forma, este trabalho.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - O Processo de Furação

De acordo com a norma alemã DIN 8589, a furação é definida como um processo de usinagem com movimento de corte circular, ou seja, com movimento rotativo principal. A ferramenta possui movimento de avanço apenas na direção do seu eixo de rotação, que mantém a posição em relação à ferramenta e à peça (CASTILLO, 2005). Ferraresi (1977), define furação como: *“um processo mecânico de usinagem, utilizado para a obtenção de um furo, geralmente cilíndrico, numa peça com auxílio de uma ferramenta, geralmente multicortante. Para tanto, a ferramenta ou a peça gira e, simultaneamente, a ferramenta ou a peça se desloca segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela com o eixo principal de rotação da máquina. O processo de furação pode subdividir-se em operações de furação em cheio, escareamento, furação escalonada, furação de centros, trepanação, entre outros. A ferramenta destinada a este processo denomina-se broca”*.

Segundo Harber et al. (2007), a furação convencional continua sendo um dos processos mais comum de operação de usinagem na indústria de transformação, sendo que, em alguns países, este tipo de processo representa quase 50% de todas as operações de usinagem. Este processo é usado em conjunto com grande parte dos processos de fabricação a fim de prover elementos de fixação, muitas vezes de importância secundária, ou pré-furo para acabamento através de outros processos de usinagem, como: alargamento, brochamento, mandrilamento, torneamento interno, retificação interna, entre outros. A importância da operação de furação pode ser avaliada também pelo consumo de ferramentas. Estima-se que o consumo mundial de brocas seja da ordem de 250 milhões de unidades por ano (AMORIM, 2003; VIANA, 2004).

2.1.1 - Histórico

Desde a era do ferro já se utilizavam brocas em forma de ponta. Em 1800 surgiram as primeiras publicações sobre furação de metais. Foi pela primeira vez, em 1822, que a broca helicoidal foi citada no *“Gills Technical Repository”*. Em 1884, Morse fundou a *“Morse Twist Drill and Machine Company”*. Posteriormente, na Alemanha, Robert Stock fez em 1891 os primeiros testes de furação e, em 1896, deu maior ênfase à produção de brocas helicoidais. Essa ferramenta foi melhorada e desenvolvida até os dias de hoje e a broca helicoidal de aço rápido

é a ferramenta mais utilizada na furação (CASTILLO, 2005; STEMMER, 2001; DINIZ 2000; KONIG e KLOCKE, 1997).

As brocas com haste para cone *morse* foram desenvolvidas mais tarde, como uma alternativa à haste paralela. Atualmente a concepção e o desenvolvimento de novas brocas estão sendo elaborados pelos fabricantes através de softwares de tecnologia CAE (*Computer Aided Engineering*), incluindo análise de elementos finitos pelo software FEA (*Finite Element Analysis*), que permite uma análise mais detalhada e precisa da broca, resultando em uma melhor solução na engenharia (DORMER FERRAMENTAS, 2004; VIANA, 2004).

2.1.2 - Definições

As operações de furação são consideradas, atualmente, as mais difíceis de serem realizadas dentre os processos de usinagem. Isto se dá devido à broca, durante o processo de furação, ter a finalidade de produzir o furo e, ao mesmo tempo, retirar o cavaco o mais rápido possível, de modo a evitar o atrito dos cavacos com as paredes da peça, o que irá conduzir a um aumento nos esforços de corte, podendo levar, conseqüentemente, à quebra da broca. Durante a furação, as brocas também têm a função de deixar penetrar, ou facilitar, a condução do fluido de refrigeração até a região mais próxima da aresta de corte, local este onde há um acréscimo de temperatura devido ao atrito produzido entre a broca e a peça (esse aumento de temperatura colabora para o aumento do desgaste, diminuindo, assim, a vida útil da broca) (PENG et al., 2007, STEMMER, 2001; WANG e ZHANG, 2008). A Figura 2.1 mostra alguns tipos de processo de furação.

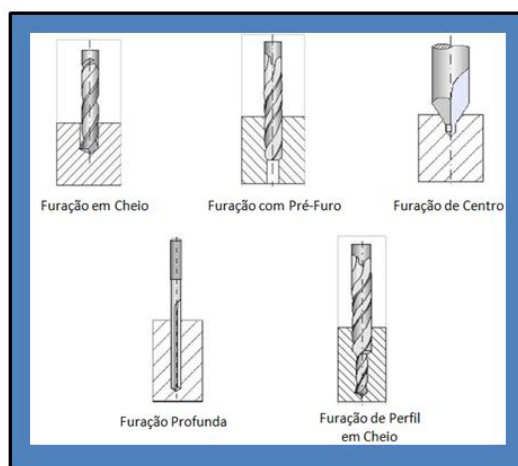


Figura 2.1 – Variações do processo de furação. Adaptado de (STOETERAU, 2007).

Quando o diâmetro ou comprimento do furo é muito grande, se torna necessária a utilização de brocas especiais ou processos especiais de furação. Segundo Santos (1999), as brocas especiais podem realizar furos com até 152 mm de diâmetro, além de ter uma relação comprimento/diâmetro superior a 100.

Os movimentos em furação são definidos de forma análoga ao observado no torneamento, exceto que a velocidade de corte é dada pela rotação da ferramenta em torno de seu próprio eixo (AMORIM, 2003). A broca, responsável por produzir o furo, executa um movimento de rotação, além de realizar o movimento de translação na direção perpendicular à superfície a ser furada (Figura 2.2).

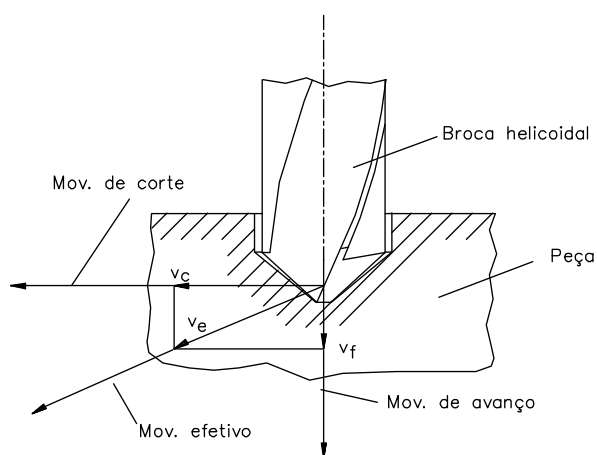


Figura 2.2 - Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo, na furação (ABNT 6162, 1989).

A norma ABNT 6162 (1989) define os movimentos que permitem a ocorrência do processo de usinagem da seguinte forma:

Movimento de Corte – movimento entre a peça e a ferramenta, o qual sem o movimento de avanço origina somente uma única retirada de cavaco;

Movimento de Avanço – movimento entre a peça e a ferramenta o qual, juntamente com o movimento de corte, origina a retirada contínua de cavaco;

Movimento Efetivo – movimento resultante dos movimentos de corte e avanço, realizados ao mesmo tempo.

O avanço de corte no processo de furação é definido como o espaço percorrido pela broca na direção longitudinal do seu eixo durante uma revolução completa da broca (METALS HANDBOOK, 1989). O aumento do avanço facilita a quebra e, conseqüentemente, a remoção

do cavaco. Porém, o aumento do avanço para facilitar a quebra do cavaco, faz com que o ângulo efetivo de folga diminua e, com isso, aumente a deformação plástica do fundo do furo. Essa deformação pode ocasionar o encruamento do material e, por consequência, o aumento da força de avanço necessária ao corte, principalmente próximo ao centro, onde este ângulo é menor ainda. Além disso, existe um limite para o aumento do avanço. Acima de um determinado valor, o avanço pode causar a quebra da ferramenta ou a paralisação do avanço da máquina por falta de potência no eixo-árvore (CASTILLO, 2005; COSTA, 2004; DINIZ, 2000; HOCHENG e TSAO, 2007; SCHROETER e WEINGAERTNER, 2001).

A velocidade de avanço é o resultado do produto do avanço pela rotação da ferramenta. A Equação 1 mostra o cálculo para a velocidade de avanço (MACHADO et al., 2009).

$$v_f = f \cdot n = f \cdot \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} \quad (1)$$

onde:

v_f = Velocidade de avanço [mm/min];

f = Avanço [mm/volta];

v_c = Velocidade de corte [m/min];

D = Diâmetro da broca [mm];

n = Rotação da ferramenta [rpm].

A velocidade de corte é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça (DINIZ et al., 2006). A velocidade de corte está relacionada diretamente com o diâmetro do furo e com a rotação da ferramenta, além de manter uma dependência direta com a vida da ferramenta, material usinado, tempo de usinagem, acabamento superficial e a potência consumida pela máquina-ferramenta (STEMMER, 2001). A Equação 2, mostra o cálculo para a velocidade de corte (MACHADO et al., 2009).

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (2)$$

onde:

v_c = Velocidade de corte [m/min];

D = Diâmetro da broca [mm];

n = Rotação da ferramenta [rpm].

A largura de corte é a largura de cavaco a ser retirada, medida na superfície de usinagem principal, segundo a direção normal à direção de corte. É medida na interseção da superfície de usinagem com o plano normal à velocidade de corte, passando pelo ponto de referência da aresta (FERRARESSI, 1977). A Equação 3 mostra o cálculo para a largura de usinagem (CASTILLO, 2005).

$$b = \frac{D}{2 \cdot \sin\left(\frac{\sigma}{2}\right)} \quad (3)$$

onde:

b = Largura de usinagem [mm];

D = Diâmetro da ferramenta [mm];

σ = Ângulo da ponta da broca [°].

O tempo de furação representa o tempo em que os movimentos de corte e de avanço estão efetivamente ocorrendo. A Equação 4 mostra o cálculo para o tempo de furação (MACHADO et al., 2009).

$$t_f = \frac{l_f}{v_f} = \frac{l_f}{f \cdot n} = \frac{\pi \cdot D}{1000 \cdot v_c} \cdot \frac{l_f}{f} \quad (4)$$

onde:

t_f = Tempo de furação [min];

l_f = Comprimento de furação [mm].

v_f = Velocidade de avanço [mm/min];

v_c = Velocidade de corte [m/min];

f = Avanço [mm/volta];

D = Diâmetro da broca [mm];

n = Rotação da ferramenta [rpm].

Os furos são realizados, em sua maioria, por brocas helicoidais, tanto na fabricação de furos em cheio como pré-furos. A furação com broca helicoidal não pode ser considerada uma operação de acabamento devido a elevada rugosidade nas paredes do furo proveniente do

processo de furação (isso ocorre principalmente na furação em “cheio”) (PANGRÁCIO, 2003; RICHARD et al., 2008).

Segundo Amorim (2003), a maioria das brocas helicoidais amplamente usadas na indústria é dividida em 3 partes (Figura 2.3).

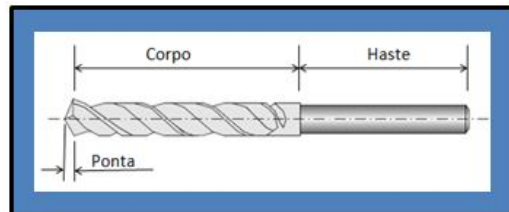


Figura 2.3 – Broca helicoidal de haste cilíndrica. Adaptado de (STOETERAU, 2007).

Ponta – onde se localizam as arestas principais e transversal de corte;

Corpo – parte da broca que contém os canais helicoidais;

Haste – onde é feita a fixação da ferramenta.

A fixação, troca, armazenamento, manuseio e administração de ferramentas é um elo crítico na cadeia que suporta a usinagem bem sucedida. A troca de ferramentas pode ser manual ou mecânica, e a sua eficiência é governada pelo sistema de fixação da ferramenta com o fuso da máquina (SANDVIK, 2003).

Cada vez mais são fabricadas máquinas (tornos CNC's, centros de torneamento, máquinas multitarefa, mandriladoras, entre outros) em que o sistema de fixação de ferramentas tem um papel cada vez mais importante (MARTINS et al., 2008). O mecanismo de fixação das brocas é feito através da haste. A haste pode ser de duas formas (DINIZ, 2006):

Haste Cilíndrica – utilizada em brocas de diâmetro pequeno (até 15 mm) e a fixação na máquina se dá por intermédio de mandril (mecânico, hidráulico ou térmico);

Haste Cônica – utilizada, geralmente, em brocas de diâmetro maiores que 15 mm. A fixação na máquina se dá por montagem em *cone morse*, o que possibilita maior força de fixação.

Segundo Schultz e Moriwaki (1993), o sistema de fixação de ferramenta opera sobre condições especialmente difíceis, uma vez que está localizado diretamente na ação da força entre a peça e a máquina. Além das condições usuais de rigidez e requisitos gerais de corte (transmissão de torque e de forças de usinagem), o sistema deve garantir ótimas condições geométricas (batimento, concentricidade, desvio de cilíndricidade, desvio de circularidade e rugosidade superficial) e possibilitar a troca rápida de ferramentas.

Neste trabalho, para os ensaios de vida realizados no chão de fábrica da FPT, a fixação das brocas foi feita por mandril hidráulico. Este tipo de fixação apresenta uma bucha de dilatação cilíndrica deformável que, ao se injetar óleo na interface da bucha com a ferramenta, mediante um êmbolo ativado por parafuso, provoca a dilatação da bucha de forma centralizada em direção à haste da ferramenta. Segundo Martins (2009), esse sistema apresenta como desvantagem um desvio de concentricidade de fixação da ordem de 5 μm e queda de pressão da coluna de óleo, além do custo relativamente elevado para o processo.

2.1.3 – Geometria das Brocas

Para a definição e descrição dos ângulos empregados na análise de brocas helicoidais, faz-se necessário a conceituação de alguns termos apresentados na Figura 2.4.

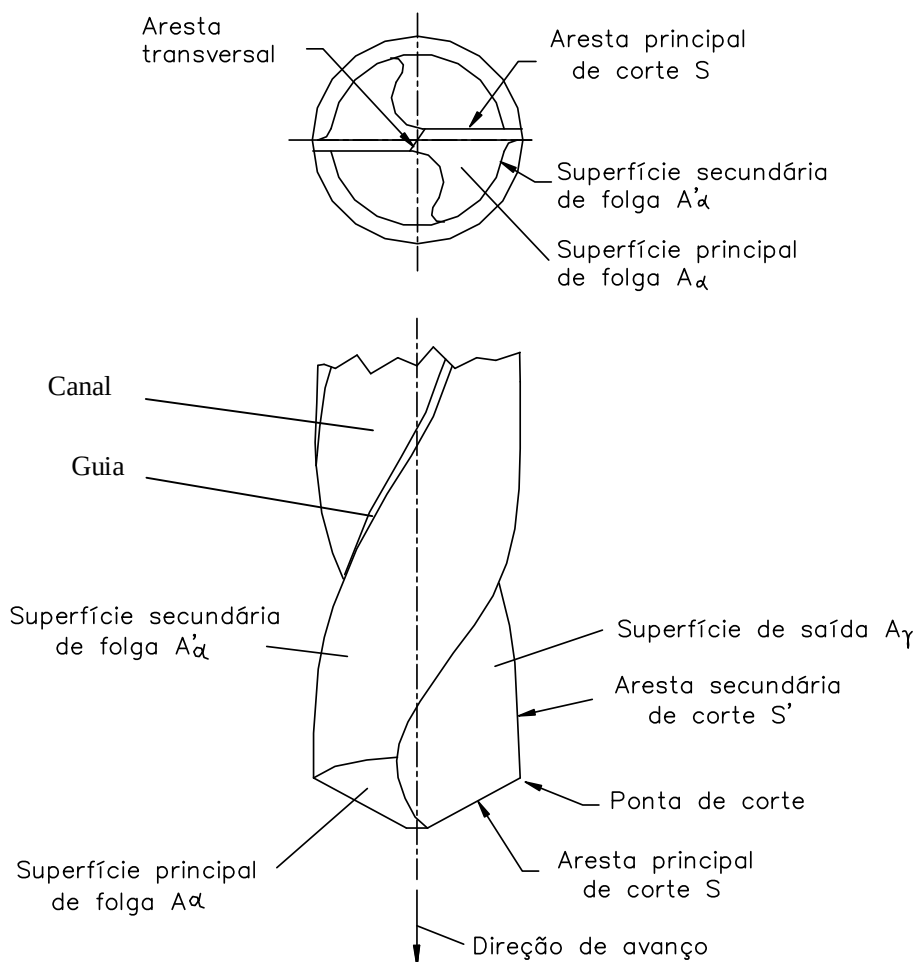


Figura 2.4 - Nomenclatura da broca helicoidal (ABNT 6163, 1980).

A norma ABNT 6163 (1980), define as partes da broca da seguinte forma:

Parte de Corte – definida como a parte ativa da ferramenta formada pelas cunhas de corte com as respectivas arestas de corte;

Cunha de Corte - é a cunha da ferramenta formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga. Através do movimento relativo entre a peça e a ferramenta, formam-se os cavacos sobre a cunha de corte;

Superfície de Saída (A_γ) - é definida como a superfície da cunha de corte, sobre a qual o cavaco é formado e sobre a qual o cavaco escoa durante sua saída da região do trabalho de usinagem;

Superfície Principal de Folga (A_α) - é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém a aresta principal de corte e que defronta com a superfície em usinagem principal;

Superfície Secundária de Folga (A'_α) - é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém a sua aresta de corte secundária principal e que defronta com a superfície em usinagem secundária;

Aresta Principal de Corte (S) - é a aresta da cunha de corte formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga principal. Gera na peça a superfície principal de usinagem;

Aresta Secundária de Corte (S') - é a aresta da cunha de corte formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga secundária. Gera na peça a superfície secundária de usinagem;

Ponta de Corte - parte relativamente pequena da cunha de corte onde se encontram as arestas principal e secundária de corte. A ponta de corte pode ser a intersecção das arestas, ou a concordância das duas arestas através de um arredondamento, ou o encontro das duas arestas através de um chanfro.

A Figura 2.5 apresenta os planos do sistema de referência da ferramenta numa broca helicoidal, tomando como referência um ponto sobre a aresta principal de corte. A Norma ABNT 6163 (1980), define os planos apresentados nesta figura da seguinte forma:

Plano de Referência da Ferramenta (P_r) – é o plano que, passando pelo ponto de corte escolhido, é perpendicular à direção admitida de corte. A direção admitida de corte é escolhida de maneira que o plano de referência da ferramenta (P_r) seja paralelo ou perpendicular a uma superfície ou eixo da ferramenta;

Plano de Corte da Ferramenta (P_s) – é o plano que, passando pelo ponto de corte escolhido, é tangente, ou contém a aresta de corte, e perpendicular ao plano de referência da ferramenta (P_r);

Plano Ortogonal da Ferramenta (P_o) – é o plano que, passando pelo ponto de corte escolhido, é perpendicular aos planos de referência da ferramenta (P_r) e de corte da ferramenta (P_s);

Plano Admitido de Trabalho (P_f) - é o plano que, passando pelo ponto de corte escolhido, é perpendicular ao plano de referência da ferramenta (P_r) e paralelo à direção admitida de avanço. Este plano contém as direções de avanço e de corte;

Plano Dorsal da Ferramenta (P_p) – plano que, passando pelo ponto de corte escolhido, é perpendicular aos planos de referência da ferramenta (P_r) e admitido de trabalho (P_f).

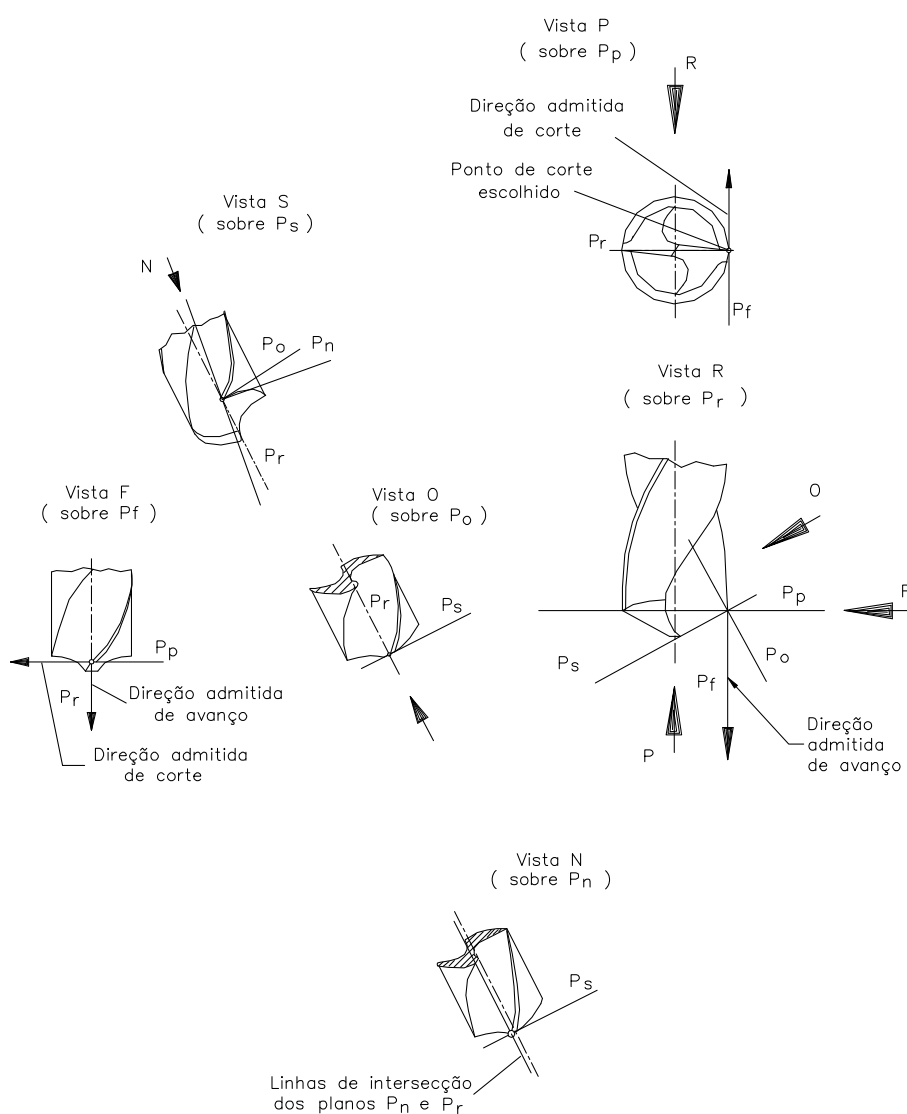


Figura 2.5 – Plano do sistema de referência da ferramenta para a broca helicoidal (ABNT 6163, 1980).

Os ângulos da ferramenta são definidos no sistema de referência da ferramenta. A Figura 2.6 mostra os ângulos do sistema de referência da ferramenta.

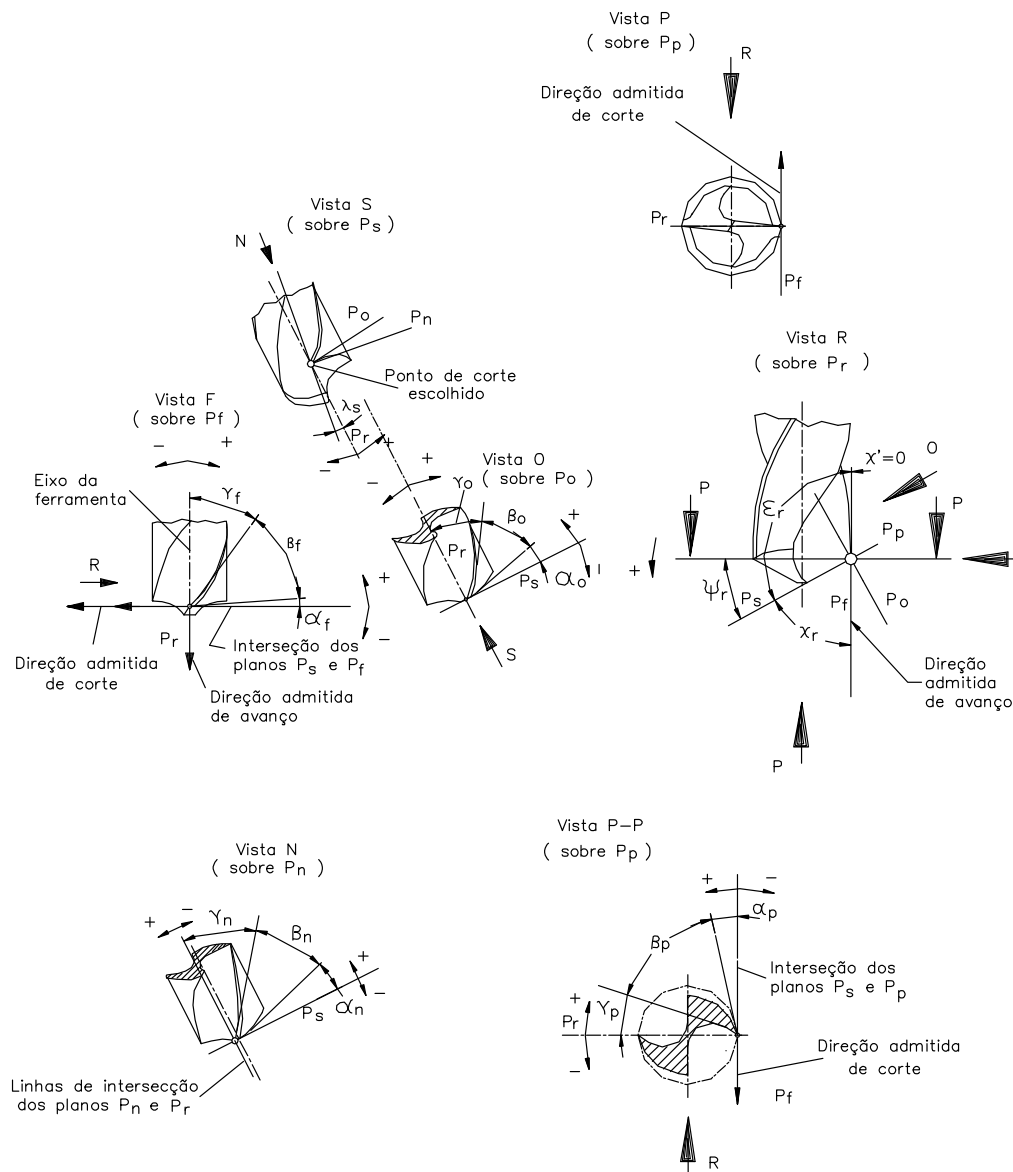


Figura 2.6 – Ângulos da ferramenta numa broca helicoidal (ABNT 6163, 1980).

Miranda (2003), define os ângulos da ferramenta da seguinte forma:

Ângulo de Folga da Ferramenta (α) - é o ângulo entre a superfície de folga (A_v) e o plano de corte da ferramenta (P_s). Pode ser definido sobre um dos planos: plano ortogonal da ferramenta (P_o) sendo, neste caso, o ângulo de folga ortogonal da ferramenta (α_o) ou plano admitido de

trabalho (P_t), quando será o ângulo de folga lateral da ferramenta (α_t) ou ainda, plano dorsal da ferramenta (P_p), quando será o ângulo de folga dorsal da ferramenta (α_p);

Ângulo de Cunha da Ferramenta (β) - é o ângulo entre as superfícies de saída (A_r) e de folga (A_w). Pode ser definido num dos planos: plano ortogonal da ferramenta (P_o), sendo, neste caso, o ângulo de cunha ortogonal da ferramenta (β_o) ou plano admitido de trabalho (P_t), quando será o ângulo de cunha lateral da ferramenta (β_t) ou ainda plano dorsal da ferramenta (P_p), quando será o ângulo de cunha dorsal da ferramenta (β_p);

Ângulo de Saída da Ferramenta (γ) - é o ângulo entre a superfície de saída (A_r) e o plano de referência da ferramenta (P_r) definido num dos planos : ortogonal da ferramenta (P_o), sendo, neste caso, o ângulo de saída ortogonal da ferramenta (γ_o) ou plano admitido de trabalho (P_t), quando será o ângulo de saída lateral da ferramenta (γ_t), ou ainda plano dorsal da ferramenta (P_p), quando será o ângulo de saída dorsal da ferramenta (γ_p);

Ângulo de Posição da Ferramenta (χ) - é o ângulo entre o plano de corte da ferramenta (P_s) e o plano admitido de trabalho (P_t), medido no plano de referência da ferramenta (P_r);

Ângulo de Ponta (ε) - é o ângulo entre os planos principal de corte (P_s) e o secundário de corte (P'_s), medido no plano de referência da ferramenta (P_r);

Ângulo de Posição da Aresta Secundária da Ferramenta (χ') - é o ângulo entre o plano de corte secundário da ferramenta (P'_s) e o plano admitido de trabalho (P_t), medido no plano de referência da ferramenta (P_r);

Ângulo de Inclinação da Ferramenta (λ_s) - é o ângulo entre a aresta de corte e o plano de referência da ferramenta (P_r), medido no plano de corte da ferramenta (P_s).

O ângulo de folga (α) tem a função de evitar o atrito entre a superfície de corte e a superfície de folga da ferramenta, além de permitir que a aresta penetre no material e o corte ocorra livremente. Em brocas com ângulo de folga muito pequeno, a aresta de corte tem dificuldade de penetrar no material, tendo como consequência a diminuição da vida útil da ferramenta provocado pelo aumento do atrito com a peça, além do superaquecimento da ferramenta e do mau acabamento superficial no furo. Para ferramentas com ângulo de folga demasiadamente grande, a aresta tem maior possibilidade de quebra, podendo até sofrer pequenos lascamentos em virtude da baixa resistência da cunha. A grandeza do ângulo de folga depende principalmente da resistência do material da ferramenta e da resistência e dureza do material da peça a ser usinada (AUDY, 2008; STEMMER, 2001). A Figura 2.7 mostra a geometria da parte de corte de uma broca helicoidal.

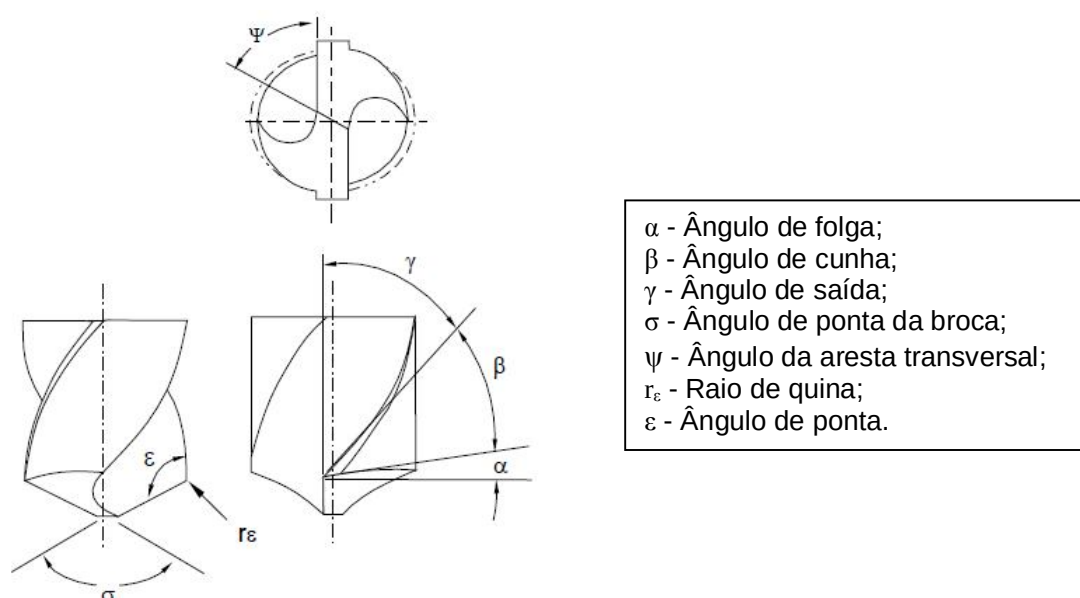


Figura 2.7 – Geometria na cunha de uma broca helicoidal (SCHROETER, 1999).

Segundo Castillo (2005), para a usinagem com material de ferramenta com alta tenacidade, podem-se utilizar ângulos de folga grandes, sem perigo de quebras. Dessa forma, podem ser usados ângulos maiores em ferramentas de aço rápido do que em ferramentas de metal duro, devido à maior resistência e tenacidade aos choques mecânicos. Entretanto, para usinagem de materiais considerados de baixa resistência (alumínio, magnésio, cobre, entre outros) permite-se usar ângulos bem maiores do que a usinagem de materiais resistentes (aços, titânio, níquel, entre outros).

O ângulo de ponta da broca (σ) em brocas helicoidais tem a função de diminuir a espessura do cavaco e aumentar o comprimento atuante da aresta de corte. O aumento do ângulo de ponta da broca ocasionará um aumento do ângulo de ponta (ϵ), elevando, dessa forma, sua resistência mecânica. O ângulo de ponta da broca também é responsável pela força passiva durante a furação (esta força ajuda a eliminar eventuais vibrações), como também faz o controle da direção de saída do cavaco (STEMMER, 2001). Segundo Castillo (2005), com o aumento do ângulo de ponta da broca, a espessura do cavaco, para um mesmo avanço (f), diminui. O emprego de um ângulo de ponta menor faz com que o cavaco seja mais fino e mais largo. Para o caso de alguns materiais de difícil usinabilidade, o cavaco mais grosso é mais vantajoso, pelo fato de fazer contato na superfície, num ponto mais afastado da aresta.

O ângulo de saída lateral da broca (γ) é variável ao longo do diâmetro da ferramenta, tendo como valor máximo na ponta da broca e diminuindo no sentido do centro da broca, tornando-se negativo na passagem para a aresta transversal (o ângulo de saída lateral da

broca varia de acordo com as características do material a ser usinado). O principal objetivo do ângulo de saída negativo é fazer com que a sollicitação da ferramenta, perto da aresta, seja quase que exclusivamente de compressão. As desvantagens do ângulo de saída negativo são: menor qualidade da superfície usinada, necessidade de maior força e potência de usinagem e maior calor gerado na ferramenta (CASTILLO, 2005). Segundo Stemmer (2001), maiores avanços provocam cortes mais pesados, exigindo menores ângulos de saída. Quanto menor o avanço, maior pode ser o ângulo de saída.

2.1.4 – Desvios Geométricos

Durante o processo de furação convencional é praticamente inevitável que a saída do cavaco provoque alterações na superfície usinada (KAIPAKJIAN et al., 2007). Uma broca muito afiada que trabalha em materiais dúcteis provoca uma pressão suficiente para romper as ligações atômicas ou moleculares, causando um grande número de discordâncias, sem produzir grandes deformações plásticas a distâncias da ordem de alguns micrômetros da região de corte. Quando se tem uma broca não afiada (ou desgastada), geralmente ocorre um processo de recalque, induzindo, dessa forma, as gerações de tensões no material da peça que, juntamente com condições inadequadas de trabalho, podem influenciar na qualidade final do furo (MICHELETTI, 1980).

O excesso de vibração no sistema máquina-ferramenta, além da perda da aresta cortante da broca, contribui para desvios dimensionais e de forma no furo (COSTA, 2004). A Figura 2.8 mostra alguns desvios geométricos proveniente do processo de furação.

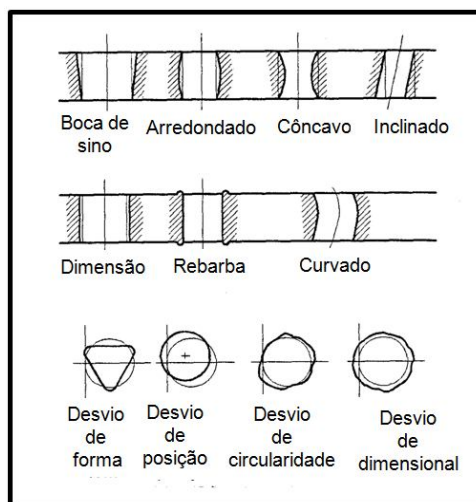


Figura 2.8 - Desvios geométricos na furação (TOOL AND MANUFACTURING, 1983).

Na indústria, a maioria dos furos são executados ou aumentados de diâmetro pelo processo de furação. Essa operação, em geral, é feita como uma das últimas a serem executadas na peça, quando uma grande quantidade de tempo e dinheiro já foi gasta na execução da mesma, por isso se torna indispensável um maior controle deste processo para garantir uma melhor qualidade do furo.

Os desvios de um elemento geométrico em relação à sua forma teórica (retas, planos, círculos, cilindros, entre outros) são denominados de desvios geométricos (AGOSTINHO, 1995). Novaski (1994) definiu alguns desses desvios comumente encontrados nas operações de furação da seguinte forma:

Desvios de Circularidade - ocorrem freqüentemente através de fixações inadequadas das peças. O desvio de circularidade é uma tolerância de forma macrogeométrica (Figura 2.9), que tem relação com os diâmetros encontrados na peça quando medida. As diferenças do círculo real para o círculo teórico são genericamente denominadas ovalizações. Tolerância de circularidade é a variação entre duas circunferências do ponto mais afastado do centro, ao ponto mais próximo. O campo de tolerância no plano considerado é limitado por dois círculos concêntricos e distantes de “t” (ABNT NBR 6409, 1976).

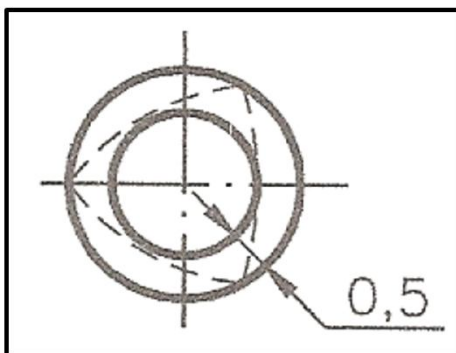


Figura 2.9 – Representação do desvio de circularidade.

Adaptado de (ABNT NBR 6409, 1976).

Desvios de Cilindricidade - podem ocorrer, por exemplo, na furação de furos profundos com brocas helicoidais, através da penetração da ferramenta, em consequência da diferença de comprimento das arestas cortantes ou de uma superfície de furar inclinada. Este desvio também é uma tolerância de forma macrogeométrica (Figura 2.10), que tem relação com os cilindros coaxiais. A diferença entre estes cilindros coaxiais é a cilindridade. O campo da tolerância de cilindridade é limitado por dois cilindros coaxiais, distantes em “t” (ABNT NBR 6409, 1976).

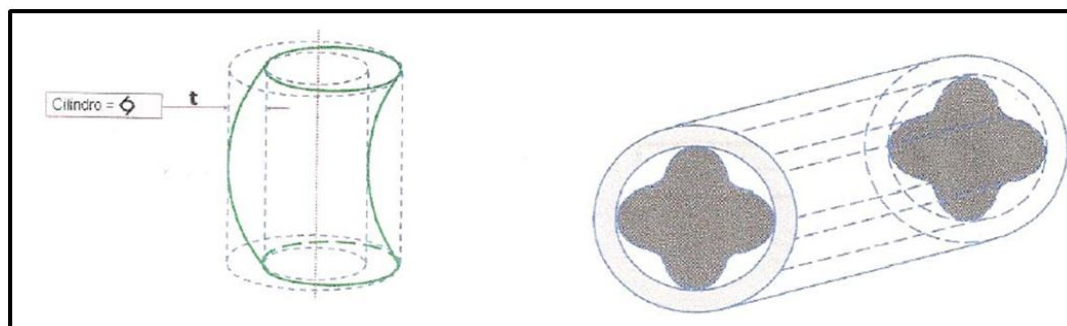


Figura 2.10 – Representação do desvio de cilindridade.

Adaptado de (ABNT NBR 6409, 1976).

Além dos desvios de formas provocado durante instabilidades no processo de furação, podem ocorrer desvios dimensionais, desvios de posição e desvios microgeométricos (rugosidade) (JOHNSON et al., 2007).

A utilização de máquinas-ferramentas isentas de vibração, assim como a utilização de parâmetros de usinagem adequados, podem contribuir para um furo de boa qualidade (RALPH et al., 2006). A Figura 2.11 mostra, de forma esquemática, outros fatores que podem contribuir, de forma negativa, na qualidade do furo.

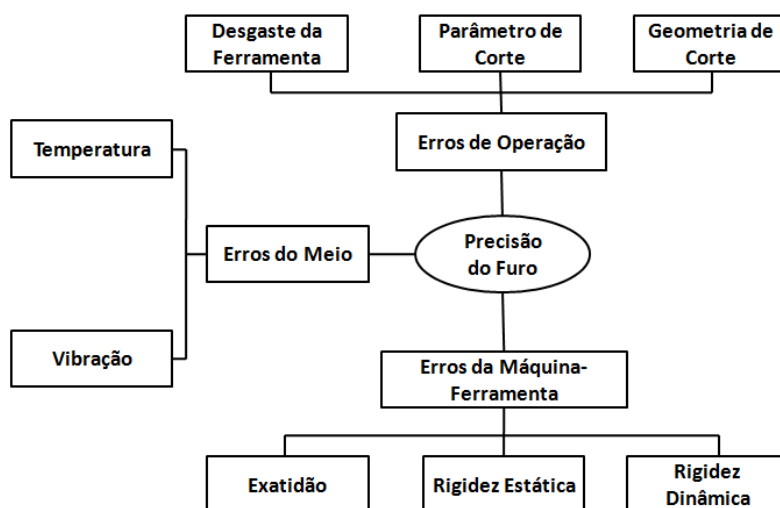


Figura 2.11 – Fatores que influênciam a precisão do furo. Adaptado de (SCHROETER, 1999).

Os desvios dimensionais ocorrem quando o diâmetro do furo produzido é maior que o diâmetro da broca. Quando as peças estão sujeitas a estes tipos de desvios, não conduzem necessariamente ao fato de que a peça não será utilizável, pois existem limites de tolerâncias

que podem suprir esses tipos de desvios. Os desvios de posição ocorrem quando o centro do furo se desloca da posição de referência (DRAKE, 1999).

Acabamento superficial - é outro parâmetro de extrema importância para a qualidade do furo. Um bom acabamento é essencial em furos utilizados como guias e em superfícies que requerem pintura ou que servirão de escoamento de fluidos (líquidos ou gases). A maioria das peças, quando fabricadas, está sujeita a adquirir irregularidades micrométricas em sua superfície, que são comumente chamados de rugosidade (JAHAN et al., 2009). Micheletti (1980) define rugosidade como sendo o conjunto de irregularidades da superfície real em relação à superfície teórica ou de referência. A Figura 2.12 mostra, esquematicamente, a superfície de uma peça usinada.

A simbologia abaixo se refere a cada termo identificado na Figura 2.12.

- ‘A’ – Rugosidade (ou textura primária);
- ‘B’ – Ondulação (ou textura secundária);
- ‘C’ – Orientação das irregularidades;
- ‘D-1’ – Passos das irregularidades da textura primária;
- ‘D-2’ – Passos das irregularidades da textura secundária.

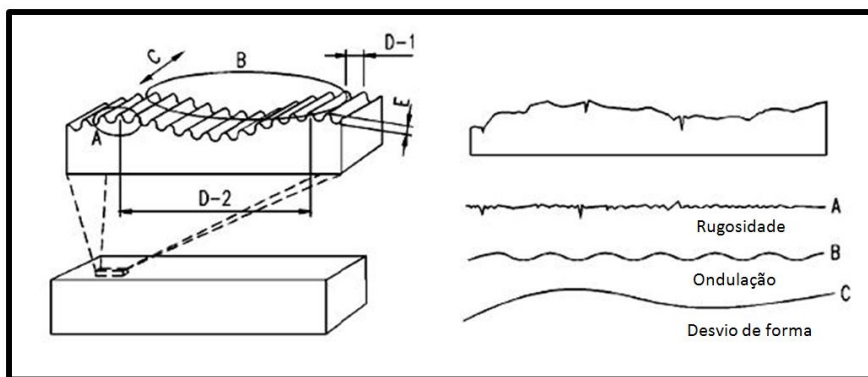


Figura 2.12 – Elementos que compõe a superfície (ALMEIDA, 2008).

O processo de furação produz variações nas superfícies de trabalho. Estas variações são muitas vezes imperceptíveis ou invisíveis a “olho nu”. São cristas e vales que as ferramentas formam nas superfícies usinadas, conhecidas como rugosidades. A rugosidade pode ser causada pelas variações no processo induzidas por vibrações, esforços de usinagem (F_t e M_t), imperfeições nos mecanismos das máquinas-ferramentas ou mesmo por defeitos da peça (SILVA, 2010). Segundo Almeida e Abraão (2007), a rugosidade diminui com o aumento do raio de quina da broca e com o aumento da dureza da peça. O último fenômeno pode ser

explicado pela redução de fluxo de material na lateral da ferramenta, fato, este, que ocorre comumente em matérias de alta ductilidade.

Com base na ABNT NBR 4282 (2002), é necessário o conhecimento de alguns conceitos importantes, para realização do trabalho de furação, como:

Rugosidade Média R_a – é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento, dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do comprimento de amostragem (μm);

Rugosidade Média R_z – é a profundidade média de rugosidade, definida como a distância média entre os cinco picos mais altos e os cinco vales mais profundos, dentro de um comprimento médio medido. Segundo Rosa (2005), este parâmetro pode ser usado em superfícies onde o perfil é periódico e conhecido, e pontos isolados não influenciam na função da peça a ser controlada, como por exemplo, superfícies de apoio ou ajustes prensados.

Rugosidade Total (R_t) – é a distância entre crista (pico) mais alta e o vale mais profundo, dentro do comprimento de amostragem;

Comprimento de Amostragem – (λ_c – *cut-off*) – é o comprimento de onda senoidal para o qual filtros de ondas transmitem 75% do valor real da amplitude da ondulação. É dado em milímetros e definido em função da qualidade da superfície.

2.2 – Esforços de Usinagem na Furação

As medições e estimativas dos esforços presentes nos processos de usinagem são de grande importância, não somente porque a potência requerida para executar o corte pode ser estimada, mas também, por fornecerem informações para avaliação e desenvolvimento de máquinas-ferramentas (MACHADO et al., 2009). O conhecimento dos esforços de usinagem permite uma melhor compreensão dos fenômenos de formação de cavaco e dos mecanismos de desgaste envolvidos, como também auxiliam na determinação das condições de corte e da energia gasta para o cisalhamento do material (CASTILLO, 2005; FERRARESI, 1977). O acréscimo dos esforços de corte durante a usinagem pode ocasionar deformação plástica da aresta de corte e, conseqüentemente, colapso da ferramenta (ZITOUNE e COLLOMBET, 2007).

Segundo Silva (2010), uma broca helicoidal, durante o processo de furação, é submetida a esforços de torção (devido à rotação da broca) e a esforços de compressão (devido ao avanço da broca). Desta forma, para estimar os esforços de um processo de furação, basta calcular o torque e a força de avanço do processo.

2.2.1 - Forças

O estudo das forças aplicadas à broca, durante o processo de furação, pode ser abordado considerando separadamente as seguintes ações (CASTILLO, 2005; MICHELETTI, 1980):

- Forças aplicadas sobre as arestas principais;
- Forças decorrentes do atrito nas guias;
- Forças que atuam sobre a aresta transversal.

A força de usinagem (F) que atua na aresta principal de corte durante a usinagem pode ser decomposta em três componentes: força de corte (F_c), força de avanço (F_f) e força passiva (F_p). A Figura 2.13, mostra a direção das componentes da força de usinagem para o processo de furação.

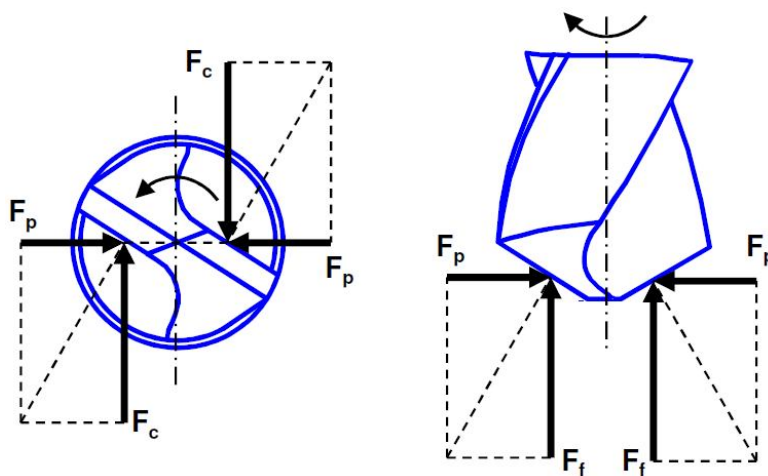


Figura 2.13 - Forças atuantes na aresta principal de corte (BOEIRA, 2010).

A definição dos termos a seguir se refere a cada termo identificado na Figura 2.13.

F – Força de Usinagem;

F_c – Força de Corte nas Arestas Principais;

F_f – Força de Avanço nas Arestas Principais;

F_p – Força Passiva nas Arestas Principais;

Os principais fatores que influenciam as forças de corte são: material da peça, revestimento da ferramenta, geometria da ferramenta de corte, condições de lubrificação, além do estado de afiação da ferramenta (CASTILLO, 2005).

Material da Peça – a medida que aumenta a porcentagem de carbono nos aços, a força de corte aumenta devido ao aumento de energia necessária para cisalhar o material. O aumento da porcentagem de fósforo causa a diminuição da força de corte. Diversos outros elementos e compostos como o chumbo, o boro, o bismuto e o sulfeto de manganês, entre outros, atuam no mesmo sentido. Durante a formação do cavaco, esses elementos deformam-se plasticamente e produzem planos de baixa resistência, onde a energia requerida para esta ruptura é menor;

Ferramentas Revestidas – ferramentas com revestimentos (principalmente nitreto de titânio - TiN) tendem a reduzir a adesividade do cavaco sobre a superfície de saída, reduzindo, dessa forma, a área de contato cavaco-ferramenta e, conseqüentemente, diminuindo a força de corte;

Geometria da Ferramenta de Corte – ângulos de saída (principalmente) e de inclinação provocam uma diminuição da força de corte à medida que seus valores aumentam, pois a deformação do cavaco diminui. Deve-se notar, no entanto, que o aumento do ângulo de saída diminui a resistência da ferramenta e aumenta sua sensibilidade aos choques. A diminuição do ângulo de folga aumenta o atrito entre a peça e a ferramenta e com isso cresce o valor da força de corte;

Condições de Lubrificação – influi sobre a força de corte modificando as condições de atrito entre cavaco e ferramenta. Quanto mais eficiente for a penetração do fluido de corte e quão maior for o efeito lubrificante deste fluido, maior será a redução da força de corte (em altas velocidades de corte essa penetração é dificultada);

Estado de Afiação da Ferramenta – na presença somente do desgaste de flanco, a força de corte aumenta à medida que o desgaste cresce, devido ao aumento do atrito peça-ferramenta. Quando o desgaste de cratera aparece juntamente com o desgaste de flanco, o crescimento da força de corte já não é tão proeminente.

Segundo Franco (1999) e Castro (2001), a força de corte é predominantemente responsável pelo torque que atua na furação. O atrito das guias da broca e dos cavacos na parede do furo também podem contribuir para o aumento do torque. A Equação 5 mostra o cálculo para a força de corte em cada aresta de corte (STEMMER, 2001).

$$F_c = k_c \cdot \frac{f \cdot D}{4} \quad (5)$$

onde:

F_c = Força de Corte [N];

k_c = Pressão Específica de Corte [N/mm²];

f = Avanço [mm];

D = Diâmetro da Broca [mm].

A força de avanço (F_f) é ocasionada pela resistência ao corte do material (penetração da ferramenta) no sentido do avanço. Esta força surge principalmente devido à ação da aresta transversal, quando esta apresenta um corte deficiente (HAMADE et al., 2006). A Equação 6, mostra o cálculo para a força de avanço (CASTRO, 2001).

$$F_f = k_f \cdot \frac{f \cdot D \cdot \sin\left(\frac{\sigma}{2}\right)}{2} \quad (6)$$

onde:

F_f = Força de Avanço [N];

k_f = Pressão Específica de Avanço [N/mm²];

f = Avanço [mm];

D = Diâmetro da Broca [mm];

σ = Ângulo de Ponta da Broca [°].

Durante a furação, a aresta transversal atua no sentido de extrudar material (“esmagamento do material”) para as arestas principais (BAKKAL et al., 2005). A deformação plástica provocada pela aresta transversal influencia a resistência ao avanço no processo de furação. O conhecimento do valor da força de avanço é importante para ter certeza que o eixo da máquina será capaz de suportar a operação (CASTRO, 2001; TEIXEIRA, 1995).

Segundo Micheletti (1980), os valores de resistência ao avanço dos materiais, durante o processo de furação, são influenciados pelo comprimento e pela inclinação da aresta transversal. Na furação do aço, por exemplo, o aumento do comprimento da aresta de corte ocasionará num incremento da força de avanço, entretanto, esse incremento é mais modesto no ferro fundido e praticamente nulo para ligas de alumínio e latão. A Figura 2.14 mostra a variação da força de avanço com o aumento do comprimento da aresta transversal no processo de furação.

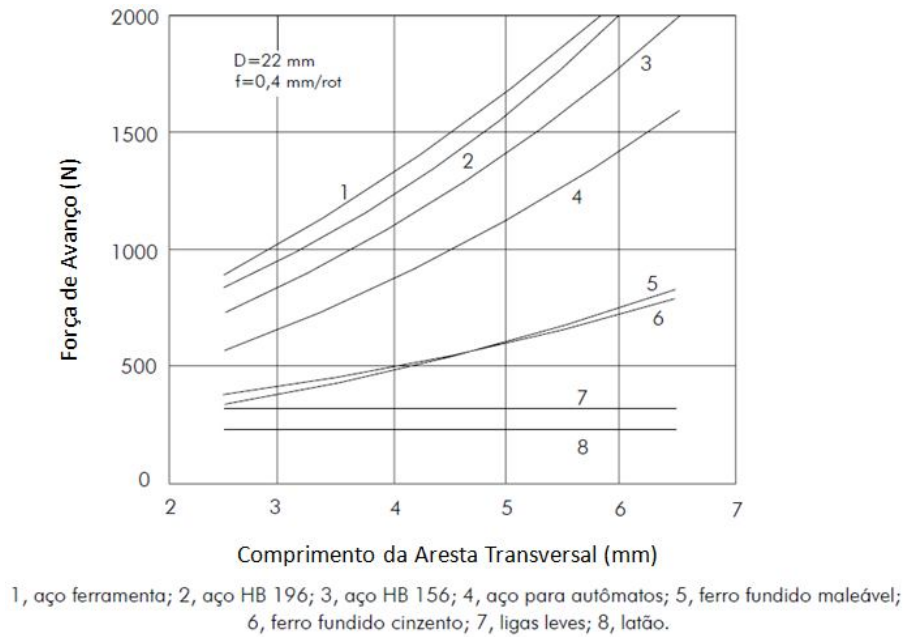


Figura 2.14 - Influência do comprimento da aresta transversal na força de avanço. Adaptado de (MICHELETTI, 1980).

As forças passivas (F_p) atuantes nas duas arestas principais anulam-se mutuamente devido à simetria das arestas principais em relação ao eixo central, de forma que seus valores são desprezíveis quando comparada com as forças de corte e de avanço (CASTRO, 2001). A falta de simetria pode ocasionar forças passivas de intensidades diferentes, ocasionando, dessa forma, flexão da broca durante o processo de furação (CASTILLO, 2005).

2.2.2 - Torque

As forças atuantes nas arestas principais da ferramenta são as principais responsáveis pelo torque na furação, contribuindo entre 70 e 90% do valor do mesmo (KARABAY, 2007; STEMMER, 2001). A Equação 7, mostra o cálculo para o torque no processo de furação, entretanto, pode-se obter o valor do torque diretamente, através do uso de dinamômetro na peça ou na ferramenta (FERRARESI, 1977).

$$T = k_c \cdot \left(\frac{f \cdot D^2}{8000} \right) \quad (7)$$

onde:

T = Torque [N.mm];

k_c = Força Específica de Corte [N/mm²];

f = Avanço [mm];

D = Diâmetro da Broca [mm].

2.2.3 – Medições de Esforços na Furação

A determinação das componentes da força na furação é normalmente feita com o emprego de dinamômetros especificamente projetados para esta finalidade. Atualmente, os sistemas mais conhecidos são os que utilizam transdutores de força piezelétricos, que constituem as chamadas plataformas piezelétricas. Estes sistemas utilizam as propriedades de certos materiais, como os de quartzo e de turmalina, de emitirem um sinal elétrico proporcional à deformação sofrida devido a um determinado carregamento. A utilização prática deste efeito se dá através da amplificação e digitalização deste sinal elétrico, permitindo assim uma análise quantitativa e qualitativa das forças surgidas durante o processo, bem como o tratamento matemático através de um *software* apropriado (CASTILLO, 2005; MOHAN et al., 2005). A Figura 2.15 apresenta esquematicamente a infra-estrutura utilizada para a realização dos ensaios de aquisição de esforços.

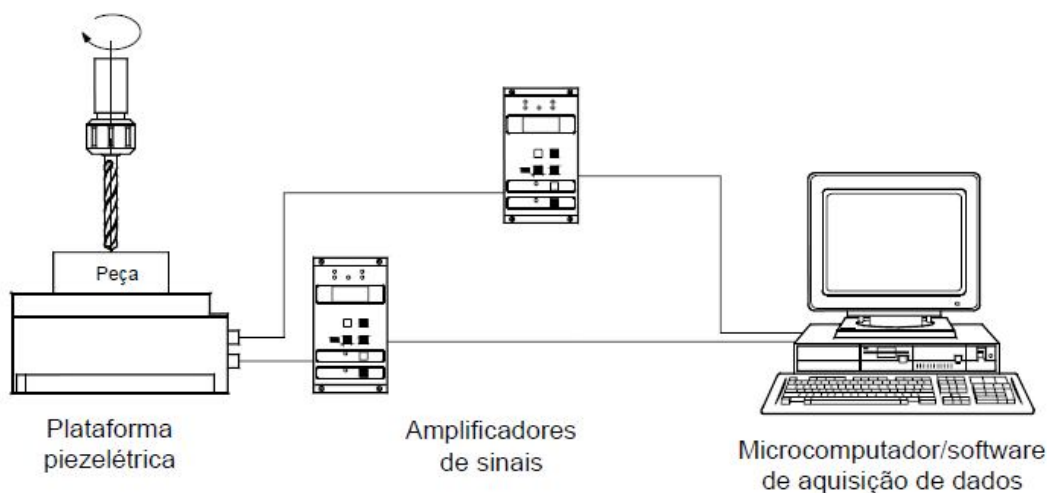


Figura 2.15 - Medição de forças com plataforma piezelétrica (SCHROETER, 1999).

2.3 – Materiais de Ferramentas Para Furação

O processo de usinagem baseia-se na remoção de material utilizando como ferramenta um material mais duro e mecanicamente mais resistente que a peça (MACHADO et al., 2009). O desenvolvimento de novos materiais para ferramentas de corte empregadas nas linhas de produção tem acompanhado o aumento da velocidade de corte, das taxas de avanço e vida das ferramentas. Para a seleção criteriosa do material da ferramenta, uma série de fatores devem ser ponderados, dentre os mais importantes podem ser mencionados os seguintes (DINIZ et al., 2006; FERRARESI, 1977; NAYEBI et al., 2008):

Material a ser Usinado - a dureza e o tipo de cavaco formado são duas das características do material da peça, que devem ser levadas em conta na escolha do material da ferramenta;

Processo de Usinagem – alguns tipos de processos que utilizam ferramentas rotativas de pequeno diâmetro necessitam de altíssimas rotações para se conseguir as velocidades de corte compatíveis com os materiais mais nobres de ferramentas;

Condição da Máquina-Ferramenta – máquinas-ferramentas com folgas, baixa potência e rotação exigem materiais de ferramentas mais tenazes e que não requeiram alta velocidade de corte;

Custo do Material da Ferramenta – alguns materiais de ferramenta, apesar de não conseguirem maior vida e maior produção, muitas vezes apresentam uma relação custo/benefício razoável;

Condições de Usinagem – condições de usinagem típicas de acabamento (altas velocidades de corte, baixos avanços e profundidade de usinagem) exigem ferramentas mais resistentes ao desgaste;

Condições da Operação – se o corte for do tipo intdesviompido e/ou o sistema máquina-peça-ferramenta-dispositivo de fixação for pouco rígido, exige-se uma ferramenta mais tenaz.

A seleção de materiais para ferramentas de usinagem, a fim de uma determinada aplicação, é um fator muito importante para o sucesso da fabricação. Como se sabe, durante a usinagem, as ferramentas estão sujeitas às altas temperaturas, altas pressões de contato e elevados valores de atrito do cavaco com a superfície de saída da ferramenta. Para uma usinagem eficiente é necessário que a ferramenta tenha propriedades que favoreçam o cisalhamento do material. Diniz et al. (2006) enumeraram as principais propriedades desejáveis em um material para ferramenta:

Dureza a Quente – dependendo do tipo de operação, a temperatura da ferramenta pode ultrapassar 1000 °C. Então, cada vez mais se procura materiais de ferramentas que possam atingir essa temperatura com dureza suficiente para suportar as tensões de corte;

Resistência ao Desgaste – significa principalmente resistência ao desgaste por abrasão, ou seja, resistência ao atrito. Esta propriedade está muito ligada à dureza à quente do material;

Tenacidade – representa a quantidade de energia necessária para romper o material. Uma ferramenta tenaz resiste bem aos choques inerentes do processo;

Estabilidade Química – representa a resistência ao desgaste por difusão (este tipo de desgaste é muito comum a altas temperaturas).

Para o caso do processo de furação, que geralmente ocorre sob condições severas de temperatura e atrito, o material da ferramenta requer alta resistência para suportar essas condições de exigências. A Figura 2.16 apresenta um diagrama de dureza e tenacidade dos principais grupos de ferramentas de corte. Note que o aumento da dureza leva a uma redução na tenacidade e vice-versa. Portanto, se a exigência for tenacidade, como no fresamento, por exemplo, o técnico responsável pela seleção deverá optar pela ferramenta posicionada mais a direita do diagrama, com sacrifício na dureza e resistência ao desgaste. Se a exigência for resistência ao desgaste e dureza, como no caso de usinagem de materiais resistentes e abrasivos, a escolha deverá recair naqueles materiais posicionados mais à esquerda do diagrama, com sacrifício da tenacidade (MACHADO et al., 2009).

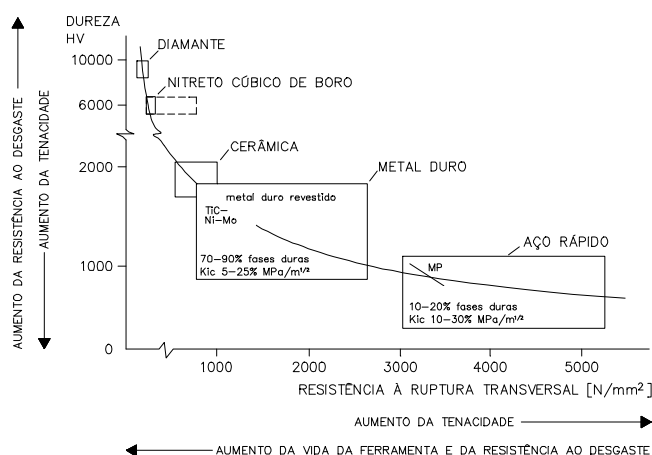


Figura 2.16 - Diagrama de dureza/tenacidade dos materiais de ferramentas (PASTOR, 1987).

2.3.1 – Brocas de Metal Duro

As brocas de metal duro são muito empregadas nas indústrias, porém, bem menos que as brocas de aço rápido. Elevada dureza a temperatura ambiente, resistência ao desgaste e tenacidade são algumas das características que pode ser obtidas nessas ferramentas, variando-se a composição dos elementos de liga. A introdução das brocas de metal duro possibilitou um aumento de 3 vezes nas velocidades de corte em relação às brocas de aço rápido, entretanto, este tipo de broca requer uma máquina com elevados valores de rotação, além de uma boa rigidez estática e dinâmica (CASTILLO, 2005; COSTA, 2004).

As ferramentas de metal duro são compostas basicamente de carboneto de tungstênio e cobalto e seu processo de fabricação é pela metalurgia do pó, que garante boa precisão dimensional das ferramentas (DINIZ et al., 2006). As ferramentas de metal duro produzidas inicialmente, contendo apenas WC e Co, obtiveram excelentes resultados na usinagem de ferro fundido cinzento e materiais não ferrosos, mas com baixa resistência ao desgaste na superfície de saída usinando aços. Para superar essa deficiência, pesquisas logo se iniciaram, pois os aços sempre foram os mais importantes materiais de uso geral em engenharia. Adicionou-se, então, TiC, TaC e/ou NbC ao WC + Co, verificando-se significativa redução no problema de formação de cratera durante a usinagem dos aços. As razões para essa diminuição do desgaste na superfície de saída são (MACHADO et al., 2009):

- Os carbonetos adicionados têm maiores durezas que o WC, portanto, apresentam maior resistência ao desgaste abrasivo;
- A solubilidade dos carbonos adicionados na matriz ferrosa é muito menor que o WC, o que inibe a difusão, um dos mecanismos de desgaste mais importante a altas temperaturas, característica da superfície de saída;
- A estabilidade química dos carbonetos adicionados é maior que a do WC, o que implica maiores dificuldades de dissolução e de difusão desses elementos.

Doré (2007) e Stemmer (2001) ressaltaram a importância de cada constituinte durante o processo de fabricação do metal duro da seguinte forma:

Carboneto de Tungstênio (WC) – é solúvel no cobalto, o que gera ligações internas de alta resistência. Possui grande resistência ao desgaste, mas sua utilização na usinagem de aço é limitada em função da tendência de difusão de carbono, e de dissolução no cobalto e no ferro;

Carboneto de Titânio (TiC) – aumenta a resistência à difusão dos metais-duros. Em contrapartida, causa a queda da resistência das ligações internas, o que ocasiona a queda da

resistência da ferramenta e fragiliza o material. Metais-duros com altos teores de TiC são usados na usinagem de aços com altas velocidades de corte;

Carboneto de Tântalo (TaC) – em pequenas porcentagens, restringe o tamanho de grão, aumentando a tenacidade e a resistência das arestas dos metais-duros;

Carboneto de Nióbio (NbC) – possui efeito semelhante ao TaC. Ambos os carbonetos ocorrem no metal duro na forma de Ta – (Nb) – C.

A norma ISO padronizou a classificação dos metais duros e designou como classe 'K' os que contêm WC + Co. Essa classe também é conhecida como “classe dos ferros fundidos” ou “classe aplicada a materiais que produzem cavacos curtos”. Em um sistema de cores de especificação internacional, coube a esse grupo a coloração vermelha. Quando se adiciona TiC, TaC e/ou NbC, a norma ISO os define como classe 'P'. Essa classe ficou conhecida como “classe dos aços ou dos materiais que produzem cavacos longos”, e tem o azul como cor de referência nos catálogos. A classe 'M' é uma classe intermediária, quando o WC + Co possui adições de TiC, TaC e/ou NbC, mas em menores quantidades que as apresentadas pela classe 'P'. A classe 'M' também é conhecida como “classe dos aços inoxidáveis”, tendo em vista a sua maior aplicação na usinagem dos aços inoxidáveis austeníticos. A coloração padrão dessa classe é o amarelo. Em meados de 2004, a norma ISO 513 apresentou uma nova classificação de grupos de ferramentas que não é exclusividade dos metais duros, abrangendo, também, as cerâmicas e os materiais ultraduros (PCD, CBN, PCBN, por exemplo): a classe 'N' é empregada para a usinagem dos metais e ligas não ferrosas (principalmente cobre e alumínio). Sua coloração padrão é o verde. A classe 'S' é utilizada na usinagem de superligas ou ligas resistente ao calor (titânio, níquel, cobalto, por exemplo). A cor marrom é coloração padrão desta classe. Enfim, a classe 'H' é empregada nos aços endurecidos (aços fundidos e ferros fundidos temperados) e tem a cor cinza como coloração padrão (MACHADO et al., 2009).

A Figura 2.17 mostra em detalhe a classificação da norma ISO 513 (2004) para os metais-duros e o tipo de operações e condições de usinagem recomendadas. Na usinagem de ferro fundido cinzento, por exemplo, é utilizado o metal duro do grupo de aplicação 'K'. Note que a letra de designação dos metais duros é sempre acompanhada de um número que representa a tenacidade e a resistência ao desgaste da ferramenta. Quanto maior o número, que normalmente varia de 1 a 50, maior a tenacidade e menor a resistência ao desgaste. Segundo Castillo (2005), a tenacidade do metal duro depende em grande medida do tamanho do grão, ou seja, quanto menor é o tamanho do grão, mais tenaz é a ferramenta.

Principais classes			Classes de aplicação			
Letra de identificação	Cor de identificação	Materiais a serem usinados	Metais duros			
P	Azul	Aços: Todos os tipos de aços e aços fundidos, exceto aços inoxidáveis com estrutura austenítica	P01 P10 P20 P30 P40 P50	P05 P15 P25 P35 P45	a ↑	b ↓
M	Amarelo	Aço Inoxidável: aço inoxidável austenítico e aço duplex (austenítico/ferrítico) e aço fundido	M01 M10 M20 M30 M40	M05 M15 M25 M35	a ↑	b ↓
K	Vermelho	Ferro Fundido: Ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafita esferoidal, ferro fundido maleável	K01 K10 K20 K30 K40	K05 K15 K25 K35	a ↑	b ↓
N	Verde	Metais não-ferrosos: Alumínio e outros metais não ferrosos, materiais não metálicos	N01 N10 N20 N30	N05 N15 N25	a ↑	b ↓
S	Marron	Superligas e titânio: Ligas especiais resistentes ao calor a base de ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio	S01 S10 S20 S30	S05 S15 S25	a ↑	b ↓
H	Cinza	Materiais duros: Aços endurecidos, ferros fundidos endurecidos, ferros fundidos resfriados	H01 H10 H20 H30	H05 H15 H25	a ↑	b ↓
a – Aumento da velocidade de corte, aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta b – Aumento do avanço, aumento da tenacidade do material da ferramenta						

Figura 2.17 – Classificação dos metais duros (ISO 513, 2004).

2.3.2 – Brocas Revestidas

As primeiras referências sobre a aplicação de revestimentos em peças e componentes, com o objetivo de melhorar sua resistência ao desgaste datam da década de 1930, resultado dos esforços de fabricantes suíços que tinham como objetivo aumentar a vida dos componentes de seus relógios (SUH, 1976).

A utilização de revestimentos nas ferramentas é uma alternativa para melhorar as propriedades de resistência ao desgaste abrasivo e químico. Os revestimentos atuam de duas formas importantes: a primeira consiste na atuação do revestimento como barreira térmica entre o material cisalhado (peça) e o material de corte (ferramenta), reduzindo o aporte térmico para o substrato da ferramenta. A segunda é como camada lubrificante, reduzindo o coeficiente de atrito entre cavaco/ferramenta/peça (EDWARDS, 1993; JAREO e BRADBURY, 1999; KÖNIG e KLOCKE, 1997; KUSTAS et al., 1997).

Em função das suas propriedades, os revestimentos utilizados nas ferramentas de usinagem são classificados como endurecedores ou lubrificantes. As camadas do primeiro tipo

possuem dureza, freqüentemente superior a 2500 HV (apenas a título de comparação, o metal duro tem dureza entre 1500 e 2000 HV). Essas camadas, além do reduzido desgaste por abrasão, proporcionam pouca adesão dos cavacos gerados na usinagem. Isto, por sua vez, leva à redução do desgaste por adesão, coeficiente de atrito e forças de corte (SCHULTZ et al., 2000). As camadas lubrificantes têm uma primeira camada de material duro como base, por cima da qual é depositada uma camada de material macio (por exemplo, bissulfeto de molibdênio- MoS_2) ou uma segunda camada de material duro com propriedades lubrificantes (por exemplo, carbono contendo metal - WC/C). Em ambos os casos o objetivo é reduzir o atrito, possibilitando a usinagem sem fluido de corte ou, pelo menos, a usinagem com mínima quantidade de lubrificante (MIRANDA, 2003). Outra função importante do revestimento é impedir que o calor proveniente do cisalhamento do material passe para o substrato, por isso, camadas de revestimentos de baixa condutividade térmica são comumente empregadas.

A aplicação de revestimentos em ferramentas de corte é realizada pela precipitação de materiais duros na fase de vapor. A deposição da camada de revestimento pode se dar por dois processos: O PVD (*Physical Vapour Deposition*) e o CVD (*Chemical Vapour Deposition*). A espessura desses revestimentos está normalmente na faixa de 1 a 12 μm , o que não é relevante dimensionalmente em ferramentas para aplicações de pouca exatidão (BORK, 1995; CASTILLO, 2005; MIRANDA, 2003).

Deposição Física de Vapor – PVD (*Physical Vapor Deposition*) - os processos de deposição física de vapor (comumente chamados processos de camadas finas) são processos de deposição atômica, no qual o material de revestimento em estado sólido ou líquido é vaporizado na forma de átomos ou moléculas e transportado em forma de vapor através de um meio de vácuo ou de baixa pressão até o substrato onde é condensado. Os revestimentos de TiN, TiAlN e TiCN são empregados nas ferramentas com este tipo de deposição (CASTILLO, 2005; DONALD, 1998; SANTOS, 2002). As mais avançadas tecnologias de PVD usadas para a aplicação de revestimentos sobre substratos de WC-Co são: *Sputtering*, *ion plating*, evaporação reativa ativada e implantação iônica. O processo *Sputtering*, por exemplo, é realizado dentro de uma câmara a alto vácuo. Este processo baseia-se no fato de íons com alta energia cinética situarem-se na placa do material a ser vaporizado, e, assim, através da transferência de impulsos elétricos em presença de um gás de processo (usualmente argônio) serem projetados para os átomos responsáveis pelo revestimento. A nuvem de átomos e moléculas do material da camada espalha-se pela câmara de revestimento e é depositada no substrato como uma camada (GOPAL, 1998; KONIG e KLOCKE, 1997). A Figura 2.18 mostra o processo *Sputtering* para a obtenção de revestimentos em ferramentas de metal duro.

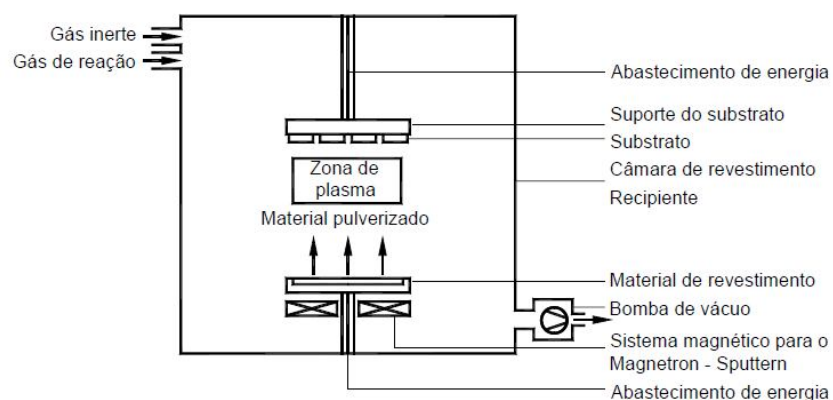


Figura 2.18 – Processo *Sputtering* (CASTILLO, 2005).

Deposição Química de Vapor – CVD (*Chemical Vapor Deposition*) - é o processo mais utilizado para a aplicação de revestimentos em metal duro, pois permite uma boa difusão entre o revestimento e o substrato. É realizado em um forno com atmosfera protetora de hidrogênio, temperatura na faixa de 1000°C e pressão levemente negativa, o que facilita regular e controlar as camadas de revestimento depositadas sobre o substrato de metal duro. Os revestimentos de TiC, Al_2O_3 e TiN são empregados nas ferramentas com este tipo de deposição (DINIZ et al, 2006; DORÉ, 2007; SANTOS, 1999; STEMMER, 2001). A Figura 2.19 mostra o processo de deposição química de vapor.

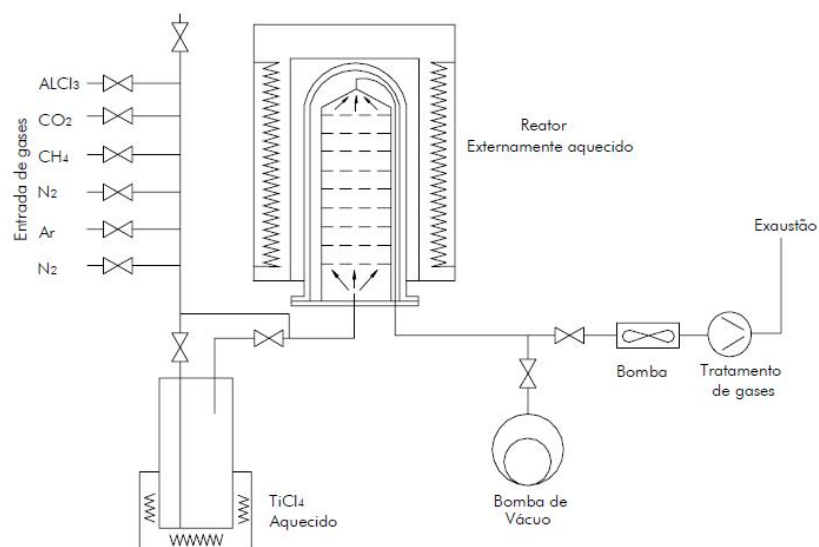


Figura 2.19 – Processo de deposição química de vapor (CASTILLO, 2005).

Neste processo uma câmara reatora externamente aquecida é ligada a várias conexões de gases reagentes. As peças ou componentes, totalmente limpos, são colocados dentro do reator. Logo após, o reator é fechado e todo o oxigênio é extraído, fornecendo uma atmosfera protetora controlada. Subseqüentemente, o reator é aquecido até uma temperatura determinada para a execução do processo e a atmosfera de gás protetor é substituída pelos gases usados na reação. Para a conclusão do processo de revestimento, é utilizada uma atmosfera de gás inerte durante todo o ciclo de refrigeração (CASTILLO, 2005; GOPAL, 1998).

Diante das alternativas disponíveis, os fabricantes de ferramentas oferecem produtos revestidos por meio de ambos os processos. A Tabela 2.2 apresenta uma comparação entre os dois métodos de deposição de revestimento empregados nas ferramentas de corte.

Tabela 2.2 – Comparação entre revestimentos CVD e PVD. (MACHADO et al., 2009).

	CVD – Deposição Química a Vapor	PVD – Deposição Física a Vapor
Temperatura de revestimento	Aproximadamente 1000 °C	Aproximadamente 500 °C
Tenacidade	Reduzida	Não é afetada
Aresta de corte	Arredondamento requerido	Pode ser quina viva
Espessura do revestimento	Até 12 µm	Até 4 µm
Camadas	Multicamadas TiC-TiN; TiN-TiCN-TiN; TiC-Al ₂ O ₃	TiN; TiCN; TiAlN
Principais aplicações	Torneamento e mandrilamento	Fresamento, rosquemaneto, furação

Os principais tipos de revestimentos utilizados atualmente na indústria são: TiN, TiC, Al₂O₃, TiCN e TiAlN. Cada um desses revestimentos tem características próprias como cor, dureza e aplicabilidade (DORÉ, 2007). A seguir são descritas as características de cada tipo de revestimentos (BALZERS, 2006; DINIZ et al, 2006; DORÉ, 2007; MACHADO et al., 2009; REIS, 2004; STEMMER, 2001; VIANA, 2004; WEINGAERTNER e SCHROETER, 2002):

Nitreto de Titânio (TiN) - Geralmente usado na camada externa de revestimento, conferindo à pastilha a coloração amarelada que, entre outras coisas, facilita a observação do desgaste. Reduz os esforços e temperaturas durante a usinagem devido ao seu baixo coeficiente de atrito, além de ser mais estável quimicamente do que o TiC. A espessura da camada de TiN varia entre 5 e 7 µm;

Carboneto de Titânio (TiC) - Aplicado em camadas que variam de 4 a 8 μm , é geralmente a primeira (ou única) camada de revestimento, por possuir alta afinidade com o metal duro, o que lhe garante uma boa adesão ao núcleo da ferramenta. Possui elevada dureza (3000 HV, a maior entre os materiais utilizados como cobertura), alta resistência ao desgaste por abrasão e baixa tendência de soldagem com o material da peça. Outra característica é um menor coeficiente de atrito e baixa condutividade térmica, que gera temperaturas mais baixas na aresta da ferramenta, diminuindo a difusão;

Óxido de Alumínio (Al_2O_3) - Material de maior estabilidade química encontrado na natureza. Exatamente por isso, é usado como cobertura para garantir a estabilidade química do núcleo da ferramenta e evitar o desgaste causado pela difusão de átomos do material da peça para a ferramenta e vice-versa. Garante estabilidade térmica em temperaturas elevadas, possui alta resistência à abrasão, além da resistência à oxidação, diminuindo a formação do desgaste por cratera na ferramenta de corte. Possui elevada dureza, porém apresenta baixa resistência a choques térmicos e mecânicos;

Carbonitreto de Titânio (TiCN) - Resistente ao desgaste de flanco como o TiC e estável quimicamente como o TiN, resistindo contra desgaste de cratera e oxidação. O TiCN apresenta também uma excelente adesão ao substrato da ferramenta de metal duro.

Nitreto de Titânio Alumínio (TiAlN) - Possui elevada resistência ao calor (durante a usinagem, ocorre uma reação de oxidação na superfície do revestimento, dando origem à alumina). Adequado para a usinagem a seco. É indicado para usinagem de materiais abrasivos, como o ferro fundido e as ligas Al-Si. Esse revestimento é conhecido comercialmente com o nome de Futura[®].

Nitreto de Cromo Alumínio – AlCrN – Este revestimento é amplamente empregado nas brocas, já que proporciona a utilização de velocidades de corte mais elevadas, excelentes evacuação dos cavacos e melhor qualidade dos furos. Este revestimento oferece desempenho superior à dos revestimentos com base em titânio e pode ser aplicado em todas as classes de aço e ferro fundido, com refrigeração interna ou externa e ainda em trabalhos a seco. Também possui elevada resistência à abrasão, uma menor tendência à adesão, uma grande tenacidade e uma baixa rugosidade da sua superfície, permitindo, dessa forma, aumentar o rendimento das operações de furação. A adição de titânio e silício torna esse tipo de revestimento conhecido comercialmente com o nome de Helica[®].

Ao longo deste trabalho será feita uma comparação entre as ferramentas revestidas com nitreto de titânio alumínio (TiAlN) e nitreto de cromo alumínio (AlCrN), além de ferramentas sem revestimentos. A Tabela 2.3 indica algumas propriedades e aplicações destes revestimentos.

Tabela 2.3 – Comparação entre revestimentos TiAlN e AlCrN (BALZERS. 2006).

	Nitreto de titânio alumínio	Nitreto de cromo alumínio
Material dos revestimentos	TiAlN	AlCrN
Microdureza (HV)	3300	3000
Coeficiente de atrito no aço (seco)	0,25	0,25
Temperatura máxima de serviço (°C)	900	1100
Cor do revestimento	cinza	cobre
Aplicações	- Ferramentas em aço de alta resistência e de carboneto submetidas a esforços térmicos elevados.	- Brocas de aço rápido e de metal duro com refrigeração interna ou externa; - Execução de furos profundos com brocas.

A combinação de TiC, TiN, TiCN e Al_2O_3 deu origem ao revestimento multicamada no início da década de 80, possibilitando, dessa forma, o aumento da vida e campo de aplicação das ferramentas (HUNT e SANTHANAM, 1990). A Figura 2.20 mostra a variação da condutividade térmica com a temperatura para alguns tipos de revestimentos.

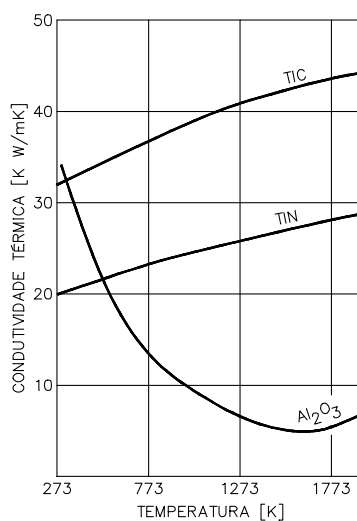


Figura 2.20 - Influência da temperatura na condutividade térmica de alguns revestimentos utilizados nas ferramentas de corte (WERTHEIM et al., 1982).

Normalmente, o TiC é um revestimento que é muito utilizado como a primeira camada, pois este garante uma adesão muito boa com o substrato. O Al_2O_3 tem várias vantagens, sendo as principais, inércia química e dureza e, portanto, resistência ao desgaste. Um fato interessante do Al_2O_3 é a redução de sua condutividade térmica com o aumento da temperatura (MACHADO et al., 2009). Essa característica de revestimento funciona como uma barreira térmica para a superfície da ferramenta (COSTA, 2004).

Um dos revestimentos multicamada amplamente empregado nas ferramentas de corte é o revestimento TiAlN (Futura®). Possui boa dureza a quente e elevada resistência à oxidação, principalmente quando empregada nas ferramentas para furação profunda. Este tipo de revestimento garante uma remoção segura dos cavacos e a continuidade do avanço, mesmo onde as profundidades de corte forem superiores a $3 \times D$. É bastante empregado em ferramenta que são submetidas à elevados esforços térmicos (BALZERS, 2006).

2.5 – Desgaste e Vida das Brocas

Machado et al. (2009) definem desgaste em ferramentas de usinagem, como sendo a destruição de uma ou de ambas superfícies que compõem um sistema tribológico, geralmente envolvendo perda progressiva de material. Segundo a norma ISO 3685 (1993), o desgaste de uma ferramenta é o resultado de mudanças na forma da ferramenta a partir do seu estado original, que acontecem durante o processo de corte, provocadas pela perda gradual de material ou deformação.

O desgaste é um fenômeno negativo que ocorre durante a usinagem com todas as ferramentas de corte, principalmente nas condições mais críticas e são fortemente dependentes da combinação do material da peça a ser usinada, do material da ferramenta e da geometria do cavaco. Os parâmetros de corte, como velocidades, avanços e profundidades de corte, assim como o sistema de arrefecimento da interface cavaco/ferramenta, determinarão a forma de desgaste predominante (HEINEMANN et al., 2006; MOTA, 2006).

2.5.1 – Formas de Desgaste

Nos processos de furação, além do desgaste de cratera na superfície de saída e de flanco na superfície de folga, as brocas helicoidais podem apresentar desgastes na aresta transversal, na quina (ponta de corte) e nas guias (SCHROETER, 1999; NIZAM e YILBAS,

2000). A Figura 2.21 mostra as formas de desgaste comumente encontrados em brocas helicoidais.

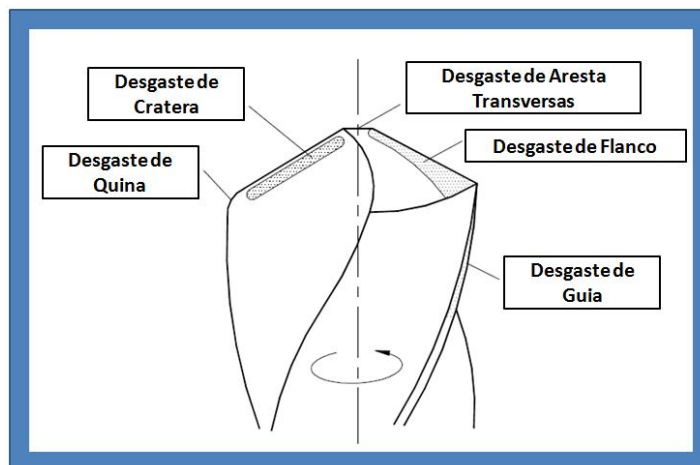


Figura 2.21 – Desgaste de uma broca helicoidal. Adaptado de (BRINKSMEIER, 1990).

Segundo Teixeira (1995) e Harris et al. (2003), diferentes mecanismos podem originar esses desgastes e a evolução do mesmo se dá de forma semelhante na ponta da ferramenta. Nas zonas de corte predominam as solicitações térmicas provocadas pelo calor gerado proveniente do atrito dos cavacos na superfície de saída. Esse carregamento, dependendo da temperatura do processo, pode levar ao desgaste de cratera na ferramenta.

Uma das zonas mais críticas da broca é a zona da aresta transversal, onde ocorrem danos a partir do primeiro contato com o material a usinar. As grandes solicitações mecânicas, ao mesmo tempo em que as velocidades de corte nesse ponto tendem a zero, levam a um desgaste progressivo pelo ‘esmagamento’ do material. Estes esforços podem causar lascamentos e conseqüente destruição da aresta transversal, podendo provocar caldeamento e quebra da ferramenta (CASTILLO, 2005).

Brinksmeier (1990) constatou que o desgaste de guia pode aumentar o calor gerado devido a um maior atrito entre a peça e a ferramenta, ocasionando, dessa forma, à dilatação térmica e a um crescimento radial da broca gerando o efeito de “*Stick Slip*”, ou seja, a guia adere e escorrega na parede do furo constantemente. Segundo Castro (2001), este fenômeno de “*Stick Slip*” causa vibrações e trepidações no processo de corte podendo levar à quebra catastrófica da ferramenta.

O desgaste na ponta de corte é proveniente das solicitações térmicas devidas à maior velocidade de corte e à geração de calor ocasionada pelo atrito dos cavacos contra a superfície

de saída, além do atrito das guias da broca contra a parede do furo (CASTILLO, 2005; RAWAT e ATTIA, 2009; SCHROETER, 1999).

Geralmente as medições desses desgastes são feitas por um microscópio de ferramentaria com aumento de 10 a 50 vezes. Mesmo quando houver deformação plástica, ou seja, retração da mesma, a marca de desgaste deve ser medida em relação à posição original da aresta considerada, sendo necessária a utilização de uma referência. A Figura 2.22 mostra, em detalhe, um exemplo do desgaste médio (VB_B) e o máximo (VB_{BMax}) nos flancos de uma broca.

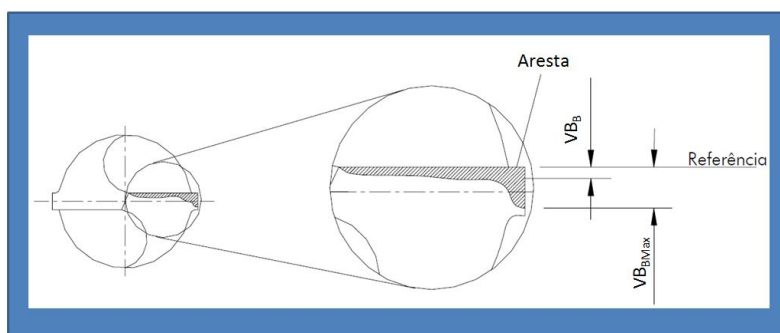


Figura 2.22 – Desgaste de flanco em brocas helicoidais. Adaptado de (SCHROETER, 1999).

A Tabela 2.4 identifica as causas de problemas que podem ocorrer nas brocas durante o processo de furação.

Tabela 2.4 – Problemas do processo de furação e suas causas (COSTA, 2004; STEMMER, 1995).

Problema	Causa
Achatamento da aresta transversal.	Avanço excessivo.
Desgaste acentuado das quinas.	Velocidade de corte alta.
Marca de desgaste uniforme no flanco.	Avanço e velocidade de corte corretos.
Grandes aderências de material na superfície de saída.	Ângulo de saída muito pequeno em relação ao material usinado.
Leve colagem de material no flanco ou polimento da superfície perto da ponta da broca.	Ângulo de folga muito pequeno; Avanço muito alto.
Aderência de material nas guias.	Falta de redução do diâmetro da broca em direção a haste; Forças transversais, devidas à afiação assimétrica das arestas.
Colagem de material no final dos canais da broca.	Comprimento de hélice muito pequeno; Frequentes saídas da broca, para a remoção dos cavacos, podem eliminar este problema.

Durante a usinagem dos metais a ação do corte muda a forma e, portanto, a geometria original da ferramenta de corte ocasionado por um desgaste progressivo tanto na superfície de folga como na superfície de saída da ferramenta (CAMPOS, 2004). Antes que a ferramenta alcance um desgaste de grandes proporções, de maneira a colocar o processo de corte em risco, a ferramenta deverá ser reafiada ou substituída.

O tempo em que uma ferramenta de corte trabalha efetivamente antes de ser reafiada ou substituída é denominado de “vida da ferramenta de corte”. Um critério deve ser usado então, para determinar o fim de vida da ferramenta, de maneira a manter o processo produtivo dentro de condições econômicas adequadas.

Em usinagem, normalmente, as ferramentas de corte se desgastam seguindo uma curva padrão, representada na Figura 2.23. Na ordenada o desgaste pode ser representado por qualquer um dos parâmetros que identificam os desgastes de flanco, cratera ou entalhe (Figura 2.21).

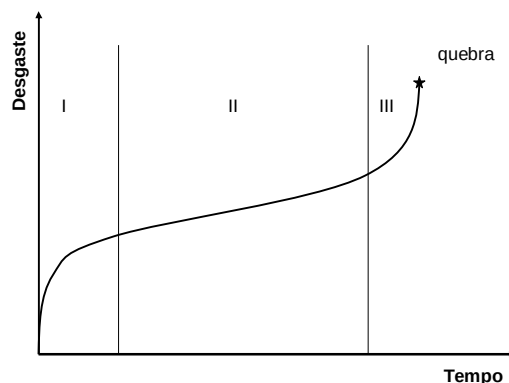


Figura 2.23 – Comportamento do desgaste de uma ferramenta de corte com o tempo de corte (MACHADO et al., 2009).

Note, da Figura 2.23, que a evolução do desgaste são distinguidos em três estágios (I, II e III). O estágio I é o inicial, nos primeiros minutos de corte, quando o desgaste apresenta uma taxa decrescente de desgaste (a tangente a curva apresenta ângulos de inclinação decrescente). Neste estágio, a ferramenta sofre um desgaste acelerado no início do corte, natural de adequação ao sistema tribológico envolvido, como se a cunha cortante estivesse se acomodando ao processo, passando então a apresentar uma taxa de desgaste cada vez menor com o passar do tempo, e uma primeira inflexão no final deste estágio é observada. O estágio II se caracteriza por uma taxa de desgaste constante ao longo do tempo (a tangente à curva apresenta ângulo de inclinação constante). A ferramenta já se encontra totalmente adequada ao processo e os mecanismos específicos de desgaste operam numa taxa

constante, até atingir uma nova inflexão. No começo do estágio III acontece o início de uma aceleração no desgaste, aumentando acentuadamente a taxa (a tangente à curva apresenta ângulo de inclinação crescente), promovendo em curto espaço de tempo a quebra da ferramenta, caso o corte tenha continuidade dentro deste estágio. Isto acontece porque o desgaste atingiu níveis tão elevados, que as temperaturas e tensões envolvidas irão promover, eventualmente o colapso da ferramenta. Os técnicos envolvidos com o processo de usinagem devem, portanto, observar atentamente a evolução desta curva, para evitar que a mesma atinja o estágio III, pois dentro deste estágio o tempo para ocorrer a quebra é muito curto, tornando-se muito difícil evitá-la (MACHADO et al., 2009). As consequências de uma quebra de ferramenta em serviço podem representar em custo muito elevado. O mais comum é o refugo da peça, sendo, portanto, uma responsabilidade maior quanto mais nobre for o material.

2.5.2 – Mecanismos de Desgaste

Durante os processos de usinagem, a cunha cortante sofre elevadas solicitações térmicas, mecânicas e tribológicas, proporcionando a ação de diversos mecanismos de desgaste que atuam simultaneamente no sentido de degradar as ferramentas. A Figura 2.24 mostra os mecanismos de falha que podem resultar em sinais típicos de desgaste.

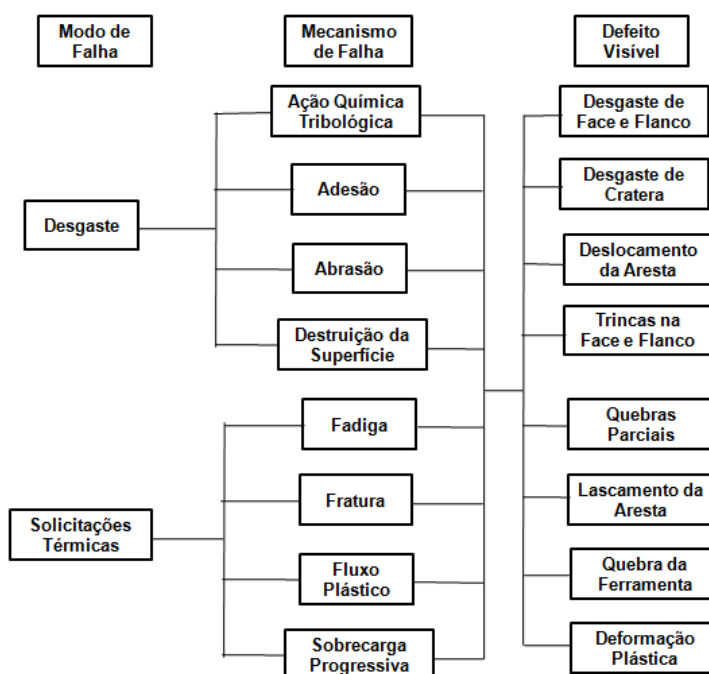


Figura 2.24 – Falhas em ferramentas de corte. Adaptado de (BUNSHAH, 2001).

Os mecanismos de desgaste dependem da forma de atuação da ferramenta durante o corte, ou seja, dependem basicamente das características da ferramenta, dos movimentos de corte e avanço, dos parâmetros de corte e das condições de corte (COSTA, 2004; STEMMER, 1995; EDWARDS, 1993; DINIZ et al., 2006). Os diversos mecanismos de desgaste agem simultaneamente, de forma que, tanto sua causa como seu efeito dificilmente podem ser distinguidos entre si, resultando, dessa forma, em uma complexa interação de vários fatores de desgaste (BUNSHAH, 2001; KONIG e KLOCKE, 1997). A abordagem de cada mecanismo de desgaste foge do escopo deste trabalho e o aprofundamento no tema pode ser facilmente encontrado na literatura (TREN e WRIGHT, 2000; MACHADO et al., 2009; DINIZ et al., 2006; KÖNIG, 1990)

2.5.3 – Vida de Brocas

Ferraresi (1977) define a vida de ferramenta como o tempo em que a mesma trabalha efetivamente (deduzidos os tempos passivos), até perder a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. Segundo Castillo (2005), a elevação da temperatura e do torque, além de alterações no acabamento superficial e geometria do furo são indicadores do aparecimento de desgastes na broca durante o processo de usinagem. Em ferramentas de metal duro, por exemplo, o aumento do torque, no caso de um desgaste excessivo, provoca o lascamento e destruição total da aresta. A utilização de uma ferramenta até este ponto não é recomendável, pois será necessário um longo trabalho de reafiação com remoção de uma extensa camada de material, antes que se possa restabelecer uma aresta adequada para o corte.

Na prática industrial é comum adotar como critério de fim de vida da ferramenta algumas variantes como (BRINKSMEIER, 1990; COSTA, 2004; HEINEMANN et al., 2006; STEMMER, 1995):

Tempo de Máquina - é o tempo em que a ferramenta fica na máquina cortando intermitentemente, antes de uma reafiação (indicado para máquinas automáticas);

Tempo Efetivo de Corte - é o tempo em que a ferramenta pode cortar efetivamente. É considerado um dos critérios mais usuais;

Volume de Material Removido - é o volume de material removido durante reafiações sucessivas. Pode ser calculado a partir dos parâmetros de corte;

Número de Peças Produzidas - critério bastante utilizado na produção seriada. Na furação, por exemplo, pode-se empregar o critério número de furos produzidos e/ou comprimento de usinagem como critérios de fim de vida.

A vida da ferramenta também pode ser expressa, através do tempo total de trabalho (caso de cortes interrompidos), percurso de corte (km), percurso de avanço (mm) e velocidade de corte para um determinado tempo de vida. Sistemas modernos de usinagem utilizam, hoje em dia, o controle automático do desgaste indiretamente por meio do monitoramento de forças, potência, vibrações do sistema ou emissão acústica (MACHADO et al., 2009).

Outros critérios de fim de vida também podem ser utilizados como referência (FERRARESI, 1977; KONIG e KLOCKE, 1997; STEMMER, 2001):

- Falha completa da ferramenta;
- Falha preliminar da ferramenta;
- Vibrações intensas da peça ou da ferramenta;
- Formação excessiva de rebarbas;
- Variação na forma dos cavacos;
- Aumento da força de avanço;
- Aumento da temperatura da aresta.

2.5.4 – Fatores que Influenciam a Vida de Brocas

A progressão do desgaste é influenciada principalmente pela velocidade de corte, depois pelo avanço e por último pela profundidade, ou seja, a redução da vida da ferramenta causada por um aumento de 10% na velocidade de corte é muito maior do que aquele que ocorreria se o avanço fosse aumentado na mesma proporção (DINIZ et al., 2006, KENNEDY, 2009). Bonifácio e Diniz (1994) comprovaram, durante o torneamento do aço 4340, a maior influencia da velocidade de corte em relação ao avanço (Tabela 2.5).

Tabela 2.5 – Vida de ferramenta (percurso de corte) no torneamento ($a_p = 1$ mm; aço 4340; Ferramenta de metal duro revestida P35) (BONIFÁCIO E DINIZ, 1994).

Avanço (mm/volta)	Velocidade de Corte (m/min)	Vida (m)
0,16	300	1450
0,20	300	1530
0,24	300	1550
0,20	250	2600
0,20	300	1530
0,20	350	650

Como citado anteriormente, a velocidade de corte é o parâmetro que mais influencia no desgaste, pois com o aumento da mesma, aumenta a energia (calor) que é adicionada ao processo, sem um aumento da área da ferramenta que recebe este calor. O aumento do avanço, por sua vez, também aumenta a quantidade de calor adicionada ao processo, porém, também aumenta a área da ferramenta que recebe este calor (DINIZ et al., 2006).

Segundo Diniz et al. (2006), a influência da profundidade de usinagem é menor, já que o aumento da profundidade de usinagem não altera a energia destinada ao corte por unidade de área e nem a velocidade de corte, entretanto, aumenta somente o volume retirado através da utilização de uma maior porção da aresta de corte.

A seleção inadequada do tipo de broca para uma determinada operação também pode reduzir a vida da ferramenta (BESTE e JACOBSON, 2008). Cselle (1998) verificou, na furação do aço liga 42CrMo4, a redução da vida das ferramentas que trabalham em condições inadequadas (Figura 2.25). Note que os resultados mostraram que, em condições adequadas de uso, as brocas de metal duro integral apresentaram um melhor rendimento em relação às brocas com pastilhas soldadas. Note que a utilização de condições inadequadas provocou queda na vida de ambos os tipos de ferramenta. A queda verificada para a vida da ferramenta de perfil integral foi de aproximadamente 53%, ao passo que para a ferramenta com pastilhas soldadas a queda foi de apenas 4% (SANTOS, 2002).

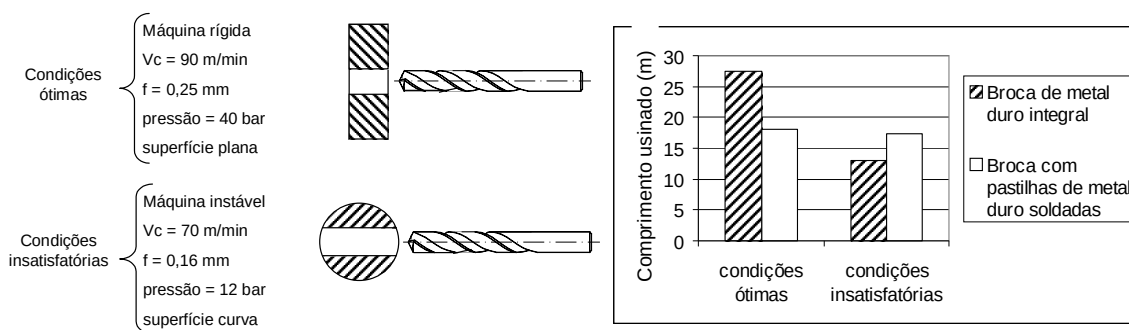


Figura 2.25 – Comparação da vida entre brocas com pastilha soldada e de metal duro integral em diferentes condições de utilização. Material: aço liga 42CrMo4 (CSELLE, 1998).

Além dos parâmetros de usinagem, o material da peça (composição química, tamanho do grão, tratamento térmico, por exemplo), o material da ferramenta (composição, dureza e resistência ao desgaste, geometria, tenacidade, entre outros) e as propriedades do fluido de corte (propriedades refrigerantes e lubrificantes, forma de aplicação) influenciam diretamente a vida da broca (MACHADO et al., 2009).

2.6 – Fluidos de Corte Aplicados na Furação

Os fluidos de corte surgiram com o objetivo final de reduzir o custo de usinagem pela redução do desgaste da ferramenta, além de aumentar a taxa de produção pelo emprego de maiores velocidades e avanços no corte. O fluido de corte também possibilita uma melhoria na qualidade das superfícies usinada. Modernamente, fatores como custo e a pressão exercida por agências de proteção ambiental e de saúde estão apontando na direção da usinagem a seco sempre que for possível, ou pelo menos na redução da vazão do fluido de corte (usinagem com Mínima Quantidade de Fluido de Corte - MQF). Estas técnicas estão sendo cada vez mais possíveis de realização, devido ao enorme avanço tecnológico nas áreas dos materiais e geometrias das ferramentas de corte (COSTA, 2004).

A atuação do fluido de corte na zona de cisalhamento secundário se dá de modo a reduzir o atrito na interface ferramenta/cavaco e, conseqüentemente, a geração de calor. O mesmo ocorre na zona de contato da peça e a superfície de folga da ferramenta. O atrito na interface ferramenta-cavaco é geralmente considerado o mais significativo devido, sobretudo, à pressão de contato nesta região ser usualmente de 2 a 3 vezes maior do que a pressão de contato que ocorre na interface ferramenta-peça, podendo, em alguns casos, exceder 1380 MPa (CASTILLO, 2005; MACHADO et al., 2009). A Figura 2.26 ilustra a localização do ângulo de cisalhamento.

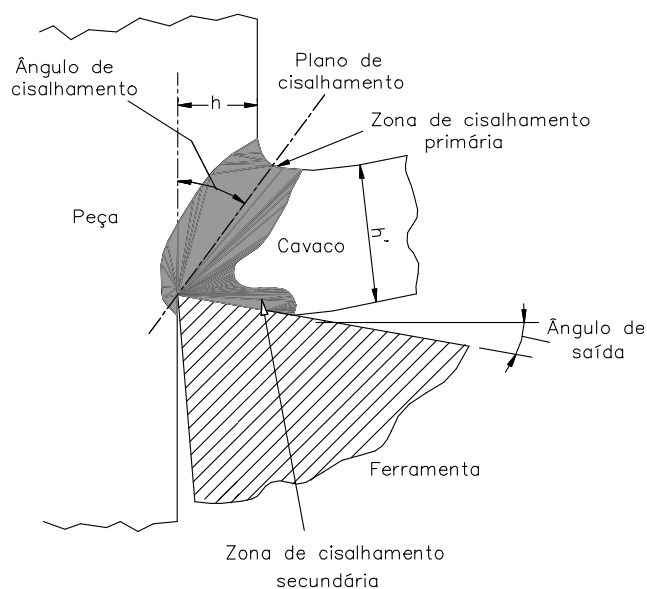


Figura 2.26 - Esquema mostrando a localização do ângulo de cisalhamento (MACHADO et al., 2009).

Segundo Trent e Wright (2000), o fluido de corte não tem acesso na região de aderência. O fluido de corte também reduz o atrito na zona de cisalhamento primário, provocando, dessa forma, o aumento do ângulo de cisalhamento e redução do grau de deformação, tendo, como consequência, a diminuição da energia de deformação por cisalhamento (DINIZ et al., 2006; DROZDA e WICK, 1983; FERRARESI, 1977). Outro fator importante, decorrente do aumento do ângulo de cisalhamento, é o aumento da velocidade de saída do cavaco. Isto significa que o cavaco se afasta mais rapidamente da superfície de saída da ferramenta, reduzindo, assim, o tempo de transmissão de calor para superfície de saída da ferramenta (SUAREZ, 2008).

2.6.1 – Funções dos Fluidos de Corte

Os fluidos de corte são empregados na indústria para melhorar o desempenho e a vida das ferramentas de corte, além de reduzir as forças de corte e melhorar o acabamento superficial das peças produzidas (SANTOS, 2002). Porém, Haan (1997) e König e Klocke (1997) afirmam que a principal função do fluido de corte é o controle da temperatura através da lubrificação e refrigeração das zonas de corte. Segundo Machado et al. (2009), o fluido de corte, quando injetado a alta pressão na superfície de saída da ferramenta contra a saída do cavaco, também pode auxiliar a quebra do cavaco. Ferraresi (1977) afirma que durante o processo de furação, o fluido de corte tem a função fundamental de transportar os cavacos para fora da região de corte. Essa condução dos cavacos para fora da zona de corte depende da vazão e pressão do fluido. A presença de cavacos na região de corte é indesejável, pois podem danificar a superfície do furo que está sendo gerada. Para atender todas as funções exigidas de um bom fluido de corte, o mesmo deve possuir algumas características específicas que são indicadas na Figura 2.27 (DINIZ et al., 2006; STEMMER, 2001).

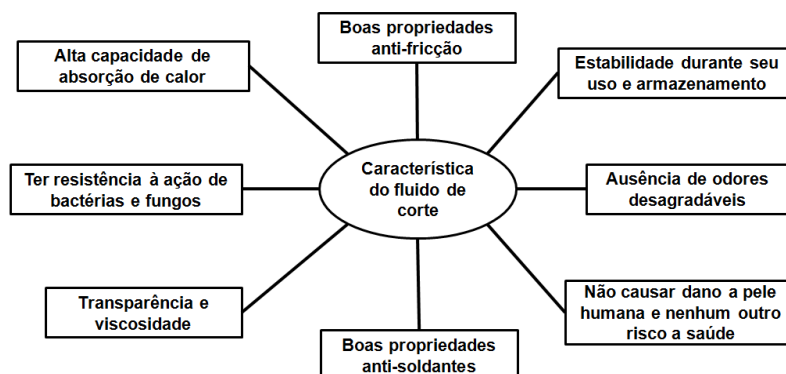


Figura 2.27 – Características do fluido de corte. Adaptado de (DINIZ et al., 2006).

Para conferir as características citadas acima, alguns produtos químicos chamados de aditivos são utilizados, onde os principais são (MACHADO et al., 2009):

Antiespumantes - Evitam a formação de espumas que podem impedir uma boa visão da região de corte, comprometer o efeito refrigerante do fluido e fazer com que o fluido transborde do tanque;

Anticorrosivos - Protegem peça, ferramenta e máquina-ferramenta da corrosão. São produtos a base de nitrito de sódio (suspeitos de serem cancerígenos);

Antioxidantes - Impedem que o óleo se deteriore quando em contato com o oxigênio do ar.

Detergentes - Reduzem a deposição de lodo, lamas e borras. São compostos organometálicos contendo magnésio, bário e cálcio entre outros;

Emulgadores - Responsáveis pela formação de emulsões. Os tipos principais são os sabões de ácidos graxos, as gorduras sulfatadas, sulfonatos de petróleo e emulgadores não-iônicos.

Biocidas - Substâncias ou misturas químicas que inibem o desenvolvimento de microrganismos;

Aditivos de Extrema Pressão (EP) - Em operações severas conferem aos fluidos uma lubricidade melhorada para suportarem as elevadas temperaturas e pressões de corte, reduzindo, dessa forma, o contato metal-metal. Os mais empregados são aditivos sulfurizados, sulfurados, fosforosos e substâncias cloradas.

A Figura 2.28 identifica a zona de aderência e escorregamento. As áreas BFCEB e CFKDHEC correspondem às zonas de aderência e de escorregamento, respectivamente.

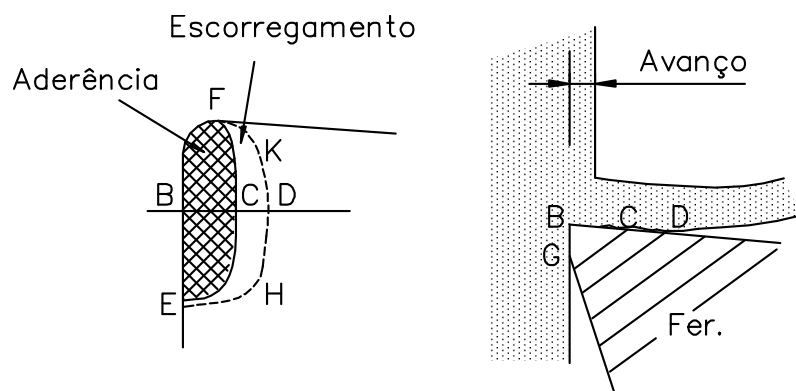


Figura 2.28 - Zonas de aderência e escorregamento na interface cavaco-ferramenta (TRENT, 1984).

Para baixas velocidades de corte, a refrigeração é relativamente sem importância, enquanto que a lubrificação é importante para reduzir o atrito e evitar o aparecimento da APC (aresta postiça de corte). Porém, para altas velocidades de corte, as condições não são favoráveis para a penetração do fluido de corte na interface cavaco/ferramenta, para que o mesmo exerça o papel lubrificante. Isto acontece pelas altas tensões que se apresentam na interface cavaco-ferramenta e o fluxo de cavaco maior, contra a direção do fluido, impedindo a penetração do mesmo (MACHADO et al., 2009).

Durante sua atuação como lubrificante, o fluido de corte tende a formar um filme (película) entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, reduzindo, assim, o contato direto entre os mesmos. A baixa tensão de compressão atuando na zona de aderência facilita a lubrificação desta região, fato que não ocorre na zona de aderência (HORNE et al., 1979). Segundo Trent e Wright (2000), o lubrificante não tem acesso na zona de escorregamento devido ao íntimo contato do cavaco/ferramenta nessa região.

2.6.2 – Classificação dos Fluidos de Corte

Embora comumente designados como “fluidos” de corte, os materiais que cumprem as funções citadas anteriormente (lubrificação, refrigeração, etc.) podem ser na verdade sólidos, líquidos e gasosos (COSTA, 2004).

Os sólidos são utilizados apenas para a lubrificação no processo de usinagem. O bissulfeto de molibdênio (MoS_2) é usado como meio lubri-refrigerante pelas suas características de lubrificante em condições de extrema pressão, tal qual o grafite. Estes lubrificantes sólidos são aplicados na superfície de saída da ferramenta antes de iniciar o processo de corte, o que reduz o coeficiente de atrito entre as partes, facilitando o corte (STEMMER, 2001). Aditivos aplicados na fabricação de aços de baixo carbono, como chumbo ou enxofre, desempenham um papel notável de lubrificante interno, reduzindo, as forças de usinagem (CASTILLO, 2005).

A utilização de gases como fluido de corte é bastante empregado em consultórios odontológicos. No caso da usinagem convencional, por exemplo, é empregado o argônio, hélio, nitrogênio e dióxido de carbono sob a forma de névoas de óleo com ar comprimido. O objetivo deste tipo de fluido de corte é prevenir a oxidação da peça e do cavaco, porém, o custo destes gases é muito elevado, sendo aplicados apenas em casos especiais (CASTRO, 2001; FERRARESI, 1977).

2.6.3 – Direções e Métodos de Aplicação

2.6.3.1 – Direções de Aplicação dos Fluidos de Corte

Durante os processos de usinagem, o fluido pode ser aplicado sobre a peça em três direções diferentes: aplicação sobre-cabeça, aplicação entre a superfície de saída e o cavaco e aplicação do fluido de corte entre a superfície de folga e a peça (MACHADO et al., 2009). A Figura 2.29 mostra as três direções comuns de aplicação externa dos fluidos de corte.

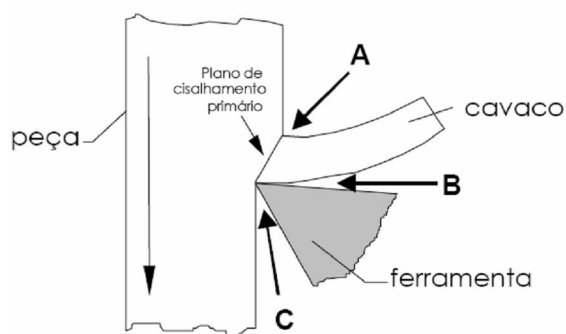


Figura 2.29 – Direções de aplicação externa de fluidos de corte. A - aplicação sobre-cabeça, B - aplicação entre a superfície de saída e o cavaco e C - aplicação do fluido entre a superfície de folga e a peça (COSTA, 2004).

A aplicação do fluido de corte também pode ser feita pelo interior da ferramenta. No processo de furação, por exemplo, o fluido pode ser guiado pelo interior da broca até a zona de corte (Figura 2.30).

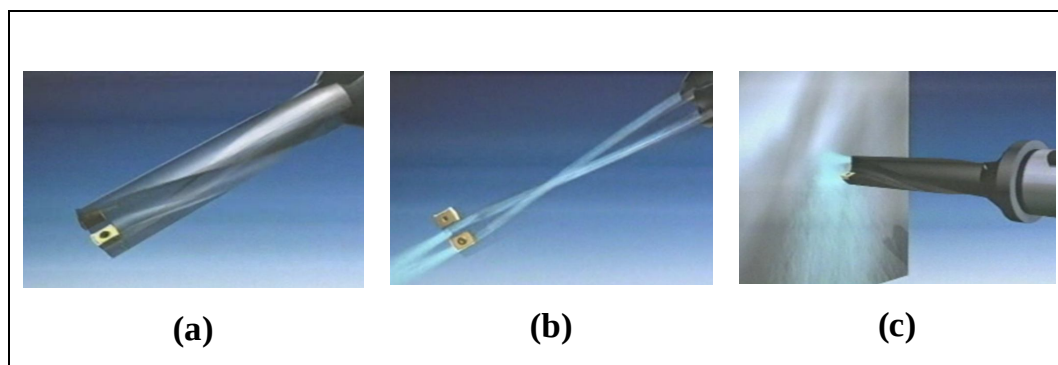


Figura 2.30 - Exemplo de aplicação interna de fluidos de corte na furação (SANDVIK, 2003).

Neste caso o fluido é aplicado na direção C da figura 2.29. O emprego desta técnica exige condições e características apropriadas no conjunto máquina-ferramenta, mandris e ferramentas de corte, de modo a permitir a circulação dos fluidos até a zona de corte (TEIXEIRA, 2001).

2.6.3.2 – Métodos de Aplicação dos Fluidos de Corte

Os fluidos de corte podem ser aplicados na forma de jorro, sob alta pressão ou na forma de spray, ou MQF – Mínima Quantidade de Fluido. A forma de jorro é o sistema mais utilizado devido a sua simplicidade. Consiste na atuação do fluido a baixa pressão (ou por gravidade). Geralmente o fluido é jorrado sobre cabeça contra a superfície do cavaco, ou ainda na superfície de saída da ferramenta. Para o caso de altas velocidades, este método torna-se pouco eficiente devido à dificuldade de acesso do fluido (COSTA, 2004; SANTOS, 2002). A Figura 2.31 mostra a aplicação do fluido de corte por meio de jorro durante o processo de furação.

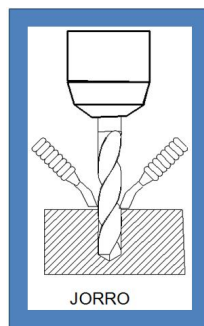


Figura 2.31 – Aplicação do fluido de corte por meio de jorro. Adaptado de (SANTOS, 2002).

Os sistemas sob alta pressão e MQF vem ganhando espaço na usinagem, onde diferentes resultados são encontrados, dependendo do processo de corte, do material da peça e da ferramenta, entre outros fatores (MACHADO, 1990; COSTA, 2004).

2.7 – Reafiação de Ferramentas de Corte

Com o desenvolvimento de ferramentas cada vez mais sofisticadas tecnologicamente, o monitoramento da evolução do desgaste tornou-se essencial para o maior controle da qualidade das peças produzidas (SANDVIK, 2003).

O gerenciamento dos processos de produção se tornou o foco principal dessa evolução, por isso, manter o ritmo de produção das máquinas, além de garantir a qualidade dos recursos internos, foi se tornando cada vez mais viáveis durante a fabricação de produtos cada vez mais sofisticados. Por conta disso, a maioria das fábricas que utilizam ferramentas em máquinas de usinagem prefere confiar o processo de reafiação de ferramentas a empresas especializadas nesse tipo de serviço (OSTRONOFF, 2007).

Na usinagem, após algum tempo de uso, as ferramentas de corte geralmente se desgastam, apresentando trincas e deformações plásticas na sua estrutura. Quando este limite de desgaste é atingindo as ferramentas apresentam um baixo rendimento, gerando, assim, problemas como: aquecimento excessivo, aumento do esforço de corte, acabamento ruim da superfície usinada e aumento do tempo de produção. Por esses motivos, as ferramentas precisam ser reafiadas ou substituídas, pois o custo com a reciclagem acaba se tornando inviável economicamente (HUANG et al., 2009).

O objetivo da reafiação é retornar a ferramenta de corte para o seu nível original de atuação, possibilitando, assim, que o desempenho da ferramenta possa ser trazido a condição inicial (OSG, 2008). Segundo Ostronoff (2007), reafiar significa renovar o fio de corte, a geometria e o revestimento original das ferramentas, desenvolvendo, assim, as mesmas características de quando novas. A quantidade de furos, vibração, elevação da força de corte, rugosidade superficial e desgastes nas brocas são alguns parâmetros que podem definir o melhor momento de reafiar a ferramenta.

O processo de reafiação pode garantir o mesmo rendimento das ferramentas como se fossem novas. Uma broca helicoidal, por exemplo, tem condições de readquirir até 90 % de sua capacidade depois de reafiada a um custo que pode ser de até 10 % aquele de uma nova (OSTRONOFF, 2007). Entretanto, a reafiação de brocas severamente danificadas pode ser economicamente inviável de serem realizadas. Por isso é importante saber definir limites de furos (ou qualidade) antes da ponta da broca atingir elevados valores de desgaste. Em geral, as grandes indústrias têm um setor de afiação de ferramentas para restaurar o contorno e o perfil de corte das ferramentas desgastadas.

À medida que a geometria das ferramentas evolui, de modo a oferecer o melhor desempenho, mais é preciso controlar para que essa geometria seja 'reconstituída' depois da ferramenta atingir o desgaste máximo pré-determinado. Qualquer ferramenta rotativa (brocas, machos, fresas, por exemplo) pode ser submetida ao processo de reafiação. As ferramentas reafiadas podem ser submetidas aos mesmos parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço, profundidade, etc.) de uma ferramenta nova (OSTRONOFF, 2007).

2.7.1 – Técnicas de Reafiação

Para que o cavaco removido durante o corte pela broca helicoidal não seja esmagado pela superfície principal de folga e o corte possa ocorrer, é necessário que haja afiação da ponta da broca, de forma que a geometria adequada para o corte seja garantida. O tipo de reafiação de broca mais difundido é a reafiação em cone de revolução ou simplesmente reafiação cônica, que apresenta como vantagem a facilidade de execução e o seu bom comportamento na furação da maioria dos materiais usinados. Porém, este tipo de afiação proporciona valores negativos para o ângulo de saída, principalmente nas regiões mais próximas do eixo central da broca (COSTA, 2004). A Figura 2.32 apresenta a variação do ângulo de saída ao longo da aresta de corte.

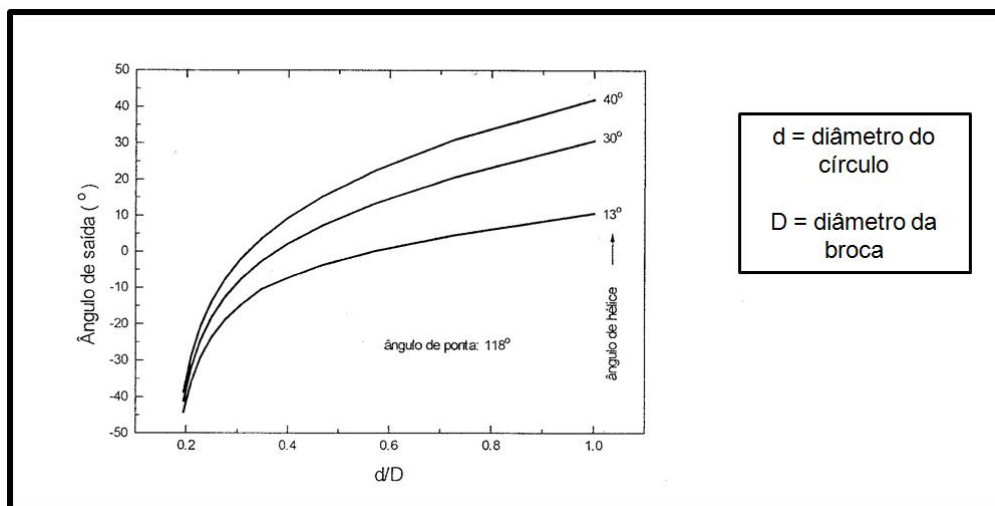


Figura 2.32 - Variação do ângulo de saída ao longo da aresta de corte (FERRARESI, 1977).

Note, observando a Figura 2.32, que nas proximidades do centro da broca têm-se os menores valores para o ângulo de saída associada a velocidades de corte relativamente baixas. Segundo Costa (2004), estes dois fatores tornam o corte extremamente difícil na região central da broca. Além disso, a aresta transversal cria uma tendência de deslocamento da ponta da broca sobre a superfície da peça no início do furo, o que dificulta o seu correto posicionamento e pode levar à necessidade de se trabalhar com pré-furos. Este fato é agravado quando da furação de superfícies inclinadas em relação ao eixo da broca.

Quando a ponta da broca entra em contato com o fundo do furo, o material é deformado e deslocado na direção radial da broca, o que caracteriza um processo mais próximo da extrusão do que do corte. Esta ação da aresta transversal de deslocar o material na direção

radial do furo é responsável por cerca de 50 a 75 % da força de avanço (SILVA, 2010). Segundo Santos (2002), a reafiação da aresta transversal em forma de “s” (a mais comum dentre as brocas helicoidais), trouxe vários benefícios para o processo de furação, dos quais podem ser citados:

- Redução na força de avanço de 30 %;
- Menores desvios de circularidade e cilindridade dos furos produzidos;
- Melhor centragem da broca, principalmente no início dos furos;
- Melhor qualidade na furação de chapas finas (circularidade e ausência de rebarbas);
- Como existe menor geração de calor com esta afiação, ela proporciona uma maior vida para a broca.

O surgimento de novas reafiações possibilitou um grande impulso com o desenvolvimento das máquinas de comando numérico, uma vez que estas afiações exigem geometrias complexas com estreita tolerância geométrica e dimensional. Abaixo são citados outros tipos de reafiação empregados nas brocas helicoidais (COSTA, 2004; FERRARESI, 1977; SANTOS, 2002).

Chanframento da aresta transversal - tem o objetivo de reduzir a força de avanço, através da redução do tamanho da aresta transversal de corte. Este chanframento pode ser combinado com o aumento do ângulo de saída na região da aresta transversal;

Afiação com quatro superfícies de folga - esta afiação substitui a superfície cônica de cada superfície de folga por dois planos. Obtém-se maior produção e, em alguns casos, aumento da vida da broca;

Afiação com ângulo de ponta duplo - tem como objetivo aumentar o comprimento da aresta principal de corte na periferia da broca, região onde as velocidades de corte são maiores. Este tipo de afiação possibilita o aumento da vida da ferramenta, principalmente na usinagem do ferro fundido;

Afiação com ponta de centragem - utilizada na furação de chapas finas, este tipo de afiação possibilita comprimentos de entrada e de saída menores, com pouca ou nenhuma rebarba, maior precisão na localização do centro do furo, melhor acabamento e permite a furação com brocas de até 70 mm de diâmetro. Este tipo de afiação não é adequado para furação de grandes espessuras;

Afiação Oliver - permite redução na força de avanço e no momento torçor;

Afiação cruzada - apresenta vantagens na execução de furos profundos e na furação de materiais duros. A força de avanço é significativamente reduzida;

Atualmente novas geometrias estão sendo desenvolvidas, incorporando um maior ângulo de hélice (ou de saída) da broca e uma nova geometria dos canais da broca com o objetivo de facilitar a remoção de um maior volume de cavacos. Além disto, estas brocas com novas geometrias possuem aresta principal de corte convexa, ângulo de ponta de 130° (ao invés dos 118° da geometria convencional) e aresta transversal de corte afinada pela afiação em forma de cruz. Este tipo de broca resulta em menores esforços de corte e maior vida da ferramenta (DINIZ et al., 2006).

2.7.2 – Reafiação de Brocas sem Revestimento

As brocas de aço rápido continuam sendo empregadas nas linhas de produção das grandes indústrias. Sua excelente tenacidade é a principal característica dessas ferramentas. Geralmente, para uma mesma condição de corte, a vida das ferramentas sem revestimento é consideravelmente menor que as ferramentas revestidas. Poucas empresas investem na reafiação deste tipo de ferramenta, devido às dúvidas de desempenho de brocas reafiadas.

A reafiação de brocas de aço rápido já vem sendo aplicado industrialmente de modo a reduzir os custos os custos com a compra de uma ferramenta nova. O processo de reafiação, para esses tipos de brocas, são bem mais rápido e econômico, se comparadas com as brocas revestidas, já que elimina a preocupação da inserção do revestimento.

2.7.3 – Reafiação de Brocas Revestidas

Nos últimos anos, a maioria das empresas se redeu a esse novo estilo de ferramentas. Grande parte das ferramentas empregadas nas indústrias possui revestimento que, na maioria das vezes, atuam de forma a reduzir a área de contato cavaco-ferramenta (MACHADO et al., 2009; STEMMER, 2001). Durante a furação, o revestimento da superfície de folga é o que mais se desgasta, permanecendo todo o revestimento restante com poucos sinais de desgaste (OSTRONOFF, 2007).

A reafiação utilizada neste tipo de ferramenta necessita de um tempo mais prolongado. Algumas brocas, antes de serem reafiadas, passam pelo processo de retirada do revestimento (geralmente pelo processo de jateamento). Depois de reafiadas, essas mesmas ferramentas são submetidas a uma nova camada de revestimento. Esse processo de reafiação requer maior tempo de operação, pois a maioria das empresas acaba terceirizando o processo de revestimento (McCANN, 2010).

2.7.4 – Número de Reafiações

As ferramentas não podem ser reafiadas constantemente, pois têm um comprimento útil e algumas limitações em relação à própria geometria que impedem de se ultrapassar um número certo de reafiações. Até mesmo o número de sucessivos revestimentos têm limite para ser aplicado em uma ferramenta. A quantidade de vezes que poderá ser revestidas vai depender de onde e como é utilizada. Se, por exemplo, é aplicada em um determinado material cujo desgaste provocado na aresta de corte é relativamente elevado, e se é preciso remover da ferramenta grande volume de material quando na reafiação para depois ser recoberto, a vida útil da ferramenta é menor.

Geralmente as ferramentas passam de 3 ou 15 vezes pelo processo de reafiação e revestimento. Segundo Ostronoff (2007), quando a reafiação uma única vez da ferramenta de corte já garante o custo-benefício podendo depois ser descartada. Entretanto, têm-se um grande número de variáveis (processo de usinagem, configuração da ferramenta, tolerância da peça, por exemplo) que interferem na decisão. Comumente a reafiação é feita através da remoção de 0,5 a 2 mm da região desgastada, porém estes valores podem ser modificados de acordo com o nível de desgaste da ferramenta.

2.8 – Teoria Estatística

Neste item serão abordados as ferramentas estatísticas que serão utilizadas neste trabalho: o teste de hipóteses e a comparação de dois tratamentos.

2.8.1 – Teste de Hipóteses

Segundo Button (2010), uma hipótese científica é qualquer afirmação que possa ser refutada. Dessa forma, a hipótese: "Os motores da marca 'A' são mais econômicos que os da marca 'B'" é uma hipótese científica, pois qualquer pessoa que duvide, ou queira comprová-la, pode montar um experimento e averiguar sua veracidade. Uma determinada hipótese é tida como verdadeira, se, em sua avaliação, não forem encontrados indícios que a desaprovem, permanecendo assim até que se prove o contrário. Para que uma hipótese científica seja testada, ela deve ser convertida em uma hipótese estatística, que é uma afirmação sobre um parâmetro populacional (MONTGOMERY e RUNGER, 2003). Um teste de hipótese fundamenta-se em um conjunto de regras que permite, a partir dos resultados experimentais (amostrais), rejeitar ou não tal hipótese, associando a esta decisão uma determinada confiança (NETO et al., 1995).

Ao testar hipóteses, iniciamos por criar uma hipótese experimental a respeito de um parâmetro da população. Essa hipótese experimental, a respeito de um parâmetro, é chamada de hipótese nula, onde a mesma é denotada de H_0 . Defini-se, então, outra hipótese, denominada de hipótese alternativa, a qual é o oposto daquilo que é formulado na hipótese nula. A hipótese alternativa é definida por H_1 . O procedimento de teste de hipóteses usa dados de uma amostra para testar as duas afirmações antagônicas, indicadas por H_0 e H_1 (BARROZO, 2007).

Anderson et al. (2008) utilizaram as definições de testes de hipóteses para um exemplo comum utilizados nas indústrias automobilísticas. Ele considerou um modelo de automóvel que atinge atualmente a eficiência média de 10,21 km/l. Uma equipe de pesquisa, da mesma indústria, desenvolveu um novo sistema de injeção de combustível projetado especificamente para aumentar a taxa de quilômetros por litro. Para avaliar o novo sistema, diversas unidades serão produzidas, instaladas em automóveis e submetidas a teste de direção controlada com o objetivo de comprovar que o novo sistema aumenta a taxa média de quilômetros por litro. Nesse caso, a hipótese de pesquisa é que o novo sistema de injeção de combustível produzirá uma taxa média de quilômetros por litro superior a 10,21, ou seja, $\mu > 10,21$. Como diretriz geral, uma hipótese de pesquisa deve ser formulada como a hipótese alternativa. Portanto, as hipóteses nula e alternativa ao estudo são:

$$H_0: \mu \leq 10,21$$

$$H_1: \mu > 10,21$$

Se os resultados da amostra indicassem que H_0 não pode ser rejeitada, os pesquisadores não poderão concluir que o novo sistema de injeção de combustível é melhor. Entretanto, se os resultados da amostras indicarem que H_0 pode ser rejeitada, os pesquisadores poderão inferir que $H_1: \mu > 10,21$ é verdadeira. Com essa conclusão, os pesquisadores obtêm a base estatística necessária para afirmar que o novo sistema aumenta o número médio de quilômetros por litro.

2.8.2 – Comparação de 2 Tratamentos

Na comparação de dois tratamentos com amostra grandes, deve-se ter as seguintes suposições (BARROZO, 2007):

- i) Seja $x_1, x_2, \dots, x_{n_1}$ uma amostra aleatória de tamanho n_1 da população 1 com média populacional μ_1 e desvio-padrão populacional σ_1 ;

- ii) Seja $y_1, y_2, \dots, y_{n_2}$ uma amostra aleatória de tamanho n_2 da população 2 com média populacional μ_2 e desvio-padrão populacional σ_2 ;
- iii) As amostras são independentes. Em outras palavras, as medidas dos dois tratamentos, não são relacionados entre si.

Na comparação de dois tratamentos utiliza-se o teste de hipótese explicado anteriormente, que é seguindo as seguintes observações (BARROZO, 2007):

- i) Identificar a hipótese de nulidade (H_0) e a hipótese alternativa (H_1) em termos de parâmetros populacionais;
- ii) Escolher o teste estatístico;
- iii) Estabelecendo um nível de significância ' α ', determinar a região de rejeição;
- iv) Calcular o valor observado do teste estatístico a partir dos dados da amostra.

O teste estatístico utilizado para determinar a diferença entre dois tratamentos, deve seguir uma distribuição aproximadamente normal z, para amostras grandes. Para a comparação de dois tratamentos com amostras pequenas n_1 e n_2 , além de considerar as suposições anteriores, devem-se também supor as seguintes suposições adicionais:

- i) Ambas populações são normais;
- ii) Os desvios padrões das populações 1 e 2 são iguais, isto é, $\sigma_1 = \sigma_2$;
- iii) $x_1, x_2, \dots, x_{n_1}$ é uma amostra aleatória de distribuição $N(\mu_1, \sigma^2)$;
- iv) $y_1, y_2, \dots, y_{n_2}$ é uma amostra aleatória de distribuição $N(\mu_2, \sigma^2)$;
- v) $x_1, x_2, \dots, x_{n_1}$ e $y_1, y_2, \dots, y_{n_2}$ são duas amostras independentes.

Depois de confirmadas as suposições mencionadas anteriormente, utiliza-se o teste estatístico 't' de *Student* para amostras pequenas " $n_1 + n_2 - 2$ " graus de liberdade definido abaixo:

$$t = \frac{(\bar{x} - \bar{y}) - (\mu_1 - \mu_2)}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}, \text{ onde } s_p = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

Depois de calcular o valor de 't', estipula-se um nível ' α ' de significância para verificar se rejeita ou não a hipótese nula, através de teste bilateral ou unilaterais apresentados a seguir (BARROZO, 2007).

Teste Bilateral - apresenta duas regiões de rejeição da hipótese nula H_0 , situadas nos extremos da distribuição amostral, é utilizado para testar hipótese do tipo:

$$H_0 : \mu_A - \mu_B = 0$$

$$H_1 : \mu_A - \mu_B \neq 0$$

A Figura 2.33 mostra as regiões de aceitação e rejeição de H_0 a um nível de significância ' α ' em um teste bilateral.

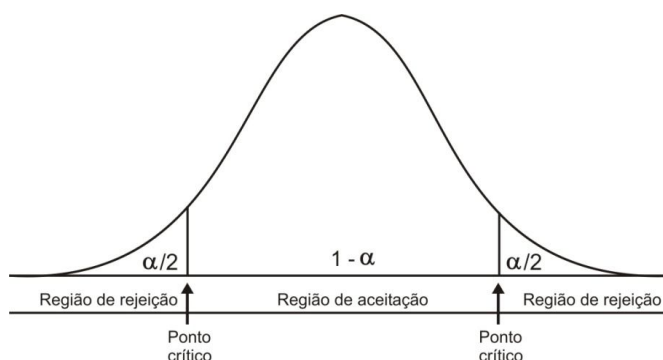


Figura 2.33 - Regiões de aceitação e rejeição de H_0 em um teste bilateral (BARROZO, 2007).

Teste Unilateral a Direita - apresenta uma única região de rejeição da hipótese nula H_0 , sendo utilizado para testar as hipóteses do tipo:

$$H_0 : \mu_A - \mu_B = 0$$

$$H_1 : \mu_A - \mu_B > 0$$

A Figura 2.34 mostra as regiões de aceitação e rejeição de H_0 a um nível de significância α em um teste unilateral a direita.

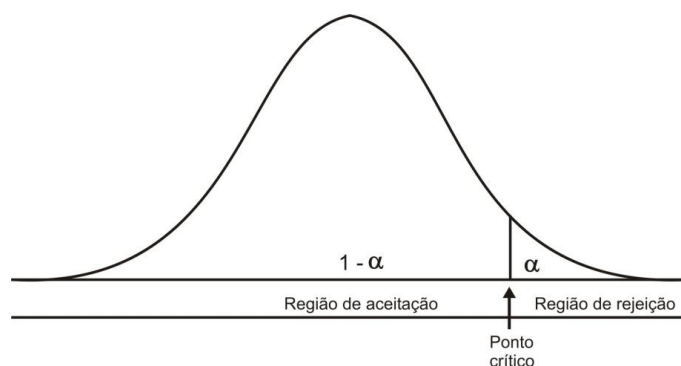


Figura 2.34 - Regiões de aceitação e rejeição de H_0 um teste unilateral à direita (BARROZO, 2007).

Teste Unilateral a Esquerda - Apresenta uma região de rejeição da hipótese nula H_0 , situada no extremo inferior da distribuição amostral, é utilizado para testar as hipóteses do tipo:

$$H_0 : \mu_A - \mu_B = 0$$

$$H_1 : \mu_A - \mu_B < 0$$

A Figura 2.35 mostra as regiões de aceitação e rejeição de H_0 a um nível de significância ' α ' em um teste unilateral a esquerda.

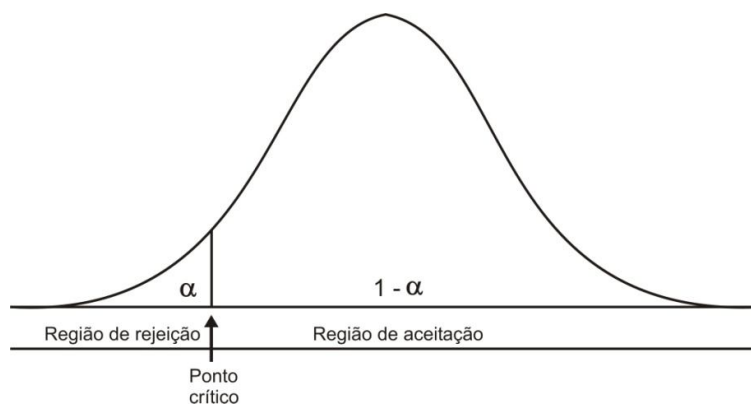


Figura 2.35 - Regiões de aceitação e rejeição de H_0 em um teste unilateral à esquerda (BARROZO, 2007).

Nesta pesquisa trabalhou-se com amostras pequenas então será utilizado o teste t de *Student* bilateral como mostrado na Figura 2.40.

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nesta seção do trabalho serão apresentados e descritos as ferramentas, materiais, equipamentos e métodos dos experimentos de usinagem em que esta pesquisa foi desenvolvida. Os testes experimentais foram divididos em duas etapas, a saber: i- testes de vida das ferramentas, desenvolvidos no chão de fábrica da Fiat Powertrain Technologies – FPT, em Betim - MG e ii- testes de força de avanço, torque e desvios geométricos dos furos, desenvolvidos no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem – LEPU. Esta segunda etapa foi realizada com ferramentas em vários estágios de desgaste (ao longo da vida). A Figura 3.1 apresenta um fluxograma da metodologia do trabalho.

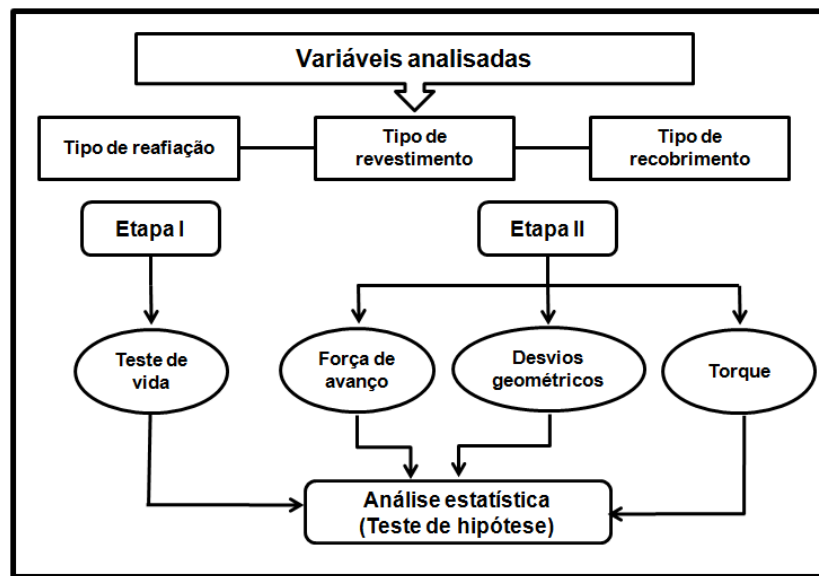


Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia do trabalho.

Como citado anteriormente, este trabalho tem o objetivo de comparar o desempenho de brocas helicoidais escalonadas antes e após a operação de reafiação, além de verificar a melhor forma de reafiação que poderá ser empregada a uma broca após esta atingir o limite de desgaste não mais aceitável. As variáveis a serem consideradas são: tipo do revestimento (TiAlN, AlCrN e sem revestimento) e a metodologia de recobrimento (sem recobrir novamente, recobrindo sobre aquele já existente e recobrindo após remoção do recobrimento anterior). Os parâmetros avaliadores do desempenho foram: taxa de desgaste, vida da ferramenta, força e

torque, além de desvios geométricos (cilindricidade, circularidade e rugosidade superficial). Todos os resultados foram comparados com o desempenho de uma broca nova.

Salvo algumas publicações em revistas técnicas, não existe muita literatura sobre este tipo de procedimento, por se tratar de uma técnica ainda pouco investigada. Dessa forma, torna-se de grande importância o desenvolvimento de pesquisas para melhor investigar o comportamento das ferramentas reafiadas, e, assim, obter maiores informações para fins de compará-los com o desempenho de ferramentas novas.

3.1 – Materiais Usinados, Ferramentas de Corte e Máquina-Ferramenta

3.1.1 – Materiais Usinados

Os materiais dos corpos de provas para os testes de vida das brocas foi o aço DIN 19MnCr5G. Este material é empregado na fabricação de coroas cilíndricas proveniente da caixa de câmbio produzidos pela FPT e utilizados em alguns automóveis da FIAT. A Figura 3.2 mostra um modelo de coroa cilíndrica utilizada nos experimentos.

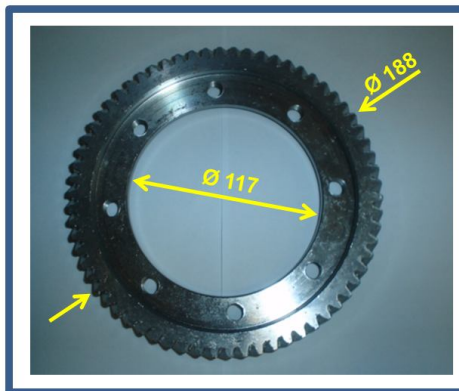


Figura 3.2 – Coroa cilíndrica utilizada nos experimentos.

A composição química deste material é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Composição Química do Aço 19MnCr5G (AISI 5115) (NORMA INTERNA – FIAT AUTO).

Material	% C	% Mn	% Cr	% Si	% Cu	% S	% P max.	% Al (total)
19MnCr5G	0,15	1,00	0,80	0,15		0,02		0,02
	a	a	a	a	≤ 0,30	a	0,035	a
	0,21	1,30	1,10	0,35		0,04		0,05

Antes de iniciar os testes de furação, foram separadas, aleatoriamente, três coroas cilíndricas. Para cada coroa, foi retirada uma amostra. Em cada amostra foram realizados ensaios de dureza Vicker's. A Figura 3.3 mostra a região de onde foi retirada a amostra de cada coroa.

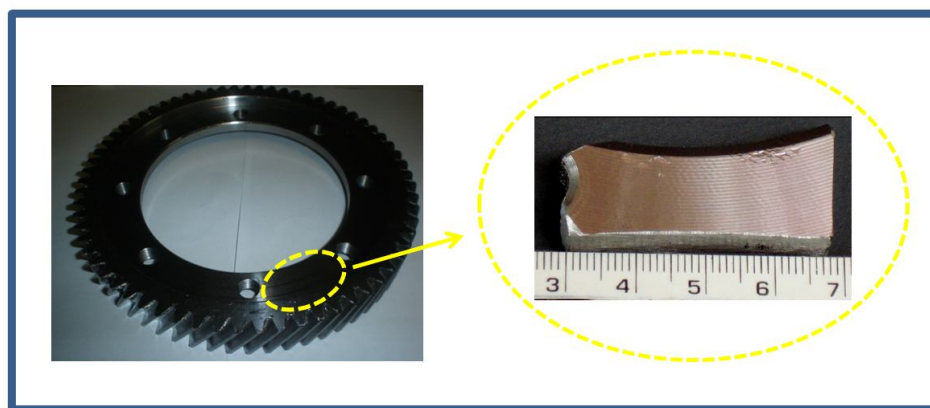


Figura 3.3 – Amostra da região analisada.

A medição da dureza foi realizada em duas seções distintas de cada amostra (Figura 3.4). Depois de seccionadas, as amostras foram embutidas separadamente para ensaios de dureza Vicker's. Os ensaios de dureza Vicker's, foram efetuados em Durômetro Universal da marca Wolpert, utilizando-se carga de 40 kg/s. Para análise da microestrutura, as amostras foram seccionadas em aparelho discotom da *struers*, com disco abrasivo 04TRE *struers*, lixadas com lixas d'água nas granulometrias #320, #400, #600 e #1200 *mesh*, polidas com pastas adiamantadas de 3 μm e atacadas com o reativo de nital á 2% por 5 segundos. As fotografias foram adquiridas com uma câmara *cyber-shot* da SONY e as fotomicrografias feitas em Microdurômetro Shimatsu acoplado a um computador.

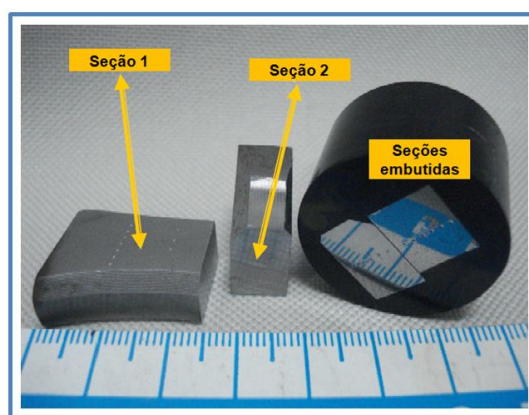


Figura 3.4 – Localização das seções na amostra.

Para o monitoramento da variação da dureza ao longo das seções 1 e 2, tomou-se o ponto mais próximo à periferia como ponto 1. Foram feitas 5 medições de dureza ao longo da amostra, com cada ponto espaçado de 1,5 mm. A Figura 3.5 ilustra as regiões do corpo de prova de onde foi retirada a amostra e os seus respectivos pontos para avaliação da dureza.

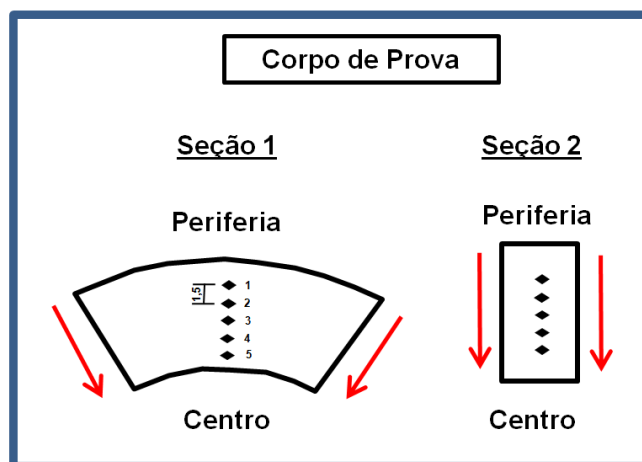


Figura 3.5 – Direção da sequência dos pontos de medição da dureza.

A Tabela 3.2 mostra os resultados dos ensaios de dureza. Note que o material da coroa cilíndrica apresenta boa homogeneidade ao longo das seções 1 e 2.

Tabela 3.2 – Resultado dos ensaios de dureza Vicker's, sentido periferia/centro.

Ensaio	Amostra A		Amostra B		Amostra C	
	Secção 1	Secção 2	Secção 1	Secção 2	Secção 1	Secção 2
1	151,4	151,4	151,4	151,4	151,4	151,4
2	151,4	151,4	151,4	151,8	151,4	151,4
3	151,4	151,4	151,6	151,4	151,4	151,4
4	151,4	151,4	151,9	151,4	151,9	151,4
5	151,4	151,4	151,4	151,4	151,4	151,2
Média	151,4	151,4	151,4	151,4	151,4	151,4
Desvio Padrão	-	-	0,22	0,18	0,22	0,09

A Figura 3.6 mostra as microestruturas ferríticas/perlíticas observadas nas seções 1 e 2 em uma das amostras.

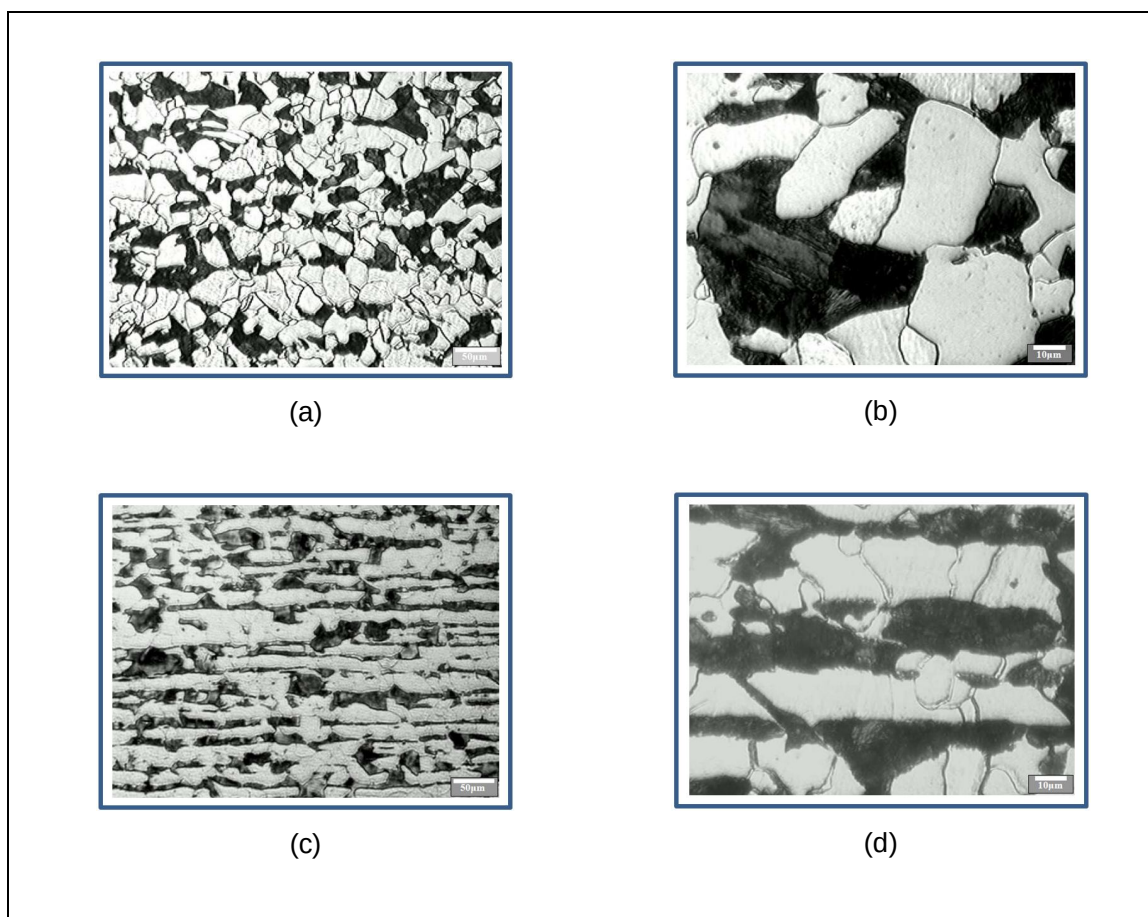


Figura 3.6 – Microestruturas atacada com nital a 2% - a) Seção 1; 100x; b) a) Seção 1; 500x; c) Seção 2; 100x; d) Seção 2; 500x;

3.1.2 – Ferramentas de Corte

As ferramentas de corte usadas nos ensaios experimentais foram brocas helicoidais escalonadas maciças de corte a direita e com duas arestas cortantes com designação 2D9,8/14xL10,5/45. O material das brocas era composto de metal duro classe P e se diferenciavam na natureza da camada de cobertura (Sem Revestimento, TiAlN e AlCrN). Estas ferramentas foram gentilmente fornecidas pela OSG Sulamericana de Ferramentas Ltda. A Figura 3.7 mostra os diferentes revestimentos utilizados nas brocas ao longo do trabalho. Observa-se que os revestimentos possuem cores bem parecidas.



Figura 3.7 – Revestimentos utilizados nas brocas escalonadas helicoidais.

A Figura 3.8 mostra uma vista geral da ponta das brocas helicoidais escalonadas detalhando a superfície principal de folga, ponta de corte, arestas principal e transversal de corte das brocas utilizadas no trabalho.

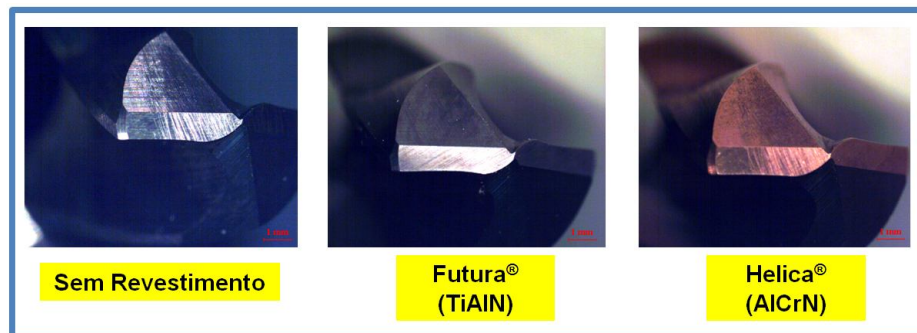


Figura 3.8 – Ampliação da ponta das brocas – Reafiação OSG.

3.1.3 – Máquina-Ferramenta

A máquina-ferramenta usada durante o acompanhamento dos ensaios de vida realizados na FPT foi um Torno Famar Tandem 260 (Figura 3.9). Esta máquina trabalha sobre a tensão de 440 V e com uma potência de 75 kW no motor principal.



Figura 3.9 – Torno Famar Tandem 260.

Esta máquina realiza 4 furos de uma só vez em cada operação, de forma que cada broca realiza dois furos em cada peça (coroa cilíndrica). A operação é realizada na direção vertical com movimento descendente da peça. A Figura 3.10 mostra a montagem das brocas no interior da máquina.

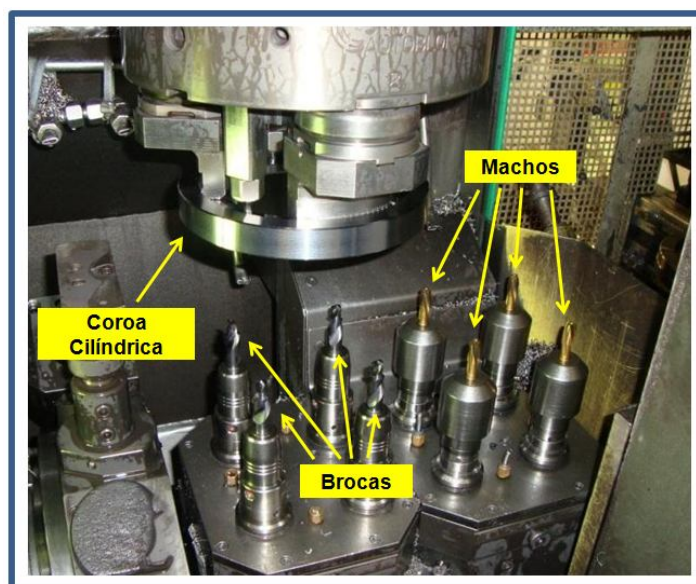


Figura 3.10 – Montagem interna do conjunto de brocas no interior do torno Famar Tandem 260.

A Figura 3.11 mostra as dimensões do furo. Conforme pode ser observado nesta figura, o diâmetro maior da broca ($\phi = 14$ mm) é utilizado apenas para escariar o furo e, assim, facilitar a entrada do macho que vai produzir a rosca na coroa cilíndrica.

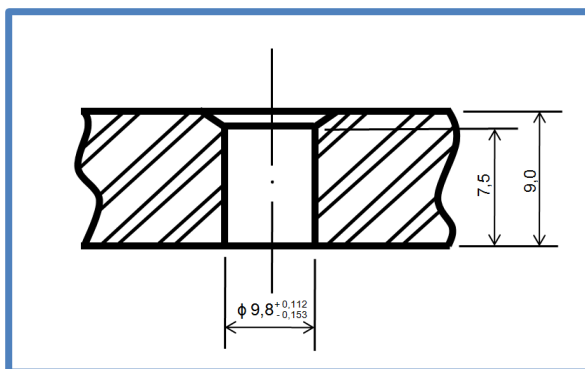


Figura 3.11 – Dimensões do furo.

Os ensaios de força e torque foram realizados no Centro de Usinagem Vertical CNC da linha Discovery modelo 760 com comando numérico *Siemens 810* no Laboratório de Ensaio e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia. A potência do motor principal e a potência total instalada são de 9 kW e 15 kVA, respectivamente. Esta máquina, fabricada pela Indústria Romi S. A, possui rotação máxima no eixo-árvore de 10.000 rpm. A Figura 3.12 mostra uma vista parcial do centro de usinagem.



Figura 3.12 – Centro de usinagem vertical CNC utilizado nos testes de furação.

Para garantir uma melhor fixação da coroa cilíndrica durante os ensaios de força e torque foram utilizados três fixadores padrões igualmente espaçados. Este tipo de fixação possibilitou a redução de vibração durante a aquisição de dados. A Figura 3.13 mostra a fixação da coroa cilíndrica nos ensaios realizados no Laboratório de Ensaio e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia.

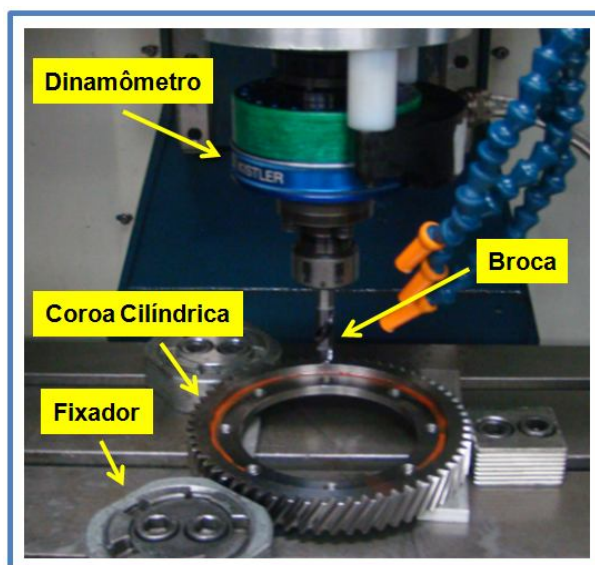


Figura 3.13 – Fixação da coroa cilíndrica.

3.2 – Ensaios Experimentais

3.2.1 - Brocas com Revestimento TiAlN

3.2.1.1 – Influência da Reafiação

Neste tipo de revestimento será avaliado a influencia da reafiação, onde as vidas serão monitoradas. Será investigado o desempenho das brocas com relação à força de avanço e torque da máquina-ferramenta, assim como a qualidade dos furos (rugosidade, cilindricidade e circularidade) quando novas (durante a realização dos primeiros furos e sem nenhuma reafiação) e após serem submetidas à reafiação. Durante os pré-testes, realizados na FPT (*Fiat Powertrain Technologies*), foi tomado como fator limite da vida da ferramenta (100% da vida) um desgaste de flanco máximo de 0,3 mm, o que possibilitou a usinagem de 1700 peças (3400 furos) para cada broca com este tipo de cobertura. Esse valor de desgaste máximo de flanco foi tomado com o objetivo de reduzir o tempo de reafiação e assegurar um maior comprimento da broca durante o processo de reafiação, além de possibilitar a realização de um maior número de reafiações.

As medições da força de avanço e torque nos testes de furação, além da qualidade dos furos usinados foram feitas quando as brocas atingiram 0, 35, 70 e 100 % da vida. Foram observadas, no LEPU / FEMEC / UFU, as imagens das ferramentas desgastadas para que, dessa forma, fosse possível um melhor entendimento dos mecanismos de desgaste existentes.

A Figura 3.14 mostra um fluxograma da logística de procedimentos para os testes de vida com brocas antes e após serem reafiadas.

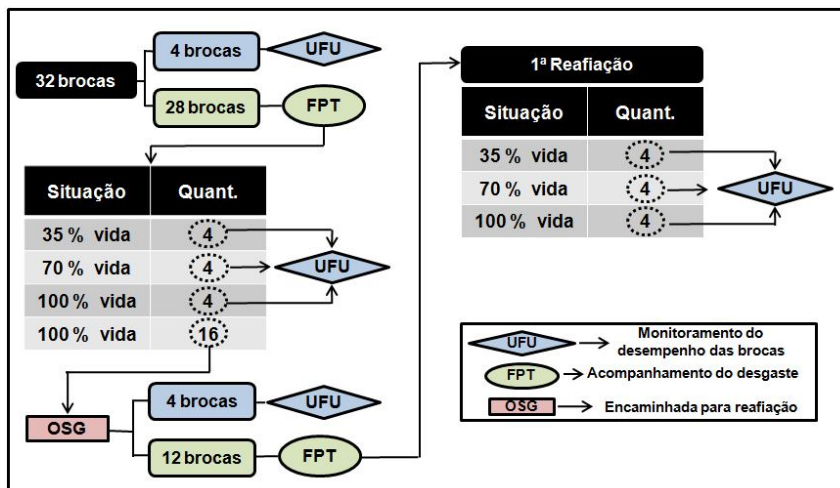


Figura 3.14 – Fluxograma para teste de vida com brocas com revestimento TiAlN – Decapagem + reafiação + recobertas (OSG).

As reafiações indicadas na Figura 3.14 foram realizadas na empresa OSG (empresa esta que doou as ferramentas). Note que foram utilizadas 32 brocas nesta análise. Através do fluxograma, nota-se que foram encaminhadas 4 brocas novas ao LEPU / FEMEC / UFU e o restante (28 brocas) à linha de produção da FPT para ensaio de vida. Vale informar que, para cada nível de porcentagem de vida, foram retiradas 4 brocas (esse número de brocas foi escolhido devido conjunto de ferramentas utilizados na máquina-ferramenta da FPT ser composto de 4 brocas, além de possibilitar uma maior confiabilidade estatística) para análise de força, torque e qualidade dos furos, que foram feitos no LEPU / FEMEC / UFU. A Figura 3.14 também mostra que foram encaminhadas 16 brocas para reafiação (nessa situação às reafiações serão feitas na OSG). Após reafiadas, 4 brocas foram enviadas ao LEPU / FEMEC / UFU e o restante (12 brocas, no caso) enviadas para a linha de produção da FPT. Seguindo a mesma linha de raciocínio, as brocas, submetidas à reafiação, quando atingiram a porcentagem de 35, 70 e 100 % de vida, foram encaminhadas ao LEPU / FEMEC / UFU para a análise de desempenho (entendem-se por força e torque da máquina-ferramenta, além da qualidade dos furos usinados). É necessário lembrar que as brocas utilizadas na linha de produção da FPT, após reafiadas, foram submetidas ao processo de decapagem (remoção do revestimento) antes de serem revestidas novamente.

3.2.1.2 – Influência da Metodologia de Recobrimento

Também será avaliado o desempenho das brocas quanto à metodologia de recobrimento. No item anterior foi visto que as brocas, após serem reafiadas, passaram pelo processo de decapagem e recobertas novamente. A título de comparação também foi realizado o estudo do desempenho das brocas quando somente reafiadas (sem decapagem e sem recobrir) e quando reafiada por cima do revestimento anterior (sem decapagem). A Figura 3.15 mostra o procedimento logístico de avaliação das brocas quando somente reafiadas (sem decapagem e sem recobrir).

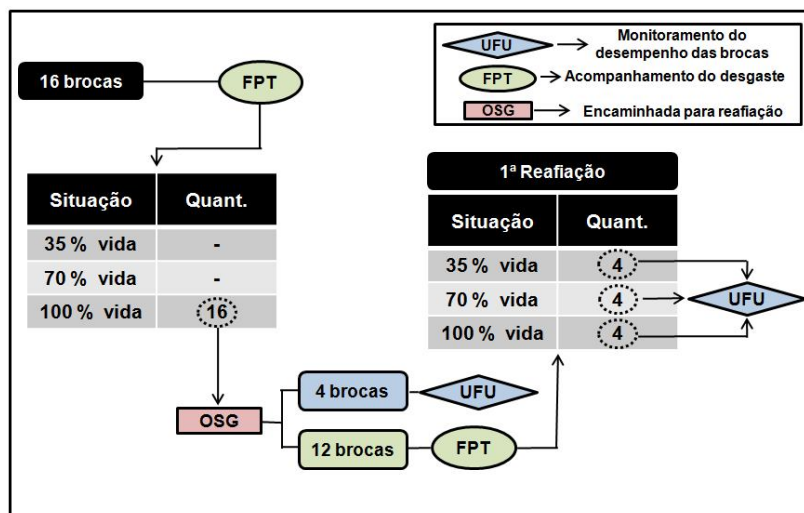


Figura 3.15 – Fluxograma de movimentação quando apenas reafiadas (sem recobri-la) – Brocas revestidas com TiAlN – Reafiada + recoberta por cima do revestimento anterior (OSG).

Note, da Figura 3.15, que foram necessárias 16 brocas nesta análise e que todas elas foram utilizadas para testes de fim de vida na linha de produção da FPT antes de serem reafiadas na OSG. O acompanhamento da força e do torque durante os ensaios, bem como a análise da qualidade dos furos foram efetuadas quando as brocas atingiram 0, 35, 70 e 100 % da vida (esse acompanhamento foi feito no LEPU / FEMEC / UFU). Note que, para cada nível de porcentagem de vida, foram retiradas 4 brocas para análise de desempenho (em termos de força e torque da máquina, além da qualidade dos furos usinados) que foram feitos no LEPU / FEMEC / UFU. Essa mesma metodologia foi empregada nos testes de usinagem para brocas com adição de um revestimento após a ferramenta ser reafiada (sem decapagem). A Figura 3.16 mostra o fluxograma de movimentação das brocas para esta situação (revestida por cima do revestimento anterior). Todas as reafiações realizadas para estes procedimentos foram feitas na OSG Sulamericana de Ferramentas Ltda.

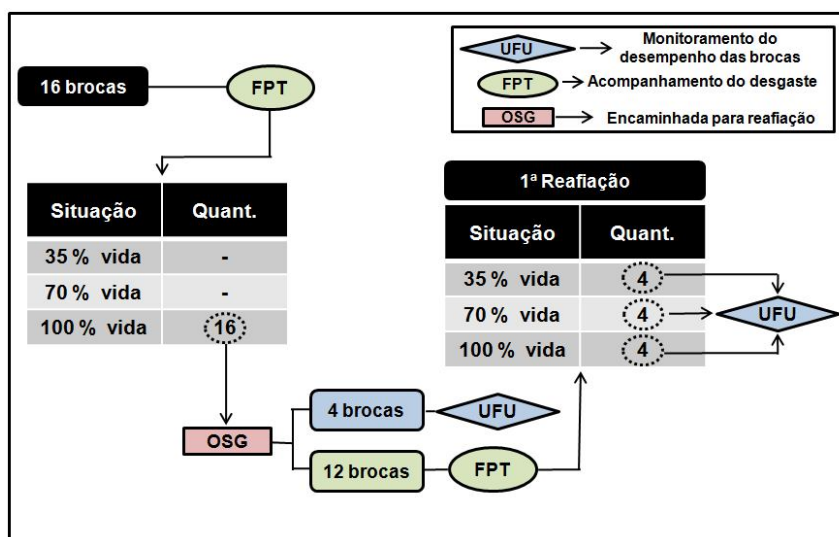


Figura 3.16 – Fluxograma de movimentação quando adicionado novo revestimento após serem reafiadas – Brocas com revestimento TiAlN – Apenas reafiada (OSG), sem novo revestimento.

3.2.1.3 – Influência entre reafiação OSG x FPT

Os testes para comparação entre as reafiações realizadas entre as empresas OSG e FPT foram realizados apenas nas brocas quando novas e quando submetidas à primeira reafiação, para a condição de recobrimento após a decapagem (situação empregada atualmente na linha de produção da FPT). A Figura 3.17 mostra as diferenças de geometria aplicados nas brocas reafiadas na OSG e na FPT.

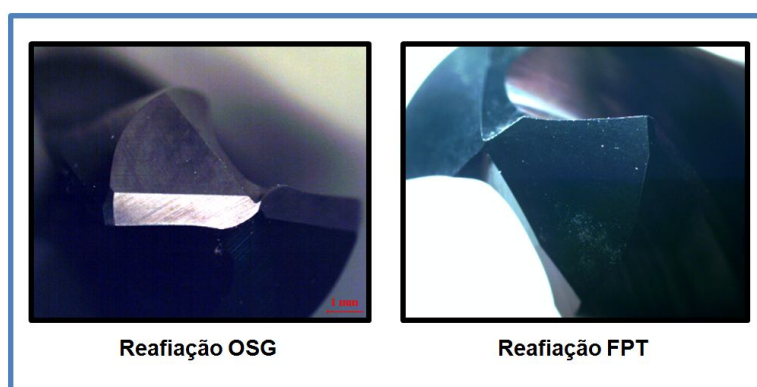


Figura 3.17 – Geometria de reafiação diferentes OSG x FPT.

Observe que os testes com reafiação OSG não precisaram ser realizados, pois os mesmos já foram feitos no item 3.2.1.1. Todas as reafiações foram feitas em máquina CNC 5

eixos. A Figura 3.18 mostra um fluxograma de procedimentos para os testes com as brocas antes e após serem reafiadas.

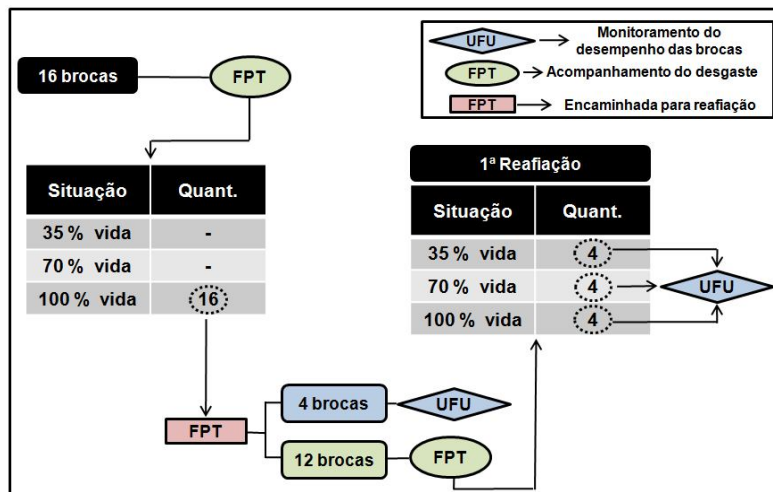


Figura 3.18 – Seqüência de testes com brocas reafiadas – Brocas com revestimento TiAlN – Sem decapagem - Reafiação FPT.

As reafiações indicadas na Figura 3.18 foram realizadas na FPT. Note que foram necessárias 16 brocas nesta análise. Todas as brocas foram utilizadas até atingirem o fim de vida, antes de serem encaminhadas para primeira operação de reafiação (nessa situação às reafiações foram feitas na FPT (*Fiat Powertrain Technologies*)). Após serem reafiadas, 4 brocas foram encaminhadas ao LEPU / FEMEC / UFU e o restante (12 brocas, no caso) foram reutilizadas na linha de produção da FPT. As brocas, submetidas à reafiação, quando atingirem a porcentagem de 35, 70 e 100 % de suas vidas, nos testes na FPT, foram encaminhada ao LEPU / FEMEC / UFU para acompanhamento do desempenho (força e torque da máquina-ferramenta, além da qualidade dos furos usinados). A Tabela 3.3 mostra o número de brocas necessárias para cada condição de recobrimento.

Tabela 3.3 – Quantidade de brocas com revestimento TiAlN necessárias para os testes realizados neste trabalho.

Item	Reafiação	Condição de reafiação	Quant.
3.2.1.1	OSG	Decapagem após reafiar + Recobrimento	32
3.2.1.2	OSG	Apenas reafiar (sem recobri-la)	16
3.2.1.2	OSG	Reafiação + Recobrimento	16
3.2.1.3	FPT	Decapagem após reafiar + Recobrimento	16
Total			80

3.2.2 - Brocas com revestimento AlCrN

Os pré-testes, realizados na FPT (*Fiat Powertrain Technologies*), possibilitaram a usinagem de 2000 peças (4000 furos) para cada broca com este tipo de cobertura. Assim como para as brocas revestidas por TiAlN, foi tomado como fator limite da vida da ferramenta (100% da vida) um desgaste de flanco máximo de 0,3 mm.

A medição da força e torque da máquina-ferramenta, além da avaliação da qualidade dos furos usinados, foram investigadas quando as brocas atingirem 0, 35, 70 e 100 % da vida. A Figura 3.19 mostra um fluxograma de movimentação das brocas antes e após a reafiação.

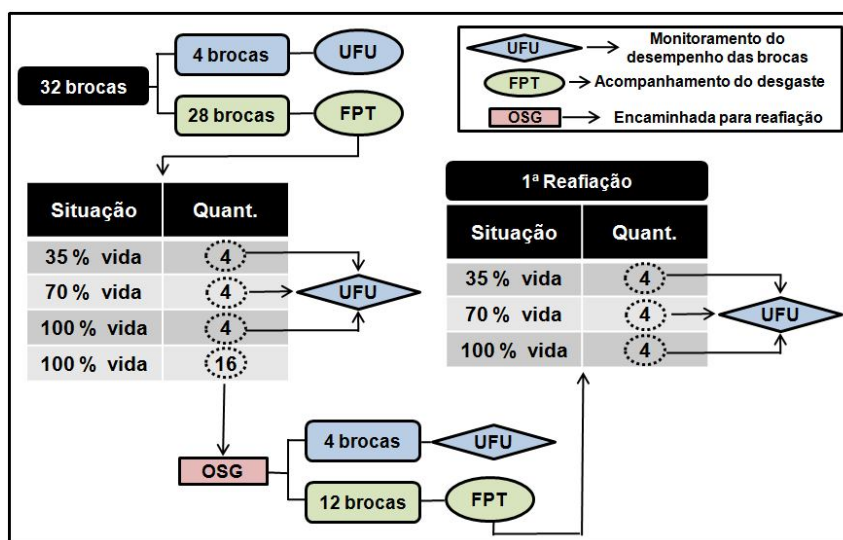


Figura 3.19 – Sequência de testes para as brocas revestida de AlCrN - Brocas reafiadas (OSG), sem novo revestimento.

As operações de reafiações indicadas nesta figura foram realizadas na OSG Sulamericana de Ferramentas Ltda. Note que foram necessárias 32 brocas nesta etapa, sendo que foram encaminhadas 4 brocas novas ao LEPU / FEMEC / UFU e o restante (28 brocas) à linha de produção da FPT para ensaios de vida. Note que, para cada nível de porcentagem de vida, foram retiradas 4 brocas para análise de desempenho (em termos de força e torque da máquina-ferramenta, além da avaliação da qualidade dos furos usinados) realizados no LEPU / FEMEC / UFU. A Figura 3.19 também mostra que foram encaminhadas 16 brocas para a operação de reafiação. Após serem reafiadas, 4 brocas foram enviadas ao LEPU / FEMEC / UFU e o restante (12 brocas) encaminhadas para a linha de produção da FPT. As brocas, submetidas à reafiação, quando atingirem a porcentagem de 35, 70 e 100 % de vida, foram encaminhadas ao LEPU / FEMEC / UFU. Foram analisadas 4 brocas para cada porcentagem de desgaste.

3.2.3 - Brocas sem Revestimento

Para os ensaios com brocas sem revestimentos, assim como as revestidas, tomou-se como um desgaste de flanco máximo de 0,3 mm como fator limite da vida da ferramenta (100% da vida), o que possibilitou a usinagem de 250 peças (500 furos) para cada broca. Esses valores foram obtidos através de pré-testes, realizados na FPT (*Fiat Powertrain Technologies*). As medições da força e torque da máquina-ferramenta, além da qualidade dos furos usinados foram realizadas quando as brocas atingiram 0, 35, 70 e 100 % da vida. A Figura 3.20 mostra um fluxograma da sequência de procedimentos para testes com brocas antes e após serem reafiadas.

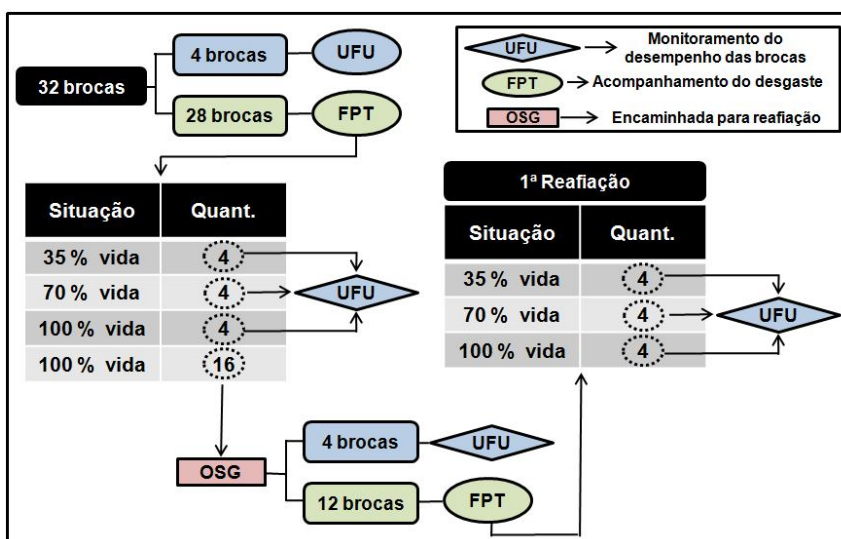


Figura 3.20 – Sequência de reafiação – Brocas sem revestimentos.

As reafiações indicadas nesta figura foram realizadas na OSG Sulamericana de Ferramentas Ltda. Note que foram necessárias 32 brocas nesta análise. Foram encaminhadas 4 brocas novas o LEPU / FEMEC / UFU e o restante (28 brocas) à linha de produção da FPT para ensaio de vida. Note que, para cada nível de porcentagem de vida, foram retiradas 4 brocas para análise de desempenho (força e torque da máquina-ferramenta, além da avaliação da qualidade do furo usinado) feitos no LEPU / FEMEC / UFU. A Figura 3.20 também mostra que foram encaminhadas 16 brocas para reafiação. Após serem reafiadas, 4 brocas foram enviadas ao LEPU / FEMEC / UFU e o restante (12 brocas) enviadas para a linha de produção da FPT. As brocas, submetidas à reafiação, quando atingiram a porcentagem de 0, 35, 70 e 100 % de vida foram encaminhadas ao LEPU / FEMEC / UFU. Foram analisadas 4 brocas para cada nível de porcentagem de vida.

A Tabela 3.4 mostra a quantidade total de brocas necessárias para a realização do trabalho (incluindo as brocas revestidas de TiAlN e AlCrN, além das brocas sem revestimento).

Tabela 3.4 – Quantidade total de brocas.

Tipo de Revestimento	Quant. Brocas
TiAlN	80
AlCrN	32
Sem Revestimento	32
Total	144

3.3 – Parâmetros de Corte e Meio Lubri-Refrigerante Utilizados

Os parâmetros de corte empregados no LEPU / FEMEC / UFU durante os experimentos foram os mesmos utilizados na empresa FPT (Tabela 3.5). Pode-se observar que quando o diâmetro maior entra em contato com a peça, os parâmetros de usinagem são alterados.

Tabela 3.5 – Parâmetros de usinagem empregados na FPT.

Parâmetro de usinagem	Valor
Rotação ($\varnothing = 9,8$ mm)	2600 rpm
Rotação ($\varnothing = 14$ mm)	1700 rpm
Velocidade de corte ($\varnothing = 9,8$ mm)	80 m/min
Velocidade de corte ($\varnothing = 14$ mm)	74,73 m/min
Avanço ($\varnothing = 9,8$ mm)	0,2 mm/volta
Avanço ($\varnothing = 14$ mm)	0,3 mm/volta

O fluido de corte utilizado nos ensaios no LEPU / FEMEC / UFU foi uma emulsão de óleo semi-sintético, numa concentração de 6% (um refratômetro 'Hand Refractometer Atago' foi utilizado para o controle da concentração), da marca *Ecocool RE 42 W*. Esse fluido de corte é o mesmo utilizado na empresa FPT durante a fabricação da coroa cilíndrica. Este fluido de corte foi gentilmente cedido pela Fuchs do Brasil S. A. na forma de dois galões de 5 l.

O sistema utilizado para aplicação do fluido foi o jorro proveniente do próprio sistema de bombeamento do Centro de Usinagem CNC, que proporcionou uma vazão de 730 l/h distribuída por três bicos. A Figura 3.21 mostra a ação do fluido de corte durante a furação da coroa cilíndrica.

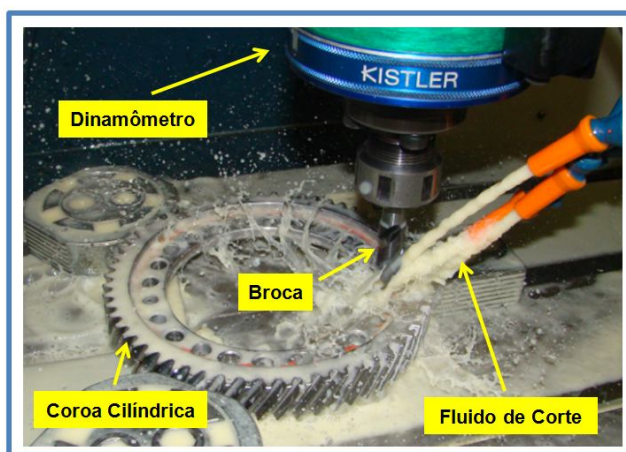


Figura 3.21 – Ação do fluido de corte durante a furação.

3.4 – Parâmetros Monitorados / Medidos nos Experimentos

Os parâmetros monitorados e/ou medidos durante os ensaios experimentais e que serviram de respostas para os confrontos foram:

- Vida e desgaste das brocas;
- Torque e força de avanço do sistema máquina-ferramenta-peça;
- Qualidades dos furos usinados: Rugosidades (R_a , R_z e R_t) e desvios geométricos (cilindricidade e circularidades ao longo dos furos).

3.4.1 – Vida e Desgaste das Ferramentas de Corte

A vida das brocas foi uma das respostas importantes para o confronto de desempenho entre as variáveis testadas. Durante os pré-testes, foi definido como critério de encerramento dos testes de usinagem um desgaste de flanco máximo de 0,3 mm, sendo que a vida da ferramenta foi quantificada com relação ao número de peças produzidas. Cada revestimento se comportou de maneira diferente, fazendo com que o limite de peças produzidas fossem diferentes para cada tipo de revestimento analisado. Dessa forma, foi adotada, para cada broca revestida com TiAlN, a vida de 100 % quando a broca atingisse 1700 peças (3400 furos) produzidas. Para cada broca revestida com AlCrN foi definido como limite de sua vida (100 % vida) a quantidade de 2000 peças (4000 furos) produzidas. No caso das brocas sem revestimentos, foi adotada a quantidade de 250 peças (500 furos) produzidas como 100 % de

vida. A Tabela 3.6 mostra a quantidade de peças e de furos que cada revestimento realizou durante o acompanhamento da vida das brocas realizada nos experimentos. Note que, como dito anteriormente, cada broca realiza dois furos em cada peça.

Tabela 3.6 – Quantidade de peças e de furos realizada nos experimentos.

Tipo de Revestimento	Porcentagem da Vida	Quant. de Peças	Quant. de Furos
TiAlN	35 %	595	1190
	70 %	1190	2380
	100 %	1700	3400
AlCrN	35 %	700	1400
	70 %	1400	2800
	100 %	2000	4000
Sem Revestimento	35 %	88	176
	70 %	175	350
	100 %	250	500

Para a análise do desgaste das ferramentas foi utilizada uma metodologia que consiste em realizar a medição dos desgastes no Laboratório de Ensaio e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) em intervalos de vida definidos previamente. A Figura 3.22 mostra o posicionamento da broca e do microscópio ferramenteiro durante o acompanhamento do desgaste.

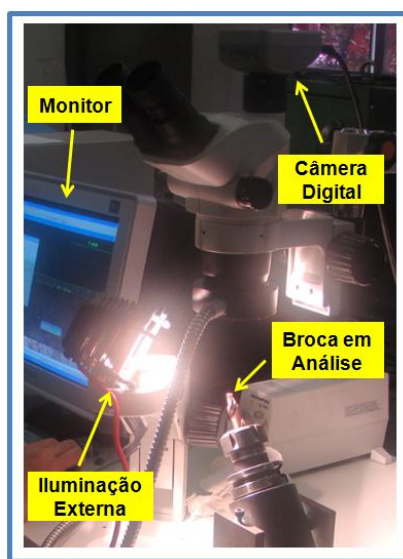


Figura 3.22 – Posicionamento da broca durante o acompanhamento do desgaste.

O monitoramento dos desgastes foi feito por meio de um microscópio ferramenteiro 'SZ6145TR – OLYMPUS' com auxílio do software de captura de imagens '*Image Pro-Express*'. Também foi utilizado um sistema de iluminação externa artificial de modo a garantir uma melhor visualização durante a aquisição das fotos. Como ponto de referência para a medição dos desgastes máximos de flanco (VB_{max}), foi utilizado a aresta principal da ferramenta, conforme indicado anteriormente na Figura 2.22.

Para o registro dos desgastes de flanco máximo (VB_{max}), foi realizada uma marcação em todas as brocas, a qual consiste da identificação das arestas, número da broca e o número de furos usinados. O desgaste foi medido nas arestas principais de corte com diâmetro de 9,8 mm, pois foi nesta região que as brocas apresentaram maiores perdas de material. Seguindo o procedimento, foi medido o VB_{max} em ambas as arestas de cada ferramenta e foi tomado o maior desgaste entre as duas medições como representativo para os resultados. Tal procedimento foi adotado devido à diferença pouco significativa entre estas duas medições.

3.4.2 – Torque e Força de Avanço

Paralelamente ao monitoramento do desgaste das brocas foram acompanhados os valores do torque e de força de avanço, durante a vida das ferramentas. Esses ensaios têm como objetivo levantar parâmetros relacionados aos esforços gerados pelo processo durante o acompanhamento da vida das ferramentas.

Os resultados obtidos permitiram o estabelecimento de relações entre os parâmetros dos ensaios com os esforços gerados, com os resultados do processo de furação, principalmente com a qualidade dos furos e com os mecanismos de falha da ferramenta.

Em função do equipamento necessário para a implementação destes tipos de ensaios e aos problemas decorrentes da necessidade de se adaptar alguns deles numa linha de produção, como por exemplo, o dinamômetro rotativo, os ensaios de força foram desenvolvidos no Laboratório de Ensaio e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Para a realização dos ensaios um dinamômetro rotativo '*Kistler instrument AG*' modelo 9123 foi fixado no eixo árvore da máquina-ferramenta.

Também foi inserido, junto ao dinamômetro, uma caixa de distribuição responsável por separar os sinais de torque e forças de usinagem. Após a decomposição, os sinais foram amplificados e condicionados por um amplificador de carga, e, então, puderam ser inseridos num bloco conector BNC - 2110. O sistema foi calibrado antes dos ensaios de aquisição serem iniciados. O sistema foi calibrado para medir forças de avanço entre 0 e 2000 N e momentos torçores entre 0 e 1000 N.m, com desvios menores do que 1 % na faixa de medição utilizada.

Foi definida uma frequência de aquisição de 0,5 kHz e um tempo de aquisição de 15 segundos.

De maneira geral, foram realizados três furos para cada broca e a aquisição ocorreu durante todo o processo de usinagem, ou seja, desde o início da furação até a saída da broca da coroa cilíndrica. Primeiramente, foram medidas a força de avanço e o torque com as brocas novas, logo após foram realizados os experimentos com as brocas com 35, 70 e 100 % da vida, respectivamente. Essas condições foram realizadas para os três revestimentos (TiAlN, AlCrN e sem revestimento). A sistemática empregada na realização dos ensaios de aquisição de torque e força foi sempre a mesma ao longo do trabalho.

Para a avaliação dos resultados da aquisição dos esforços de usinagem, adotou-se a média dos valores da força de avanço e torque dentro do intervalo de medição estabilizado, como mostra a Figura 3.23. Nesse intervalo, foram tomados 2.000 pontos e foi calculada a média. Do experimento e das duas repetições (réplica e tréplica, respectivamente) do ensaio, foi calculada a média e a dispersão, para garantir a confiabilidade da medição.

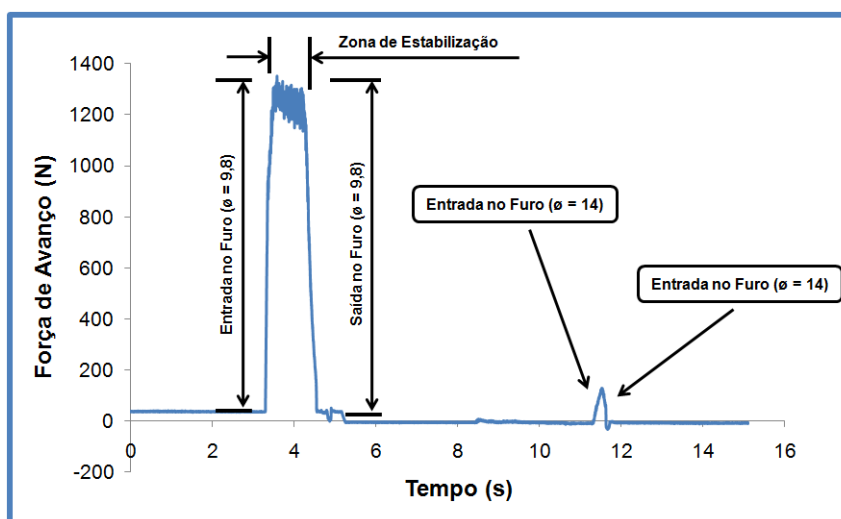


Figura 3.23 – Gráfico de medição da força de avanço.

3.4.3 – Qualidade dos Furos Usinados

Durante os ensaios de vida, foram coletadas peças para análise da qualidade dos furos em intervalos pré-definidos (0, 35, 70 e 100 % da vida), iguais ao intervalo de medição dos desgastes de flanco.

Os desvios de circularidade e de cilíndricidade foram medidos utilizando uma máquina de medição por coordenadas MM3C do tipo ponte móvel, marca MITUTOYO, modelo BR-M443, com resolução de 1 μm (Figura 3.24).

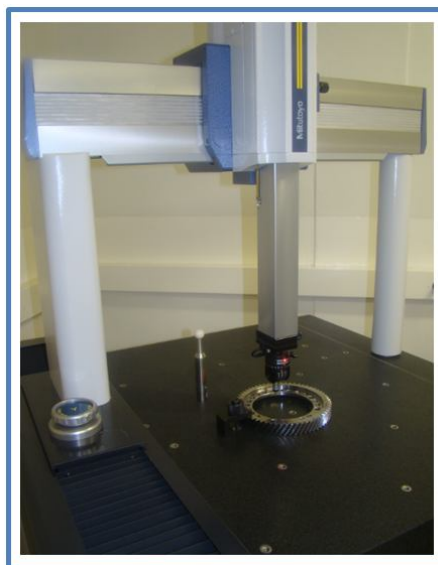


Figura 3.24 – Máquina de medição por coordenadas MM3C.

A qualidade dos furos foi avaliada através da análise de diferentes parâmetros, como o desvio de circularidade, o desvio de cilindridade e a rugosidade da parede do furo. Tal avaliação visa registrar a influência que a deterioração da ferramenta exerce sobre a qualidade dos furos. A medição dessas grandezas foi realizada ao longo do furo com diâmetro de 9,8 mm.

A metodologia utilizada na avaliação da qualidade dos furos foi baseada na coleta de corpos de prova em intervalos iguais aos definidos para a medição dos desgastes de flanco máximo (VB_{max}). Os corpos de prova selecionados foram devidamente limpos e codificados, com o objetivo de identificar a sequência correta de desgaste da ferramenta.

Como parâmetros de avaliações nas medições de rugosidade, foram escolhidos os parâmetros R_a , R_z e R_t , pois estes parâmetros são comumente utilizados no controle da qualidade de superfícies usinadas destinadas à indústria automotiva. Para garantir uma medição correta da rugosidade, foram feitas três leituras em três locais diferentes da parede dos furos e foram calculadas a média das nove leituras e a dispersão.

Para a medição do desvio de circularidade foram utilizados 9 pontos em uma seção do furo, enquanto que para a medição do desvio de cilindridade foram apalpados 15 pontos ao longo do furo. Todos os pontos foram obtidos aleatoriamente. A coroa cilíndrica foi fixada sobre a mesa através de um fixador para evitar qualquer movimentação da mesma durante a aquisição de dados (Figura 3.25). Os valores de desvio de circularidade e de cilindridade foram medidos três em cada furo.

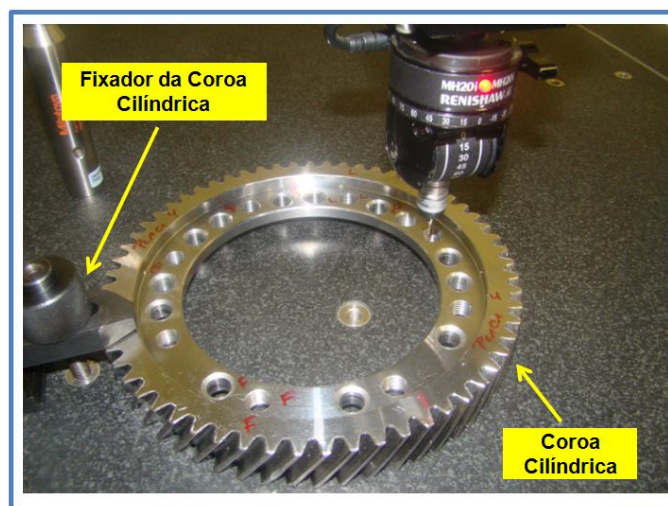


Figura 3.25 – Fixação da coroa cilíndrica sobre a mesa de medição.

A ponta de medição utilizada foi uma ponta de rubi com diâmetro de 2 mm. A Figura 3.26 mostra, em detalhes, a ponta de medição no interior do furo momentos antes de iniciar as medições. A rugosidade da parede dos furos foi medida utilizando-se um rugosímetro portátil Surtronic 3+, modelo 112/1590 fabricado pela Taylor Hobson. Este instrumento possui agulha do apalpador de diamante com raio de ponta de 5 μm , resolução de 0,01 μm e trabalha com carga de 150 a 300 mg. Foram medidos os parâmetros R_a , R_z e R_t , utilizando um *cut-off* de 0,8 mm (ISO 4288, 2008). Cada grandeza foi medida em três posições ao longo do furo e o valor considerado para a análise foi a média desses valores. Para garantir uma medição correta da rugosidade, foram feitas três leituras em três locais diferentes ao longo da parede do furo. Com o objetivo de evitar desvios nas avaliações, todas as medições foram realizadas a uma distância aproximada de 3 mm da borda do furo.

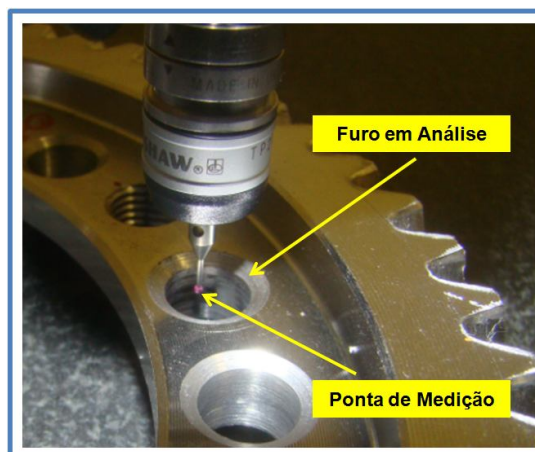


Figura 3.26 – Ponta de medição em detalhes.

Para evitar prováveis dilatações nas amostras, a temperatura de medição foi monitorada através de um termômetro digital portátil HT-260 com resolução de 0,1 °C. As medições foram feitas na temperatura de 20 ± 1 °C. A Figura 3.27 mostra o rugosímetro momentos antes de iniciar uma medição.

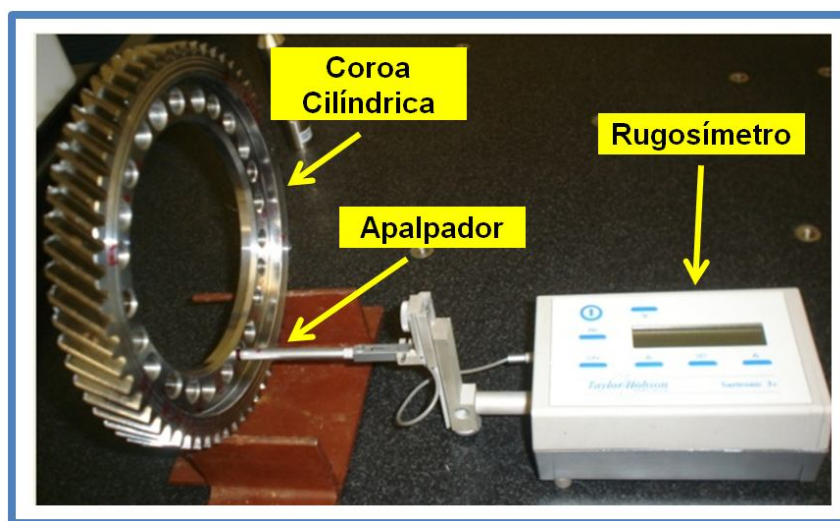


Figura 3.27 - Rugosímetro portátil Surtronic 3+ em posição de medição.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos experimentos, na forma de gráficos e tabelas, para posteriormente serem analisados. Inicialmente será mostrada a evolução do desgaste ao longo da vida da ferramenta para cada tipo de revestimento, comparando, assim, as brocas novas com as reafiadas.

Na sequência, são mostrados os resultados experimentais de força de avanço e torque ao longo da vida da ferramenta. E, finalmente, serão abordados os resultados dos ensaios no que diz respeito a qualidade dos furos: desvios geométricos (desvio de cilindricidade e desvio de circularidades ao longo da parede do furo de diâmetro 9,8 mm) e rugosidades (R_a , R_z e R_t). Vale ressaltar que todos os furos realizados ao longo da vida das brocas apresentaram diâmetros dentro das tolerâncias exigidas em projeto (ver Figura 3.11).

4.1 – Análise do Desgaste

4.1.1 – Ferramentas com Revestimento TiAlN

Ao ser analisado o comportamento evolutivo do desgaste das ferramentas revestidas com TiAlN novas, ou seja, que não passaram pelo processo de reafiação (Figura 4.1), pode-se notar a boa repetibilidade dos resultados de desgaste ao longo da vida das quatro brocas em análise. Cada ponto representa o valor do maior desgaste em uma das arestas da broca.

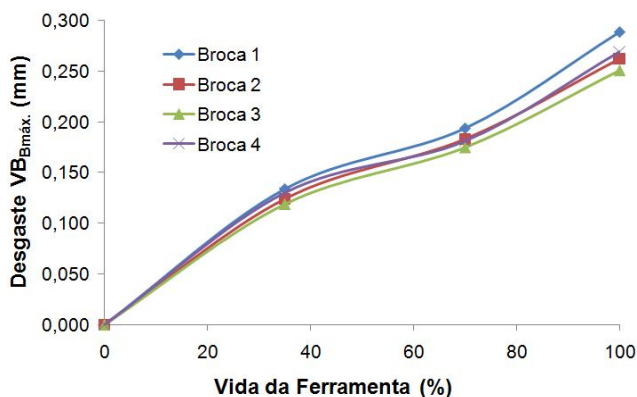


Figura 4.1 – Repetibilidade dos resultados do desgaste ao longo da vida das brocas – Brocas novas com revestimento TiAlN.

A Figura 4.2 mostra o comportamento do desgaste para as brocas novas e reafiadas.

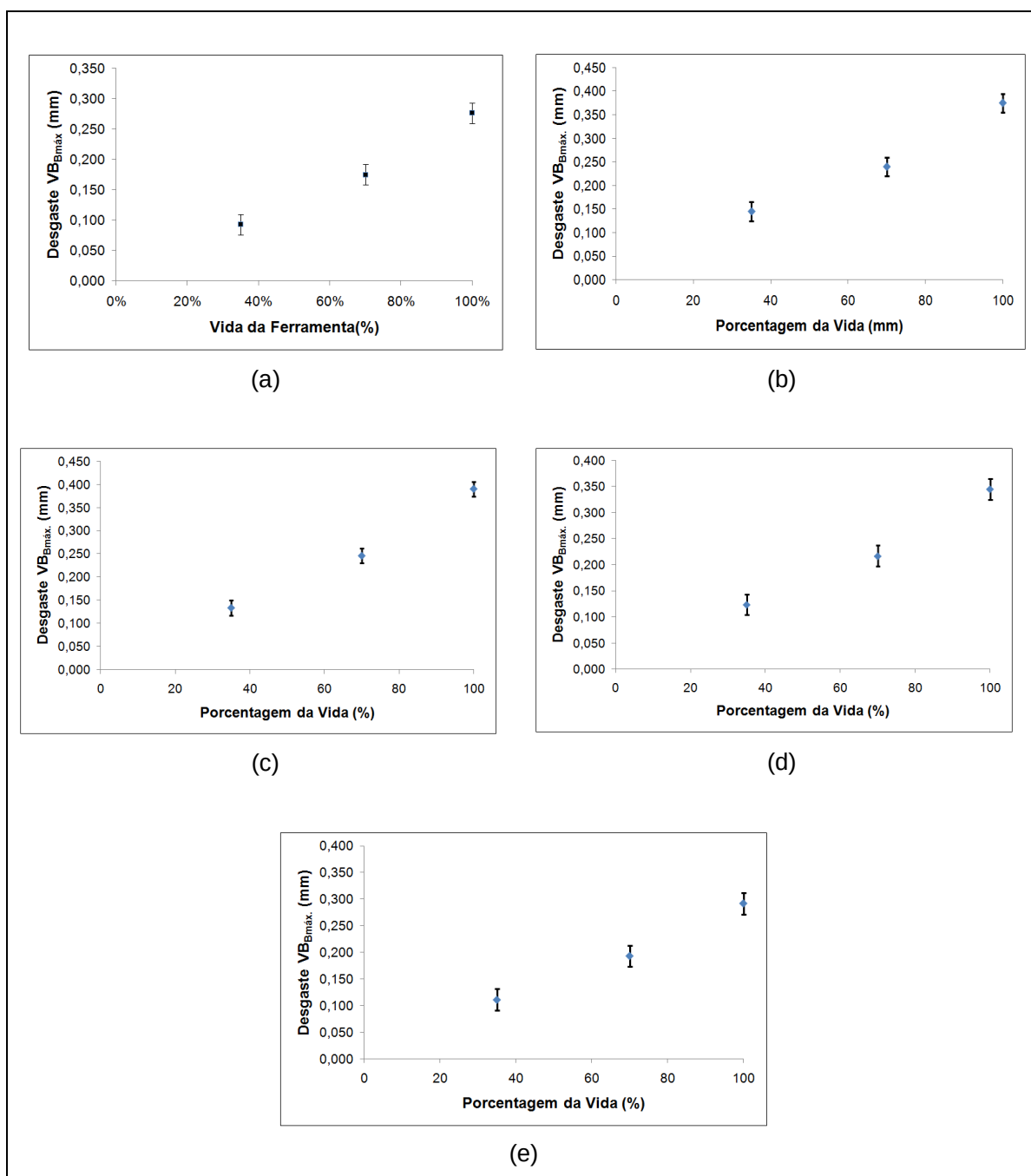


Figura 4.2 – Evolução do desgaste ao longo da vida da ferramenta para as brocas com revestimento TiAlN – a) Sem reafiação (brocas novas); b) Reafiação FPT, sem novo revestimento; c) Apenas reafiada (OSG), sem novo revestimento; d) Reafiada + recoberta por cima do primeiro revestimento (OSG); e) Decapagem + reafiação + recobertas (OSG).

Note que, observando a Figura 4.2, os gráficos mostram um comportamento semelhante ao da Figura 2.23, no qual a ferramenta sofre um desgaste acelerado no início do corte (estágio I), passando para um comportamento com taxa de desgaste constante (estágio II). O estágio III, onde há um acentuado aumento na taxa de desgaste proveniente das elevadas temperaturas e tensões promovidas pela deterioração da aresta de corte (MACHADO et al., 2009; TRENT e WRIGHT, 2000), parece ainda não ter sido atingido.

A Figura 4.3 mostra a comparação do desgaste ao longo da vida da ferramenta para as ferramentas antes e após serem reafiadas para os gráficos apresentados na Figura 4.2. Note que as ferramentas novas apresentaram melhores desempenhos em relação ao desgaste.

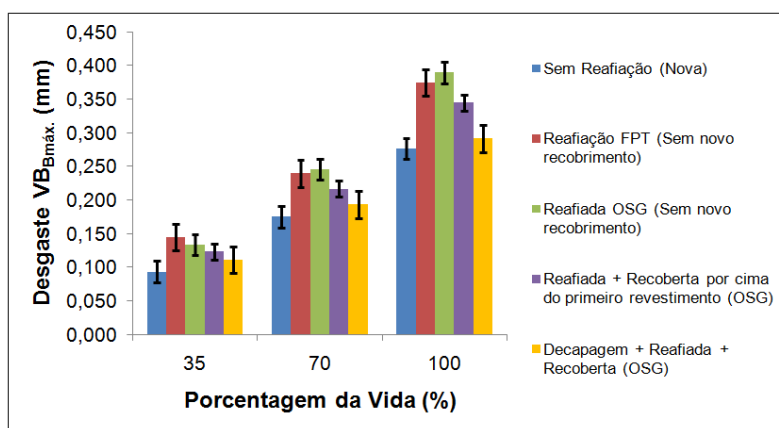


Figura 4.3 – Comparação do desgaste ao longo da vida das brocas com revestimento TiAlN.

Note que as ferramentas que passaram pelo processo de decapagem (retirada do revestimento) + reafiação + recobertas (inserção de um novo revestimento TiAlN) foram as que obtiveram valores mais próximos das ferramentas novas (em média 11,74 %, número calculado considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70 % e 100 % de vida).

4.1.2 - Ferramentas com Revestimento AlCrN

A Figura 4.4 apresenta à boa repetibilidade do comportamento do desgaste ao longo da vida das quatro brocas em análise (os pontos do gráfico mostram o desgaste mais acentuado em uma das arestas da broca). As brocas em análise não passaram pelo processo de reafiação, ou seja, são brocas novas em suas primeiras utilizações. Os desgastes observados são de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$).

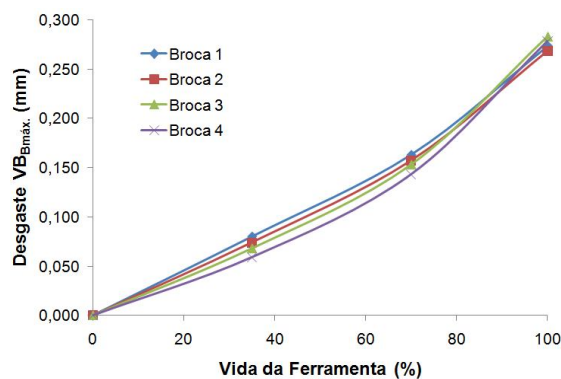


Figura 4.4 – Repetibilidade dos resultados do desgaste ao longo da vida das brocas novas.

A Figura 4.5 mostra a evolução dos valores médios do desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx.}$) ao longo da vida das brocas novas e reafiadas.

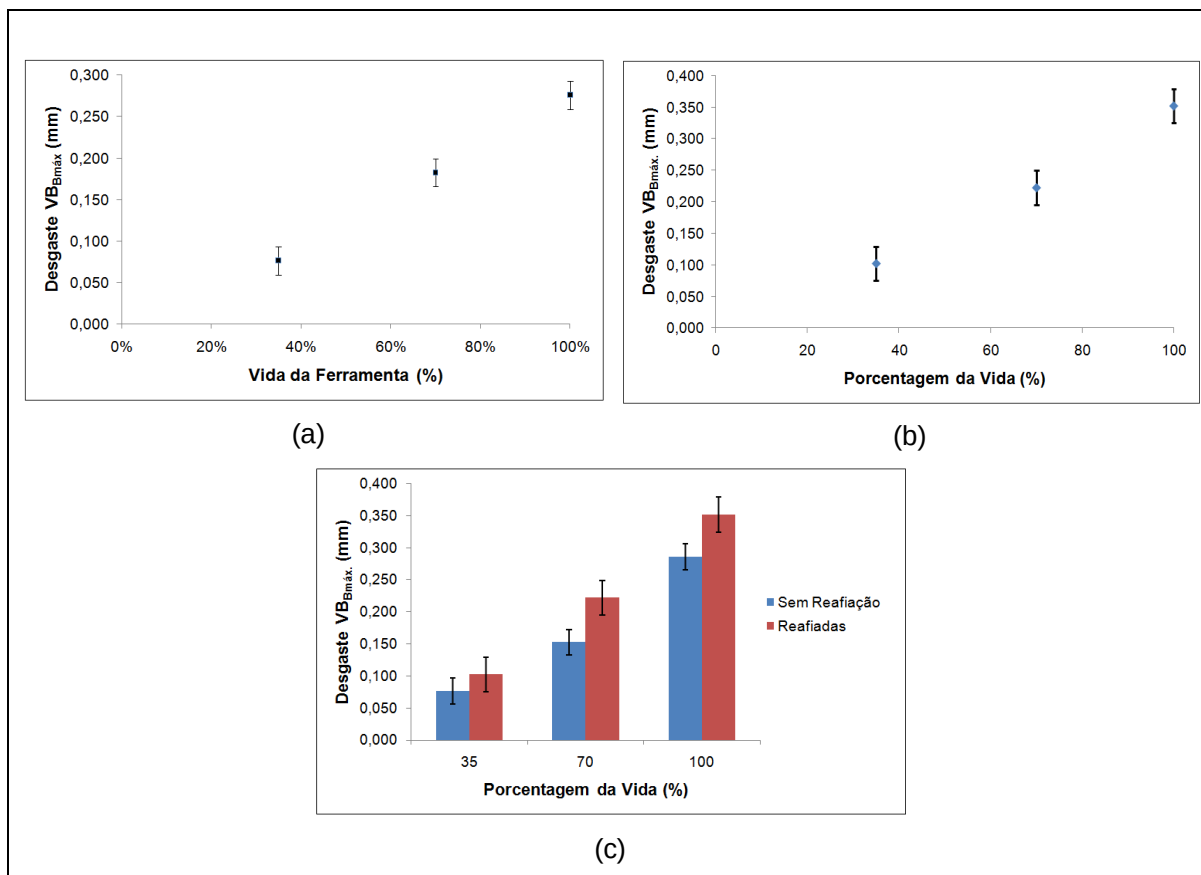


Figura 4.5 – Evolução do desgaste ao longo da vida das brocas revestidas com AlCrN - a) Sem reafiação (brocas novas); b) Brocas reafiadas (OSG), sem novo revestimento; c) Comparação entre as brocas novas e reafiadas.

Note que as brocas com revestimento AlCrN, assim como as brocas com revestimento TiAlN, parecem também não ter atingido o estágio III de desgaste característico, como mostrado na Figura 2.23. Possivelmente a nova área formada pela reafiação, isenta de revestimento, apresentou maior atrito em comparação com as brocas novas. Regiões de maiores atritos favorecem uma maior adesão do cavaco com a superfície de saída da ferramenta. Essa adesão provavelmente fez com que houvesse uma maior taxa de desgaste devido ao aumento de temperatura na interface cavaco/ferramenta.

Observe, também, que as ferramentas reafiadas tiveram maiores taxa de desgaste em relação às brocas novas (em média 45,15 %, número calculado considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70 % e 100 % de vida).

4.1.3 – Ferramentas Sem Revestimento

A Figura 4.6 mostra a boa repetibilidade do comportamento do desgaste ao longo da vida das quatro brocas em análise (os pontos do gráfico mostram o desgaste mais preponderante em uma das arestas da broca). Estas brocas não passaram pelo processo de reafiação, ou seja, são brocas novas em suas primeiras utilizações. Os desgastes observados são de flanco máximo ($VB_{Bmáx.}$).

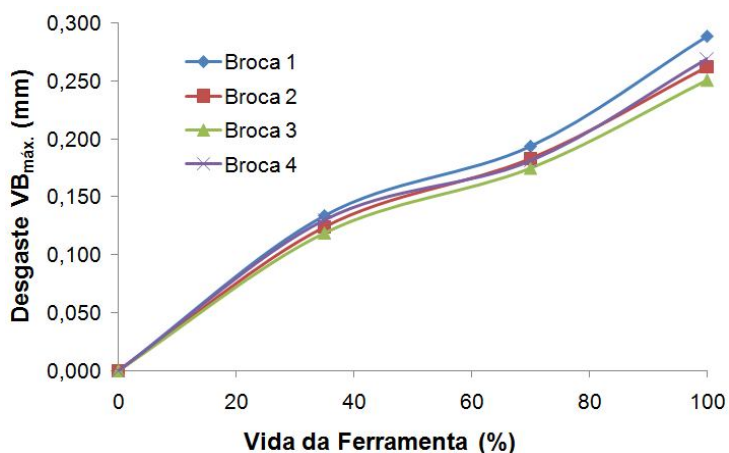


Figura 4.6 – Repetibilidade dos resultados do desgaste ao longo da vida das brocas – Brocas sem revestimento.

A Figura 4.7 mostra a evolução dos valores médios do desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx.}$) ao longo da vida para as brocas sem revestimento novas e reafiadas. Note que essas ferramentas, assim como as brocas com revestimento TiAlN e AlCrN, parecem também não ter atingido o estágio III de desgaste característico, como mostrado na Figura 2.23.

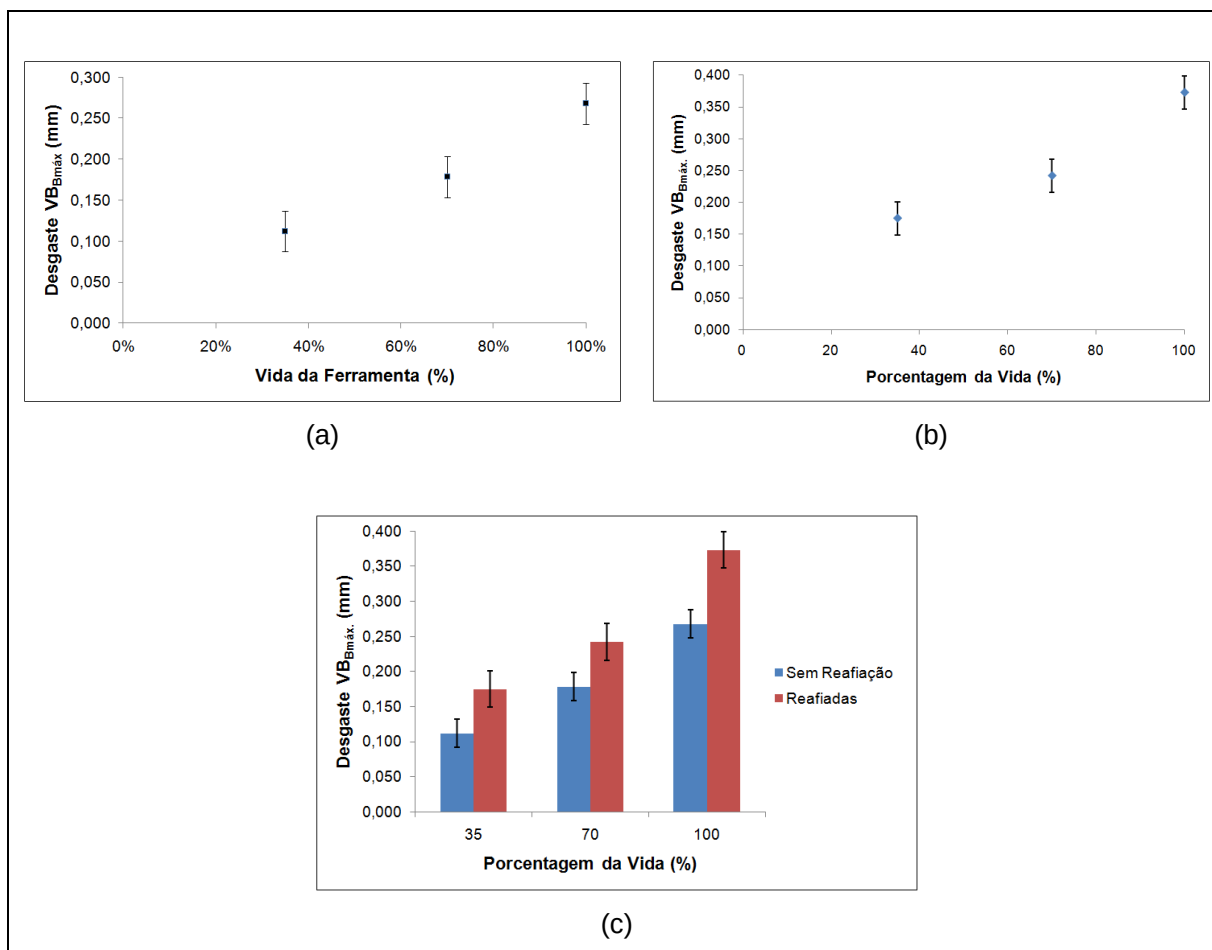


Figura 4.7 – Evolução do desgaste ao longo da vida para brocas sem revestimento - a) Brocas sem reafiação (brocas novas); b) Brocas reafiadas (OSG); c) Comparação entre as brocas novas e reafiadas.

Note que as ferramentas reafiadas apresentaram maiores taxas de desgaste em relação às brocas novas (em média 43,75 %, número calculado considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70 % e 100 % de vida).

A Figura 4.8 apresenta os resultados de desgaste de todas as brocas ao final da vida (100 % da vida).

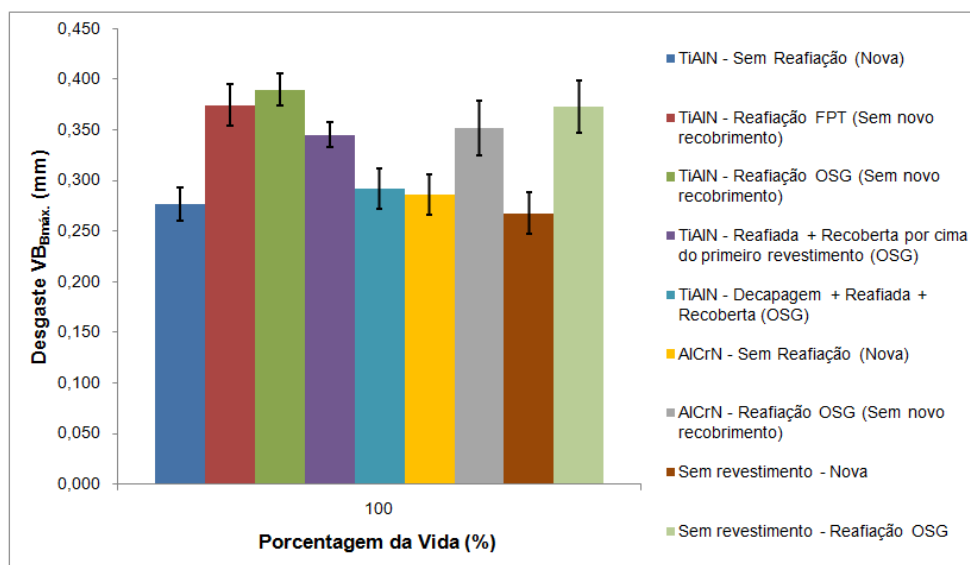


Figura 4.8 – Análise do desgaste para o fim de vida das ferramentas analisadas. Número de furos em 100% da vida: TiAlN – 3400 furos; AlCrN – 4000 furos; Sem revestimento – 500 furos.

Observe que as brocas com revestimento TiAlN que passaram pelo processo de decapagem (retirada do revestimento) + reafiação + recobertas (inserção de um novo revestimento TiAlN) foram as que obtiveram valores mais próximos das ferramentas novas (em média 5,38 %, número calculado considerando apenas o fim de vida). Para as brocas revestidas com AlCrN, as ferramentas reafiadas também apresentaram maiores taxa de desgaste em relação às brocas novas (em média 22,91 %, número calculado considerando apenas o fim de vida). As brocas sem revestimento, assim como as ferramentas revestidas, também apresentaram maiores taxas de desgaste em relação às brocas novas (em média 39,28 %, número calculado considerando apenas o fim de vida).

4.1.4 – Comparação de 2 Tratamentos

A Tabela 4.1 mostra a comparação entre as brocas novas com as brocas reafiadas utilizando a metodologia estatística de comparação de 2 tratamentos, com confiabilidade de 95%. As comparações foram realizadas apenas com os valores de desgaste no fim de vida das ferramentas (100 % da vida). Os valores de p-value < 0,05 mostram que os resultados obtidos diferem estatisticamente. Note que não houve diferença significativa nas brocas revestidas com TiAlN quando se comparou as brocas sem reafiação com as brocas submetidas à decapagem + reafiadas + recobertas (OSG).

Tabela 4.1 – Comparações de 2 tratamentos para o desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx.}$).

Tipo de revestimento	Comparações	p-value
Sem revestimento	Sem reafiação e reafiadas	<u>0,0043</u>
AlCrN	Sem reafiação e reafiadas	<u>0,0214</u>
TiAlN	Sem reafiação e reafiadas na FPT	<u>0,0027</u>
	Sem reafiação e apenas reafiadas na OSG	<u>0,0067</u>
	Sem reafiação e reafiadas + recobertas (OSG)	<u>0,0035</u>
	Sem reafiação e decapagem + reafiadas + recobertas (OSG)	0,3325

4.2 – Esforços de Usinagem

4.2.1 – Ferramentas com Revestimento TiAlN

4.2.1.1 – Força de Avanço

A análise da força de avanço obtida durante os experimentos mostra que as quatro ferramentas testadas e que não passaram pelo processo de reafiação, apresentaram uma boa repetitividade nos resultados mostrados na Figura 4.9. Cada broca realizou três furos em cada condição.

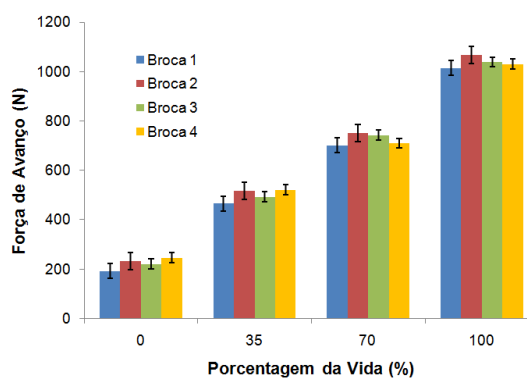


Figura 4.9 – Repetibilidade dos resultados da força de avanço ao longo da vida das brocas com revestimento TiAlN – Sem reafiação (Brocas novas).

A Figura 4.10 reproduz a evolução da força de avanço ao longo da vida das brocas revestidas com TiAlN antes e após o processo de reafiação. Observe que, em todos os casos analisados (brocas novas e reafiadas), existe uma relação direta entre a porcentagem de vida

das brocas e a força de avanço. Isto também pode ser verificado nos trabalhos de Godoy (1988), Khabeery (1990), Kudla (2001), Muthukrishna e Sujatha (1995) e Schroeter e Weingaertner (2001).

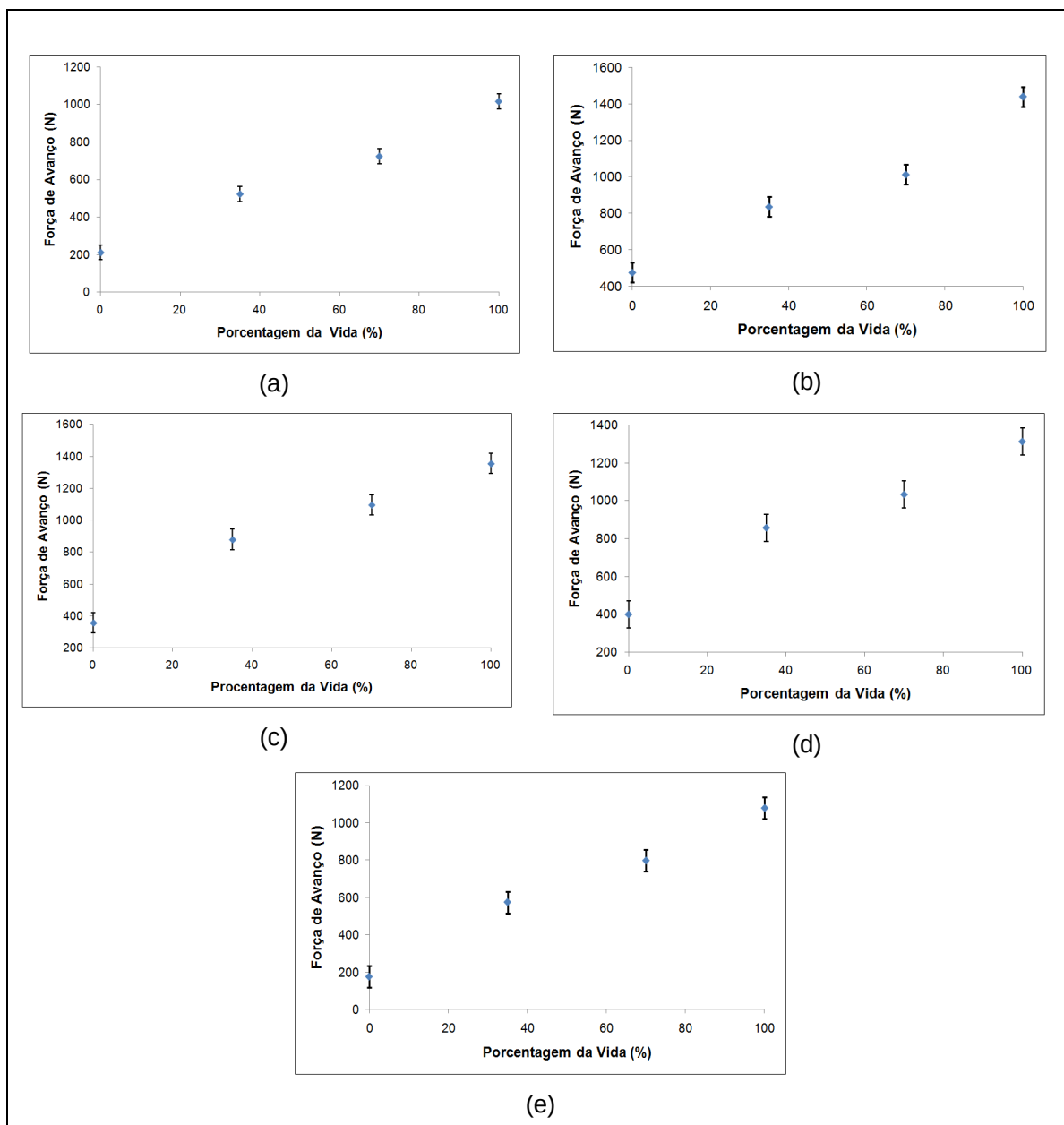


Figura 4.10 – Evolução da força de avanço ao longo da vida da ferramenta para as brocas com revestimento TiAlN – a) Sem reafiação (brocas novas); b) Reafiação FPT, sem novo revestimento; c) Apenas reafiada (OSG), sem novo revestimento; d) Reafiada + recoberta por cima do primeiro revestimento (OSG); e) Decapagem + reafiação + recobertas (OSG).

Diniz et al. (2006) e Micheletti (1980) explicam que o aumento da força de avanço é devido ao aumento no nível de desgaste da ferramenta. Isto pode ser claramente observado através da análise dos gráficos de desgaste ao longo da vida das ferramentas apresentados na Figura 4.2.

A Figura 4.11 mostra a comparação da força de avanço ao longo da vida da ferramenta antes e após serem reafiadas. Observe que as brocas que passaram pelo processo de decapagem (retirada do revestimento) + reafiação + recobertas (inserção de um novo revestimento TiAlN) foram as que obtiveram valores mais próximos das ferramentas novas com o mesmo revestimento em relação a força de avanço (em média 24,56 % e 8,68 %, número calculado considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0%, 35%, 70% e 100% de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 15,99 %). As brocas que passaram por este processo (decapagem + reafiação + recobrimento) podem ser consideradas a de melhor desempenho dentre as ferramentas que passaram pelo processo de reafiação.

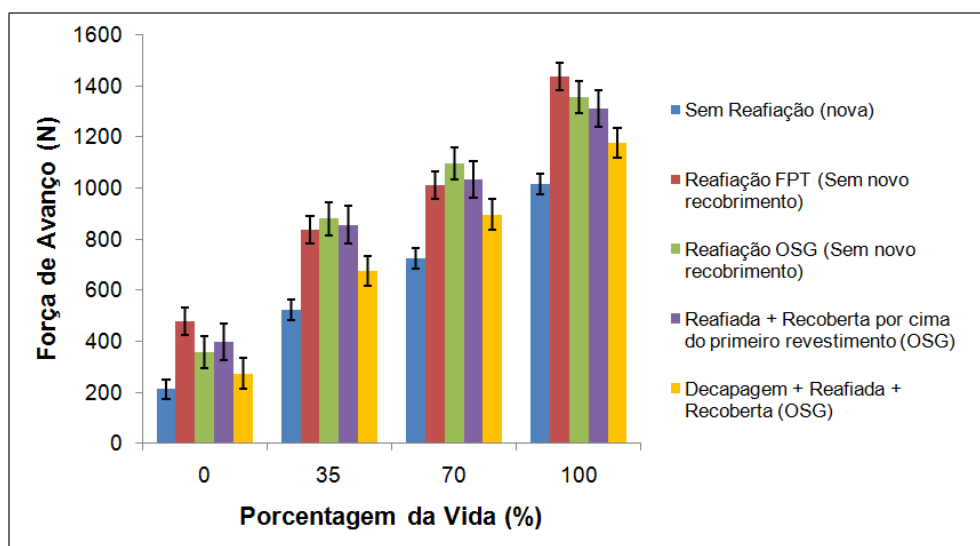


Figura 4.11 – Comparação da força de avanço ao longo da vida da ferramenta – Brocas revestidas com TiAlN antes e após serem reafiadas.

A Tabela 4.2 mostra o aumento percentual médio da força de avanço ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (novas). Note que as ferramentas novas foram as que apresentaram menores forças de avanço em relação às reafiadas, entretanto, à medida que

aumenta o grau de desgaste das brocas, a diferença entre a força de avanço entre as ferramentas (novas versus reafiadas) diminui consideravelmente.

Tabela 4.2 - Aumento percentual médio da força de avanço ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (novas).

Brocas	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio da força de avanço (%)
Reafiação FPT	0	124,93
	35	59,83
	70	39,88
	100	41,59
Reafiação OSG	0	68,68
	35	68,07
	70	51,57
	100	33,48
Reafiada + Recoberta por cima do primeiro revestimento (OSG)	0	87,61
	35	63,75
	70	42,74
	100	29,26
Decapagem + Reafiada + Recoberta (OSG)	0	29,45
	35	28,86
	70	23,95
	100	15,99

Pode-se observar que a medida que as ferramentas se desgastam o percentual de aumento da força de avanço sofrem redução em comparação com as brocas novas. Possivelmente essa redução deva ser por conta a da superfície desgastada das ferramentas reafiadas se aproximarem do nível de desgaste das brocas novas.

4.2.1.2 – Torque

Do mesmo modo que nas forças de avanço, foi realizada uma comparação dos resultados do torque ao longo da vida das brocas (Figura 4.12). Os resultados do torque mantiveram o mesmo comportamento da força de avanço (Figura 4.10). O aumento do torque (assim como da força de avanço) é justificado pelo o aumento do desgaste das arestas quando a ferramenta se aproxima do fim de vida (STEMMER, 2001; CHEN e LIAO, 2003; KUDLA,

2001). Segundo Ferraresi (1977), quanto maior o nível de desgaste da ferramenta maior será à força de usinagem e, conseqüentemente, maior o valor do torque durante a usinagem dos furos. Dessa forma se pode comprovar que os valores da força de avanço está diretamente ligadas com os valores do torque durante o processo de furação.

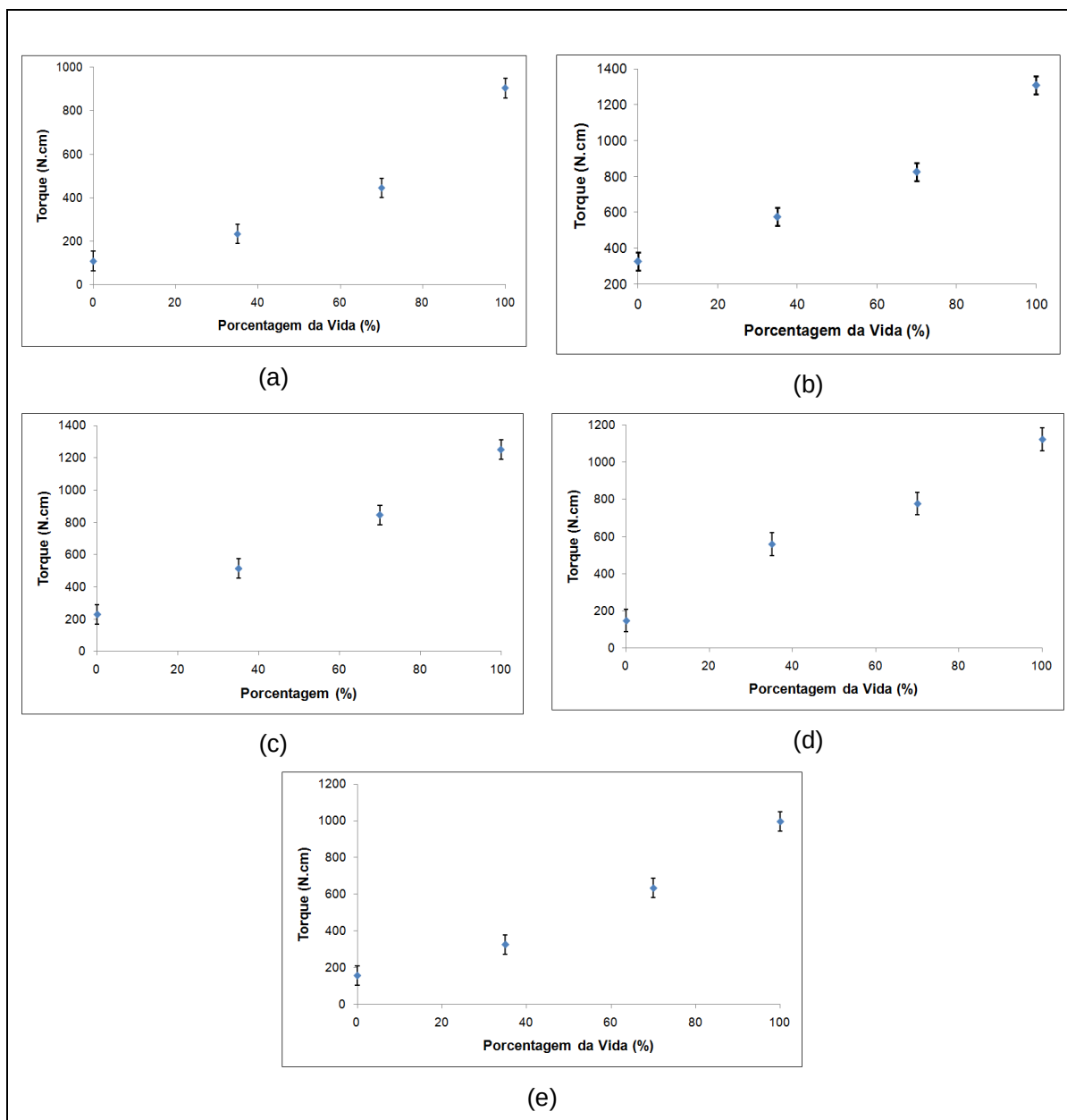


Figura 4.12 – Evolução do torque ao longo da vida da ferramenta para as brocas com revestimento TiAlN – a) Sem reafiação (brocas novas); b) Reafiação FPT, sem novo revestimento; c) Apenas reafiada (OSG), sem novo revestimento; d) Reafiada + recoberta por cima do primeiro revestimento (OSG); e) Decapagem + reafiação + recobertas (OSG).

A Figura 4.13 mostra a comparação do torque ao longo da vida da ferramenta para as ferramentas antes e após serem reafiadas. Note que, assim como ocorreu para a força de avanço (Figura 4.11), as ferramentas que passaram pelo processo de decapagem, reafiação e recobrimento foram as que mais se aproximaram dos valores do torque obtidos para as ferramentas sem reafiação.

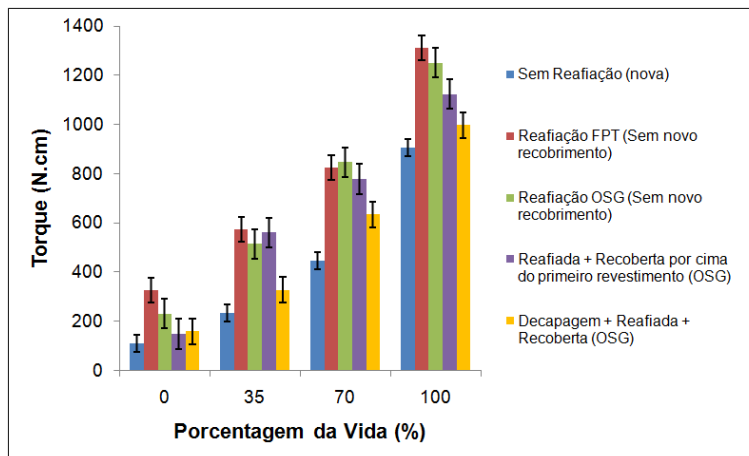


Figura 4.13 – Comparação do torque ao longo da vida da ferramenta – Brocas revestidas com TiAlN antes e após serem reafiadas.

Note que as brocas que passaram apenas reafiadas apresentam desempenho bem inferiores, em contra partida, as ferramentas que passaram pelo processo de decapagem (retirada do revestimento) + reafiação + recobertas (inserção de um novo revestimento TiAlN) foram as que obtiveram valores mais próximos das ferramentas novas com o mesmo revestimento em relação ao torque (em média 8,68 %, número calculado considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0%, 35%, 70% e 100% de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 6,33 %). Dessa forma, mesmo as tensões superficiais provocadas pela decapagem (VIANA, 2004) parecem não ter prejudicado o rendimento dessas brocas quando postas em operação. Note, também, que as ferramentas apenas reafiadas possuem superfície de folga desprotegida (sem revestimento), o que aumenta enormemente o atrito do cavaco com a ferramenta, favorecendo, assim, maiores valores de forças de usinagem e, conseqüentemente, do torque devido a maior adesão do cavaco com a superfície de saída da ferramenta.

A Tabela 4.3 mostra o aumento percentual médio do torque ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (novas).

Tabela 4.3 - Aumento percentual médio do torque ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (novas).

Brocas	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio do torque (%)
Reafiação FPT	0	201,09
	35	146,45
	70	85,54
	100	44,87
Reafiação OSG	0	112,65
	35	120,51
	70	90,05
	100	38,34
Reafiada + Recoberta por cima do primeiro revestimento (OSG)	0	36,64
	35	140,15
	70	74,73
	100	24,29
Decapagem + Reafiada + Recoberta (OSG)	0	45,79
	35	40,25
	70	42,59
	100	10,34

4.2.2 – Ferramentas com Revestimento AlCrN

4.2.2.1 – Força de Avanço

A Figura 4.14 mostra que também houve uma boa repetitividade nos resultados para as brocas revestidas com AlCrN e que não passaram pelo processo de reafiação. Estes resultados indicam a qualidade uniforme das brocas, assim como ocorreu nas brocas revestidas de TiAlN (Figura 4.9), onde a evolução do desgaste também foi uniforme (ver Figura 4.4). Esta repetibilidade ao longo da vida das brocas indica, também, a boa qualidade de rigidez da máquina ferramenta utilizada nos experimentos, tanto na FPT (Torno Famar Tandem 260), onde foram feito testes de vida, quanto no LEPU (Centro de usinagem vertical CNC – Discovery modelo 760), onde foram realizadas as medições de força de avanço e torque.

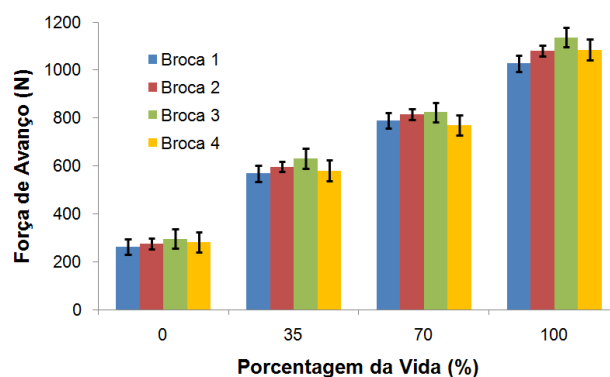


Figura 4.14 – Repetibilidade dos resultados da força de avanço ao longo da vida das brocas.

A Figura 4.15 reproduz a evolução da força de avanço ao longo da vida das brocas novas reafiadas, além de fazer uma a comparação entre os dois estados da ferramenta.

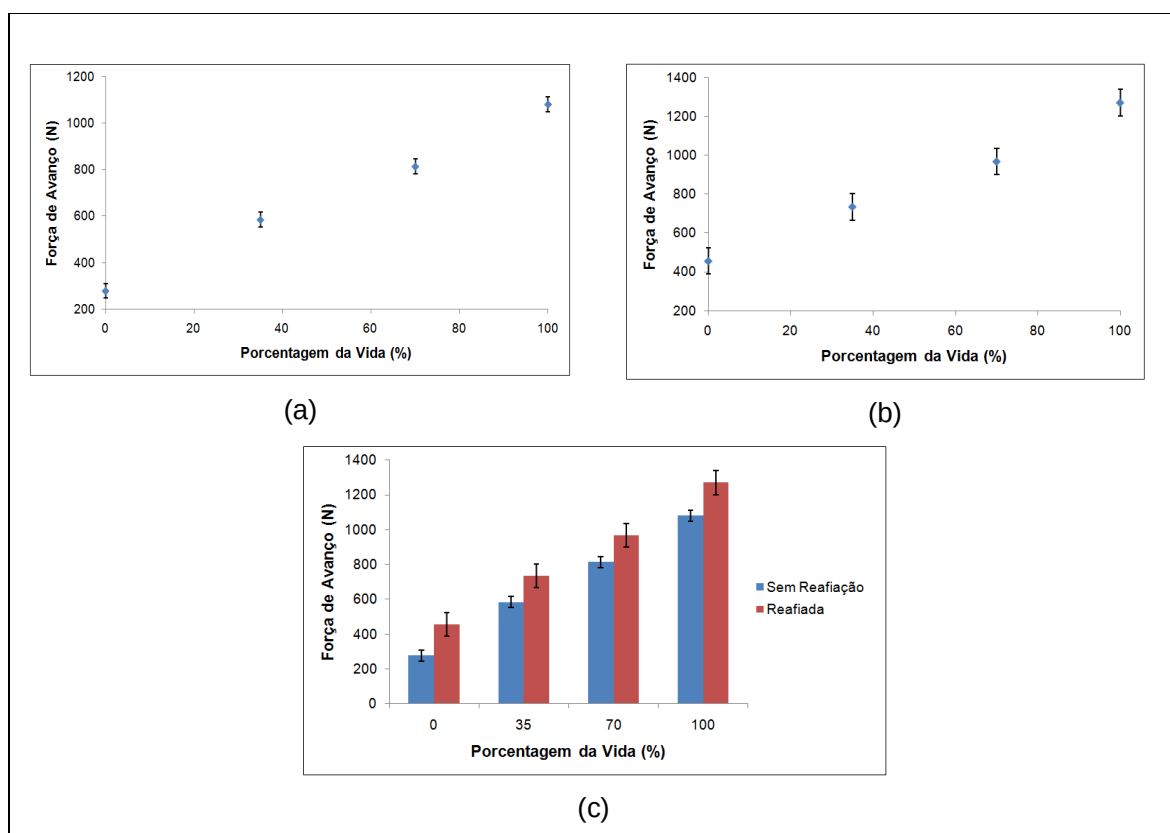


Figura 4.15 – Evolução da força de avanço ao longo da vida da ferramenta – Brocas revestidas com AlCrN - a) Sem reafiação (brocas novas); b) Brocas reafiadas (OSG), sem novo revestimento; c) Comparação entre as brocas antes e após serem reafiadas.

Note que, assim como ocorreu nas ferramentas revestidas com TiAlN, as brocas com revestimento AlCrN também apresentaram crescimento da força de avanço com ao longo da vida da ferramenta, proveniente do aumento do desgaste da broca.

Observe, também, que as brocas reafiadas tiveram maiores valores de força de avanço em relação às brocas novas (em média 31,42 %, número calculado considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0%, 35%, 70% e 100% de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 17,43 %).

A Tabela 4.4 mostra o aumento percentual médio da força de avanço ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (novas).

Tabela 4.4 - Aumento percentual médio da força de avanço ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (novas).

Brocas	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio da força de avanço (%)
Reafiação OSG	0	63,64
	35	25,68
	70	18,91
	100	17,43

Verifique que, à medida que as ferramentas se aproximam do fim de vida (100 % da vida), menor é a diferença dos valores da força de avanço entre as brocas novas e reafiadas. Esse comportamento provavelmente seja pelo fato do desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx.}$) se apresentarem da mesma forma nas ferramentas novas e reafiadas para um mesmo percentual de desgaste ao longo da vida da ferramenta.

Como a furação neste trabalho ocorre a velocidades relativamente elevadas, supõem-se, também, que possam ter ocorrido os mecanismos de difusão e abrasão, comuns para faixas de velocidade de corte elevadas. Entretanto, para garantir qual deles foi o predominante, seria necessário um estudo mais detalhado sobre este assunto. A utilização de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) e/ou um equipamento de EDM podem auxiliar bastante para análises das discussões.

4.2.2.2 – Torque

A Figura 4.16 mostra a evolução do torque ao longo da vida das brocas revestidas com AlCrN e que não foram submetidas ao processo de reafiação. Note que, assim como ocorreu nas ferramentas revestidas com TiAlN, as brocas com revestimento AlCrN também apresentaram crescimento do torque ao longo da vida da ferramenta. Provavelmente esse aumento do torque seja consequência do aumento do desgaste da broca ao longo da sua vida.

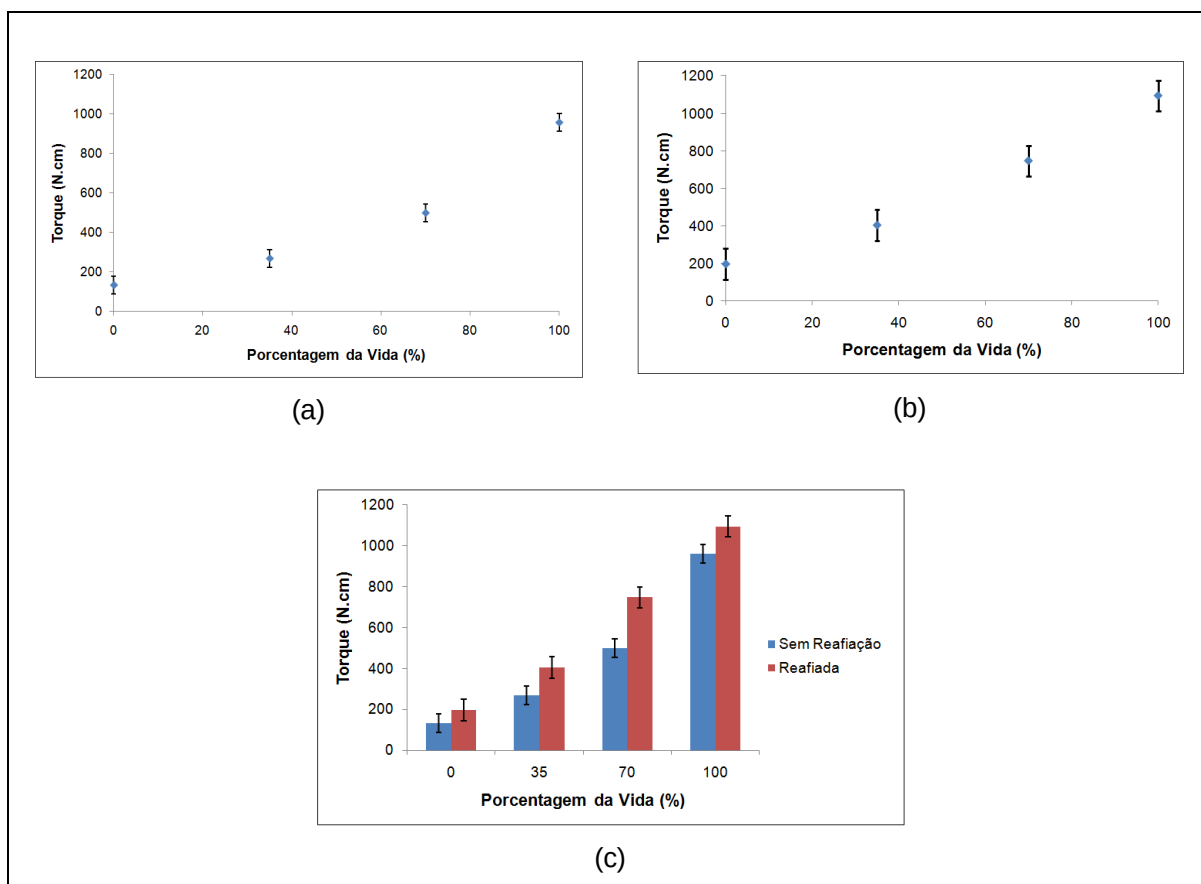


Figura 4.16 – Evolução do torque ao longo da vida das brocas revestidas com AlCrN - a) Sem reafiação (brocas novas); b) Brocas reafiadas (OSG), sem novo revestimento; c) Comparação entre as brocas antes e após serem reafiadas.

Note que as brocas reafiadas tiveram maiores valores de torque em relação às brocas novas (em média 40,64 %, número calculado considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0%, 35%, 70% e 100% de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 14,04 %).

A Tabela 4.5 mostra o aumento percentual médio do torque ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (novas).

Tabela 4.5 - Aumento percentual médio do torque ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (novas).

Brocas	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio da força de avanço (%)
Reafiação OSG	0	48,32
	35	50,68
	70	49,49
	100	14,05

4.2.3 – Ferramentas Sem Revestimento

4.2.3.1 – Força de Avanço

A Figura 4.17 mostra que houve também uma boa repetitividade nos resultados para as brocas sem revestimento. Esta figura mostra os resultados das brocas que não passaram pelo processo de reafiação, ou seja, brocas novas em sua primeira utilização. Durante os experimentos, cada broca realizou três furos e colocou-se neste gráfico a média e o desvio padrão dos valores de força de avanço adquiridos.

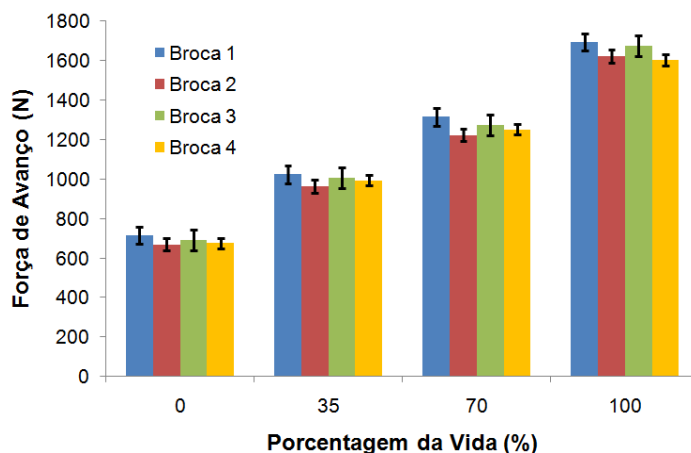


Figura 4.17 – Repetibilidade dos resultados da força de avanço ao longo da vida das brocas – Brocas sem revestimento – Sem reafiação.

A Figura 4.18 mostra a evolução da força de avanço ao longo da vida das brocas novas e reafiadas, além de fazer uma comparação entre ambas.

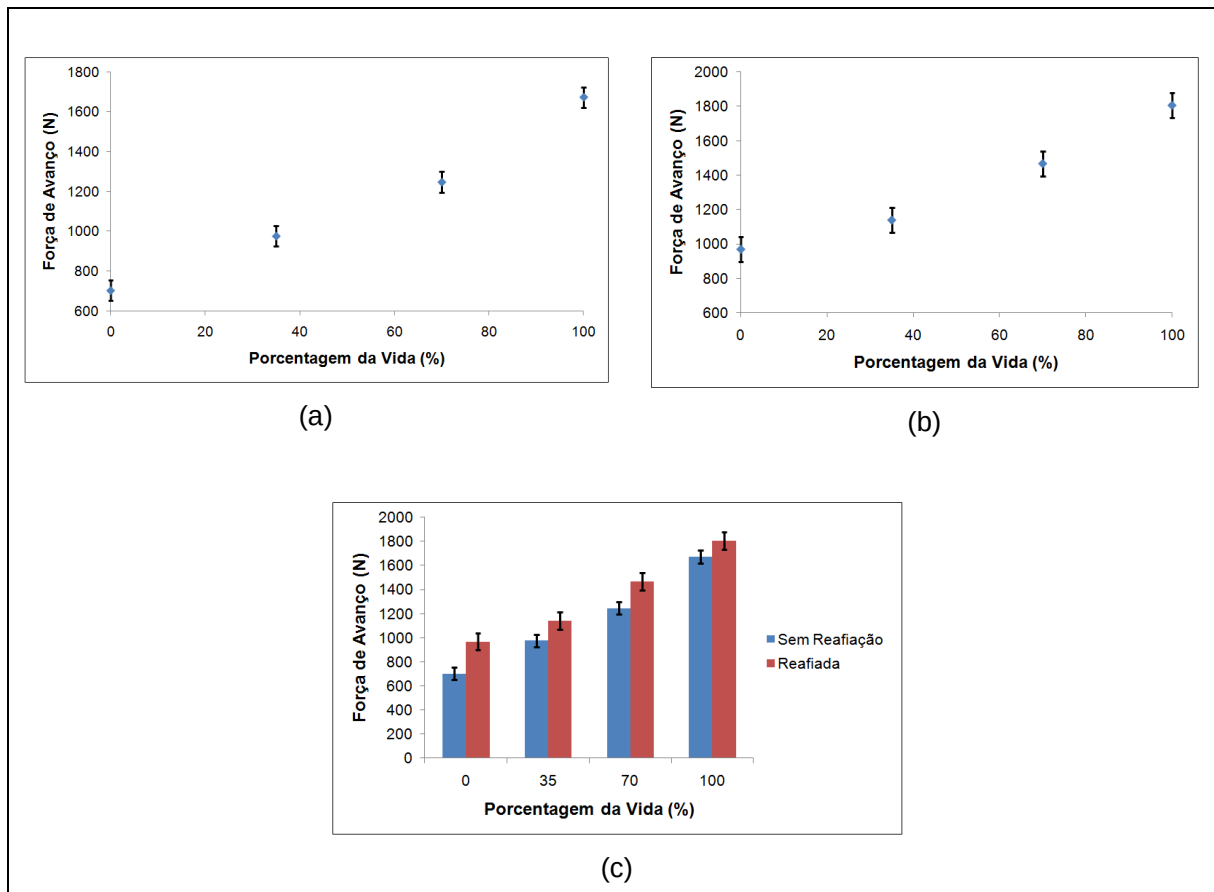


Figura 4.18 – Evolução da força de avanço ao longo da vida das brocas sem revestimento - a) Sem reafiação (brocas novas); b) Brocas reafiadas (OSG); c) Comparação entre as brocas novas (sem reafiação) e reafiadas.

Verifique que as ferramentas reafiadas também apresentaram maiores valores de força de avanço em relação às brocas novas (em média 20,08 %, número calculado considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70 % e 100 % de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 8,08 %).

A Tabela 4.6 mostra o aumento percentual médio da força de avanço ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (novas).

Tabela 4.6 - Aumento percentual médio da força de avanço ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (novas) – Brocas sem revestimento.

Brocas	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio da força de avanço (%)
Reafiação OSG	0	37,81
	35	16,68
	70	17,74
	100	8,07

4.2.3.2 – Torque

A Figura 4.19 mostra a variação do torque ao longo da vida das brocas. Esses valores são referentes às brocas novas.

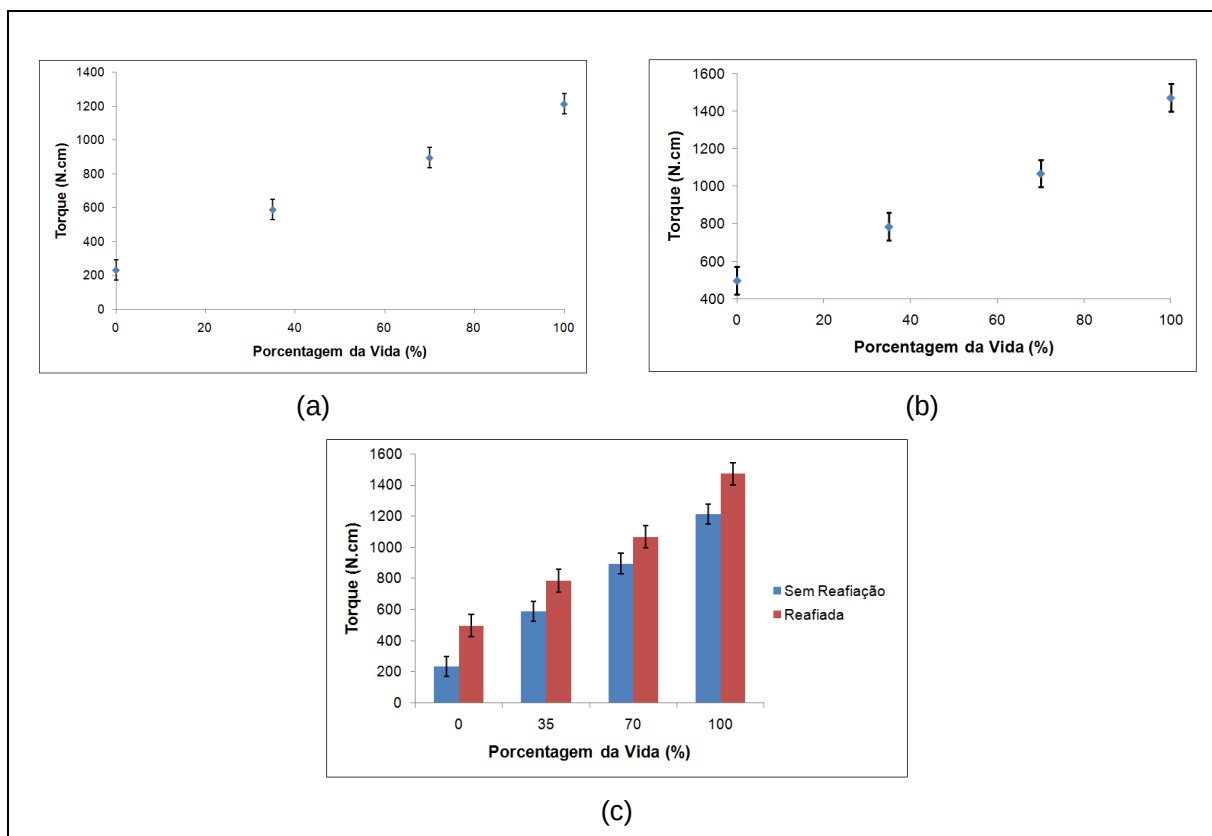


Figura 4.19 – Evolução do torque ao longo da vida das brocas sem revestimento - a) Sem reafiação (brocas novas); b) . Brocas reafiadas (OSG); c) Comparação entre as brocas antes e após serem reafiadas.

Note que as brocas reafiadas também apresentaram maiores valores de torque em relação às brocas novas (em média 46,80 %, número calculado considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70 % e 100 % de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 21,27 %).

A Tabela 4.7 mostra o aumento percentual médio do torque ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (novas). Note que a medida que as ferramentas se desgastam, o percentual de aumento do torque redução em comparação com as brocas novas. Possivelmente essa redução deva ser por conta a da superfície desgastada das ferramentas reafiadas se aproximarem do nível de desgaste das brocas novas. Esse comportamento também foi encontrado nas ferramentas revestidas (TiAlN e AlCrN).

Tabela 4.7 - Aumento médio do torque ao longo da vida em relação às brocas novas.

Brocas	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio do torque (%)
Reafiação OSG	0	136,01
	35	33,08
	70	19,24
	100	21,27

4.2.4 – Comparação Entre os Revestimentos

A Figura 4.20 mostra a influência do tipo de revestimento ao longo da vida da ferramenta quando a variável em questão é a força de avanço e o torque, respectivamente.

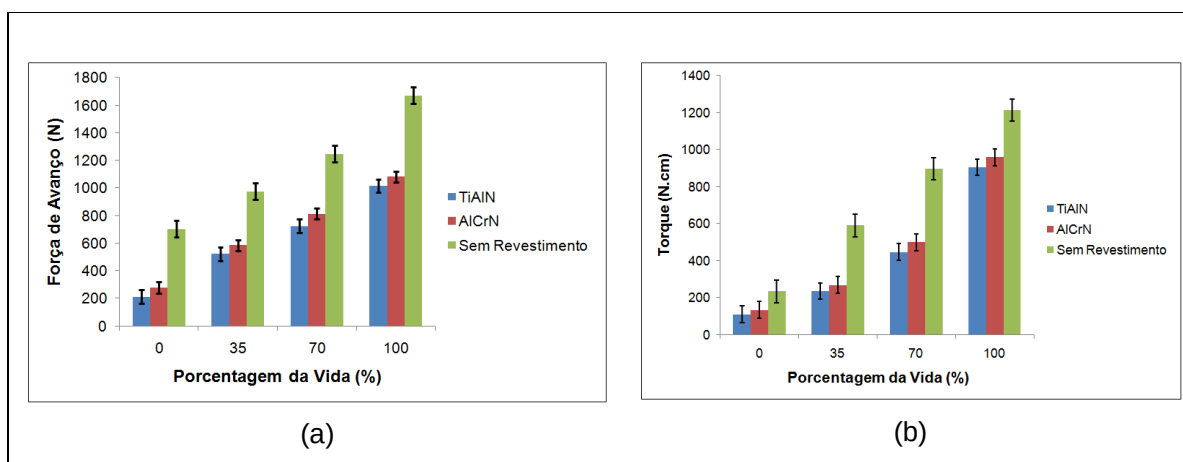


Figura 4.20 – Comparação entre os tipos de revestimento – a) Força de avanço; b) Torque.

Pode-se verificar nesta figura (Figura 4.20) que as brocas sem revestimento foram as que obtiveram maiores valores de força de avanço e torque em relação as brocas revestidas. Segundo Trent e Wright (2000), o revestimento atua de forma a reduzir a adesividade do cavaco com a ferramenta, diminuindo, assim, a área de contato cavaco-ferramenta e, conseqüentemente, os esforços de usinagem. Os valores desta figura são referentes aos valores das brocas que não passaram pelo processo de reafiação, ou seja, brocas novas em suas primeiras utilizações. Coldwell (2004) e Harris et al. (2003) afirmam que valores de atrito elevados encontrados em brocas sem revestimentos podem contribuir para o surgimentos de mecanismos de desgaste tais como adesão e abrasão, os quais influenciam diretamente o desgaste das ferramentas e, conseqüentemente, nos esforços de usinagem. O revestimento, provavelmente, aumentou a lubricidade na interface cavaco/ferramenta. Segundo Ferraressi (1977), Guhring (1997), Khabeery (1990) e Stemmer (2001), existe uma maior tendência ao aumento dos esforços de corte proveniente do aumento do desgaste das arestas das brocas serem mais pronunciados quando a ferramentas chegam próximas do seu fim de vida.

Observe, também, que as brocas sem revestimentos apresentaram maiores valores de força de avanço e torque em relação às brocas revestidas com TiAlN (em média 113,65 % e 101,34 %, respectivamente) e AlCrN (em média 81,69 % e 75,37 %, respectivamente).

As Tabelas 4.8 e 4.9 apresentam, respectivamente, o aumento percentual médio da força de avanço e do torque ao longo da vida em relação às brocas com revestimento TiAlN sem reafiação, ou seja, novas.

Tabela 4.8 - Aumento percentual médio da força de avanço ao longo da vida em relação às brocas com revestimento TiAlN sem reafiação (novas).

Tipo de Revestimento	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio da força de avanço (%)
AlCrN	0	31,34
	35	11,77
	70	12,46
	100	6,48
Sem Revestimento	0	231,35
	35	86,47
	70	72,22
	100	64,58

Tabela 4.9 - Aumento percentual médio do torque ao longo da vida em relação às brocas com revestimento TiAlN sem reafiação (novas).

Tipo de Revestimento	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio do torque (%)
AlCrN	0	22,45
	35	14,53
	70	11,94
	100	5,92
Sem Revestimento	0	114,66
	35	152,01
	70	100,89
	100	34,21

Observe que a força de avanço e o torque, para todas as ferramentas testadas, mostram uma evolução ao longo da vida das ferramentas. O crescimento dessas variáveis pode ser atribuído ao aumento do desgaste da broca ao longo da vida da ferramenta. Castro (2001), Chen e Liao (2003) e Wang (1997) comprovaram, em seus experimentos, que tanto a força de avanço quanto o torque aumentam com a evolução do desgaste. Nas duas grandezas observadas (força de avanço e torque), os valores do aumento médio em relação as brocas novas sofreram redução quando as brocas se aproximam do seu fim de vida (100 % da vida).

4.2.5 – Comparação de 2 Tratamentos

As Tabelas 4.10 e 4.11 mostram, respectivamente, a comparação entre as brocas que não foram reafiadas com as brocas reafiadas utilizando a metodologia estatística de comparação de 2 tratamentos, com confiabilidade de 95% para a força de avanço e torque. As comparações foram realizadas apenas com os valores de fim de vida das ferramentas (100 % da vida). Os valores de p-value < 0,05 mostram que os resultados obtidos diferem estatisticamente, em todas as brocas testadas. Note que valores bem próximos de 0,05 (p-value = 0,0499) podem ser levados em consideração quando o grau de confiabilidade do experimento é aumentado, ou seja, neste caso, se fosse adotado um nível de confiabilidade superior a 95 %, alguns resultados das comparações poderiam apresentar diferenças significativas quando a variável a ser considerada é a força de avanço e/ou torque.

Tabela 4.10 – Comparações de 2 tratamentos para a força de avanço.

Tipo de revestimento	Comparações	p-value
Sem revestimento	Sem reafiação e reafiadas	<u>0,0499</u>
AlCrN	Sem reafiação e reafiadas	<u>0,0085</u>
TiAlN	Sem reafiação e reafiadas na FPT	<u>0,0042</u>
	Sem reafiação e apenas reafiadas na OSG	<u>0,0015</u>
	Sem reafiação e reafiadas + recobertas (OSG)	<u>0,0032</u>
	Sem reafiação e decapagem + reafiadas + recobertas (OSG)	<u>0,0156</u>

Tabela 4.11 – Comparações de 2 tratamentos para o torque.

Tipo de revestimento	Comparações	p-value
Sem revestimento	Sem reafiação e reafiadas	<u>0,0083</u>
AlCrN	Sem reafiação e reafiadas	<u>0,0315</u>
TiAlN	Sem reafiação e reafiadas na FPT	<u>0,0003</u>
	Sem reafiação e apenas reafiadas na OSG	<u>0,0083</u>
	Sem reafiação e reafiadas + recobertas (OSG)	<u>0,0055</u>
	Sem reafiação e decapagem + reafiadas + recobertas (OSG)	<u>0,0479</u>

4.3 – Qualidade dos Furos Usinados

4.3.1 – Ferramentas com Revestimento TiAlN

4.3.1.1 – Desvio de Circularidade

A Figura 4.21 mostra a variação do desvio de circularidade ao longo da vida das brocas para as ferramentas revestidas com TiAlN e que não foram submetidas ao processo de reafiação, ou seja, brocas novas. A análise desta figura permite observar que este tipo de desvio geométrico é influenciado ao longo da vida das ferramentas. Uma explicação para tal comportamento poderia ser que à medida que a ferramenta se aproxima do fim de vida, ocorre um crescimento do desgaste da broca, o que possibilita uma maior deformação do material da

parede do furo, fazendo com que o diâmetro do furo sofra alterações (CSELLE, 1998; WANG, 1997).

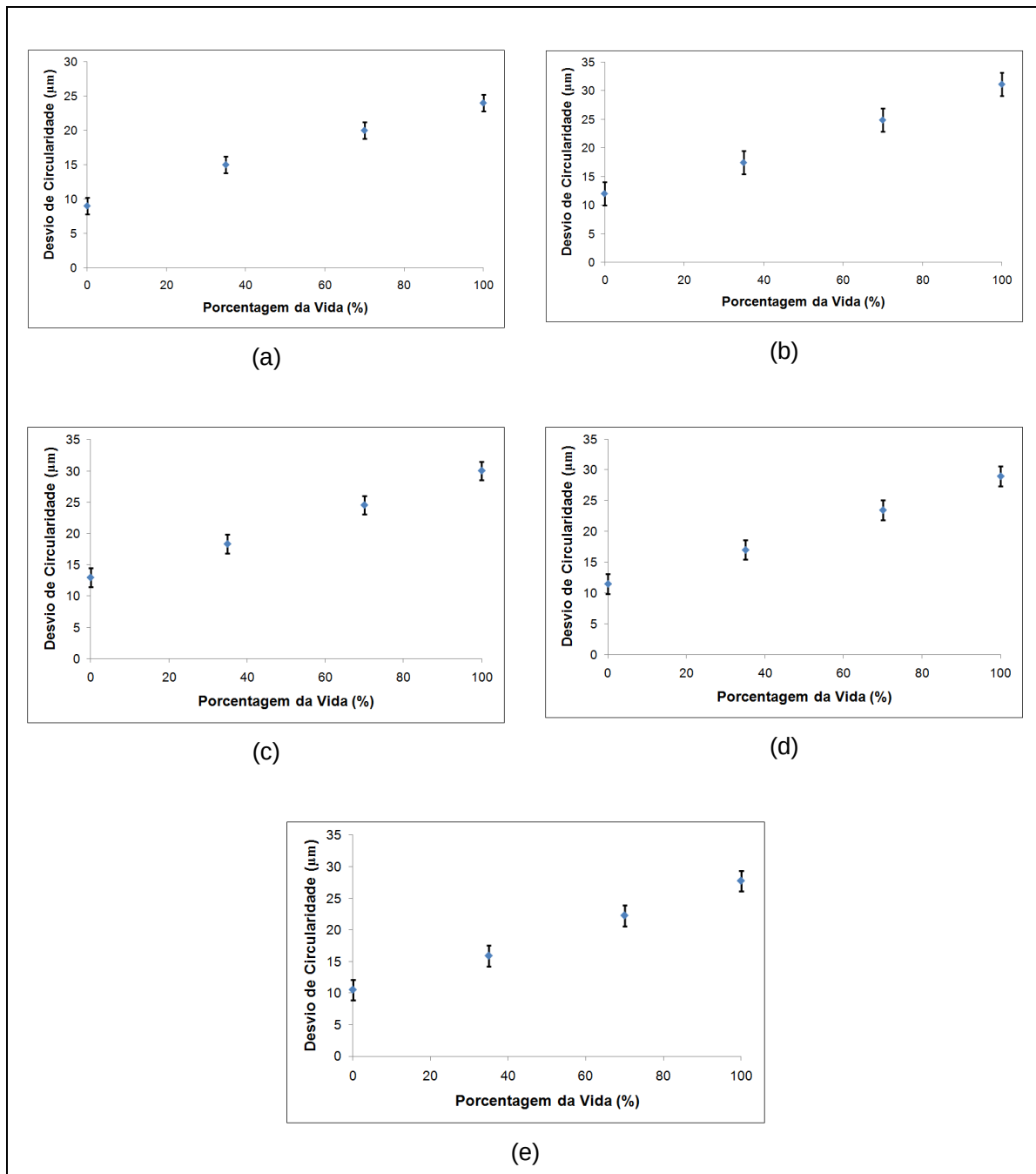


Figura 4.21 – Evolução do desvio de circularidade ao longo da vida das as brocas revestidas de TiAlN – a) Sem reafiação (brocas novas); b) Reafiação FPT, sem novo revestimento; c) Apenas reafiada (OSG), sem novo revestimento; d) Reafiada + recoberta por cima do primeiro revestimento (OSG); e) Decapagem + reafiação + recobertas (OSG).

Khabeery (1990), Ferraresi (1977) e Micheletti (1980) afirmam que ferramentas desgastadas fazem com que o eixo de rotação do conjunto oscile, provocando desvios geométricos nos furos. Quando os furos apresentam desvios geométricos fora dos valores pré-definidos, é necessária a troca (substituição) ou reafiação das brocas, de modo que os furos fiquem dentro das tolerâncias específicas no projeto inicial.

A Figura 4.22 mostra a comparação do desvio de circularidade ao longo da vida das brocas novas e reafiadas.

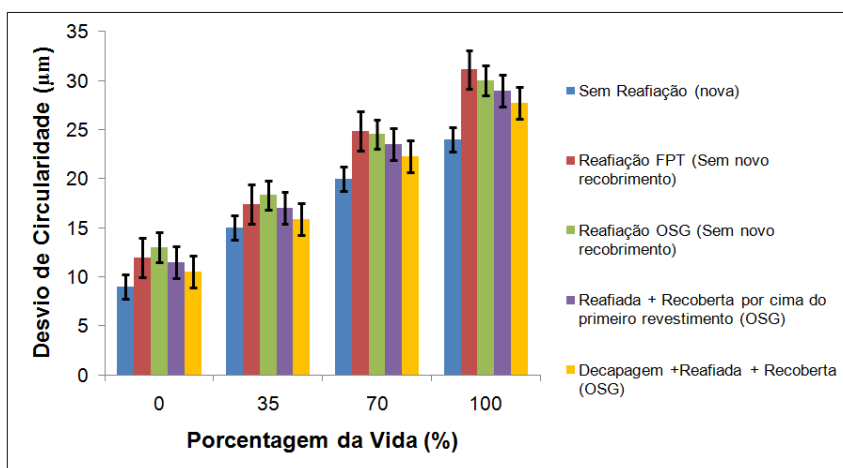


Figura 4.22 – Comparação do desvio de circularidade ao longo da vida da ferramenta – Brocas revestidas com TiAlN antes e após serem reafiadas.

Observe que as brocas reafiadas que passaram pelo processo de decapagem (retirada do revestimento) + reafiação + recobertas (inserção de um novo revestimento TiAlN) foram as que obtiveram valores mais próximos das ferramentas novas com o mesmo revestimento em relação aos valores de desvio de circularidade (em média 12,35 %, número calculado considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70 % e 100 % de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 11,33 %).

A Tabela 4.12 mostra o aumento percentual médio do desvio de circularidade ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (brocas novas). Observe que todas as brocas reafiadas apresentaram o mesmo comportamento, ou seja, a medida que as brocas se aproximam do seu fim de vida (100 % da vida) o percentual de aumento médio do desvio de circularidade sofre redução. Brocas desgastadas tendem a provocar elevados valores de desvios de circularidade, por isso, provavelmente, a medida que as brocas se desgastam ao longo da vida elas tendem a apresentar desgaste semelhantes.

Tabela 4.12 - Aumento percentual médio do desvio de circularidade ao longo da vida em relação às brocas revestidas com TiAlN e sem reafiação (brocas novas).

Brocas	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio do desvio de circularidade (%)
Reafiação FPT	0	33,33
	35	16,23
	70	24,35
	100	29,67
Reafiação OSG	0	44,44
	35	22,27
	70	22,65
	100	25,00
Reafiada + Recoberta por cima do primeiro revestimento (OSG)	0	27,78
	35	13,47
	70	17,52
	100	20,83
Decapagem + Reafiada + Recoberta (OSG)	0	16,67
	35	5,86
	70	11,31
	100	15,58

As brocas que foram apenas reafiadas (sem recobrimento) tiveram menor desempenho. Nesta situação as brocas possuem sua superfície de folga isenta da proteção devido a não inserção do revestimento. Ferramentas sem revestimento apresentam valores mais elevados de coeficiente de atrito em relação às ferramentas revestidas. A presença do revestimento faz com haja uma redução no coeficiente de atrito na interface cavaco/ferramenta e, assim, as solicitações térmicas nesta região são bastante reduzida, o que faz com as brocas não perca tanta resistência, além de facilitar o escoamento do cavaco (TRENT e WRIGHT, 2000).

4.3.1.2 – Desvio de Cilindricidade

A Figura 4.23 mostra a evolução do desvio de cilindridade ao longo da vida das brocas revestida com TiAlN novas e reafiadas.

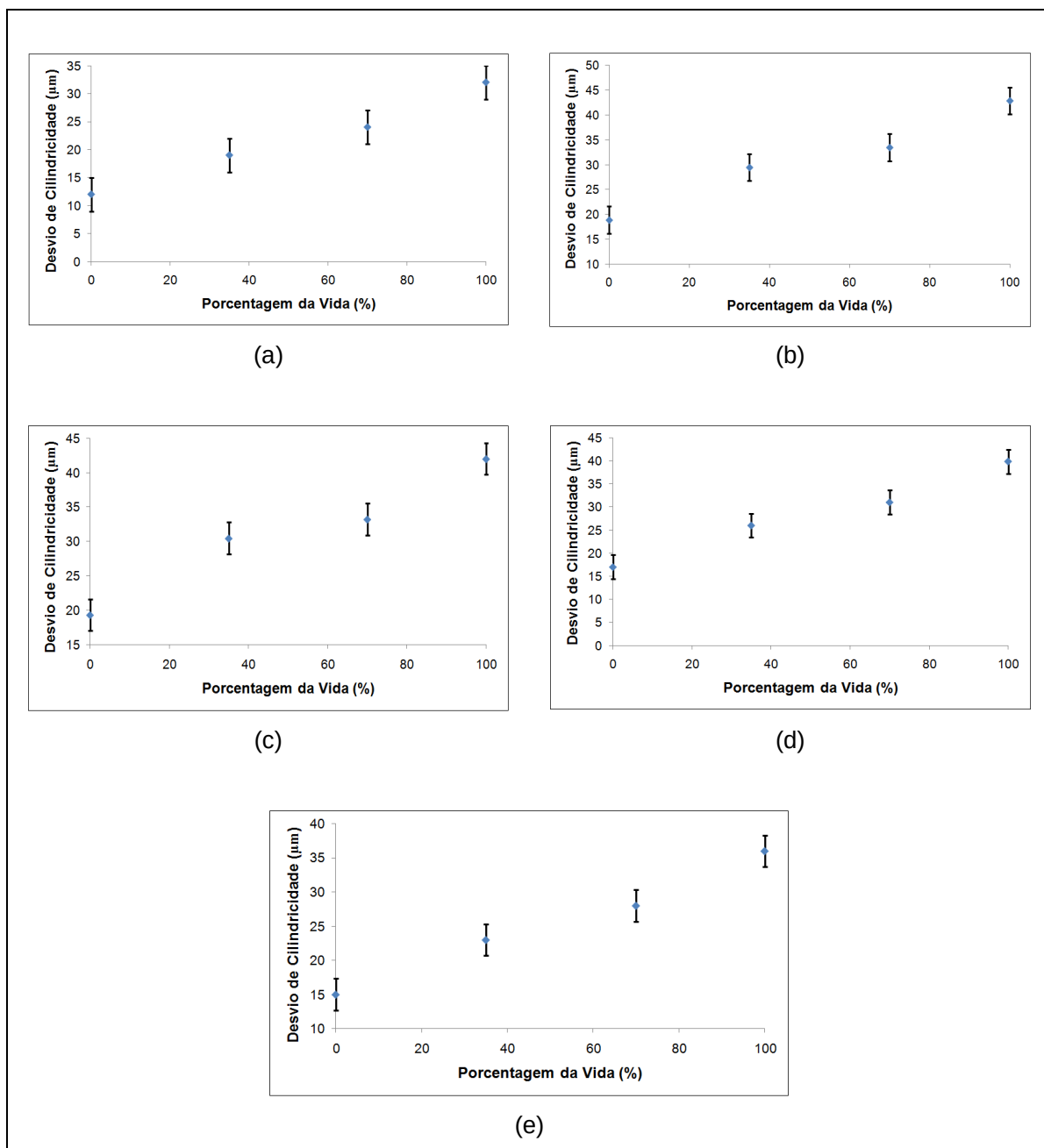


Figura 4.23 – Evolução do desvio de cilindridade ao longo da vida das brocas revestidas com TiAlN – a) Sem reafiação (brocas novas); b) Reafiação FPT, sem novo revestimento; c) Apenas reafiada (OSG), sem novo revestimento; d) Reafiada + recoberta por cima do primeiro revestimento (OSG); e) Brocas que passaram pelo processo de decapagem + reafiação + recobrimento (OSG).

Assim como ocorreu para o desvio de circularidade, o desvio de cilindridade também aumentou de valor quando as ferramentas se aproximaram do fim de vida (100 % da vida). Esse comportamento pode estar relacionado com as influências que as modificações das arestas de corte exercem sobre o desvio de cilindridade. Segundo Teixeira (1995), qualquer assimetria ou excentricidade das arestas de corte provocado pelo desgaste pode acarretar perturbações na cilindridade do furo. Pode ser observado, também, que as brocas que foram apenas reafiadas apresentaram maiores valores de desvio de cilindridade, em contra partida, as brocas que passaram pelo processo de decapagem, reafiação e recobrimento apresentam valores mais próximos em relação aos resultados obtidos com as brocas novas.

A Figura 4.24 mostra a comparação dos desvios de circularidade ao longo da vida das brocas antes e após serem reafiadas apresentados na Figura 4.23.

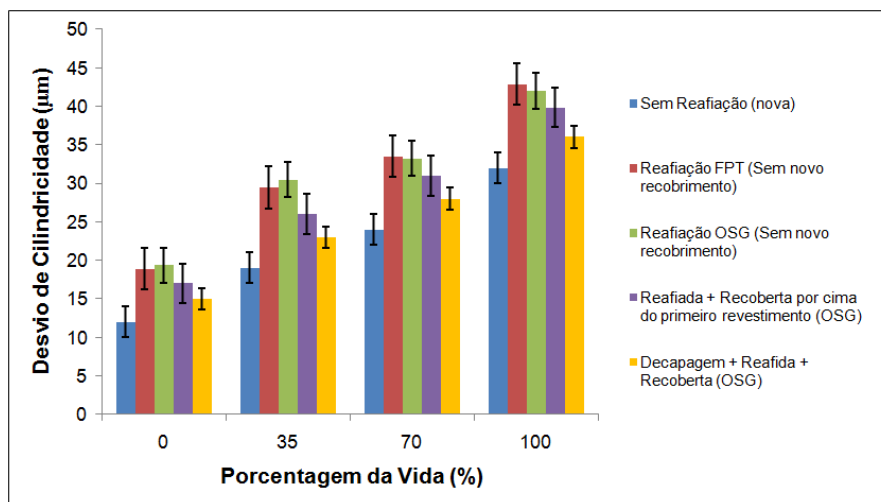


Figura 4.24 – Comparação do desvio de cilindridade ao longo da vida da ferramenta – Brocas revestida com TiAlN antes e após a reafiação.

Note que as brocas que passaram pelo processo de decapagem (retirada do revestimento) + reafiação + recobertas (inserção de um novo revestimento TiAlN) foram as que obtiveram valores mais próximos das ferramentas novas com o mesmo revestimento em relação aos valores de desvio cilindridade (em média 18,81 %, número calculado considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70 % e 100 % de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 12,51 %).

A Tabela 4.13 mostra o aumento percentual médio do desvio de cilindridade ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (brocas novas). Observe que todas as brocas reafiadas apresentaram o mesmo comportamento, ou seja, à medida que as brocas se aproximam do fim de vida (100 % da vida), o percentual de aumento médio do desvio de cilindridade sofre redução. Possivelmente esse comportamento seja pelo o fato de que, a medida que as brocas reafiadas se desgastam, mais se aproximam da geometria desgastadas das brocas novas. As brocas que foram apenas reafiadas (sem recobrimento) possuem sua superfície de folga isenta da proteção do revestimento. Ferramentas sem revestimento apresentam valores mais elevados de coeficiente de atrito em relação às ferramentas revestidas. Segundo Trent e Wright (2000), o revestimento atua de forma a reduzir a adesividade do cavaco com a ferramenta, diminuindo, dessa forma, a área de contato cavaco-ferramenta e, conseqüentemente, o atrito nessa região. A redução do atrito favorece uma menor temperatura na interface cavaco/ferramenta, o que possibilita menores taxas de desgaste da ferramenta quando posta em operação.

Tabela 4.13 - Aumento percentual médio do desvio de cilindridade ao longo da vida em relação às brocas novas revestidas com TiAlN.

Brocas	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio do desvio de cilindridade (%)
Reafiação FPT	0	57,42
	35	55,05
	70	39,51
	100	33,94
Reafiação OSG	0	61,17
	35	60,37
	70	38,46
	100	31,25
Reafiada + Recoberta por cima do primeiro revestimento (OSG)	0	41,67
	35	36,84
	70	29,17
	100	24,50
Decapagem + Reafiada + Recoberta (OSG)	0	25,00
	35	21,05
	70	14,28
	100	12,50

4.3.2 – Ferramentas com Revestimento AlCrN

4.3.2.1 – Desvio de Circularidade

A Figura 4.25 mostra a evolução do desvio de circularidade ao longo da vida das brocas novas em sua primeira utilização.

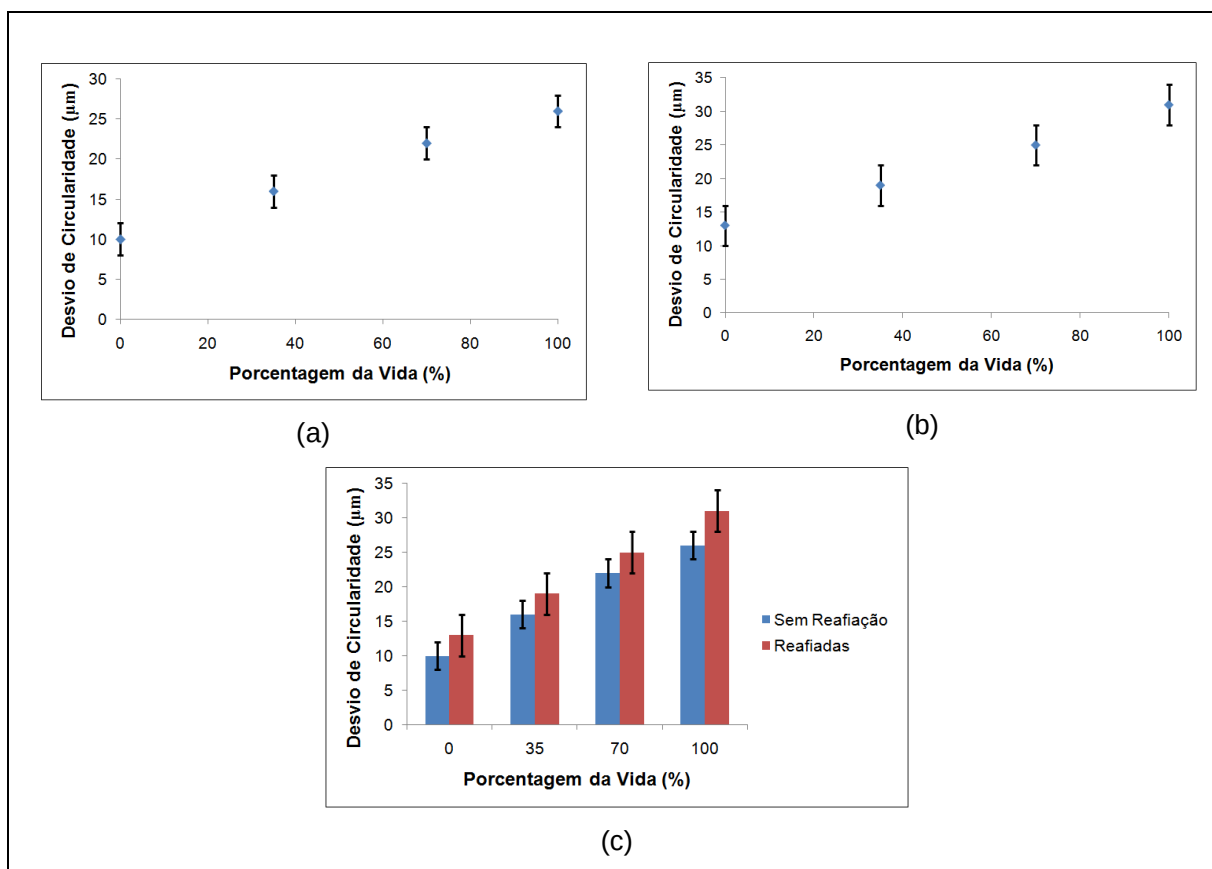


Figura 4.25 – Evolução do desvio de circularidade ao longo da vida das brocas revestidas com AlCrN - a) Sem reafiação (brocas novas); b) Brocas reafiadas (OSG), sem novo revestimento; c) Comparação entre as brocas novas e reafiadas.

Observe que as ferramentas reafiadas tiveram maiores valores de desvio de circularidade em relação às brocas novas (em média 20,40 %, números calculados considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70 % e 100 % de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 13,63 %). A Tabela 4.14 mostra o aumento médio do desvio de circularidade das brocas novas.

Tabela 4.14 - Aumento percentual médio do desvio de circularidade.

Brocas	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio do desvio de circularidade (%)
Reafiação OSG	0	30,00
	35	18,75
	70	13,64
	100	19,23

4.3.2.2 – Desvio de Cilindricidade

A Figura 4.26 mostra a evolução e comparação do desvio de cilindridade ao longo da vida das brocas para as brocas revestidas com AlCrN novas e reafiadas.

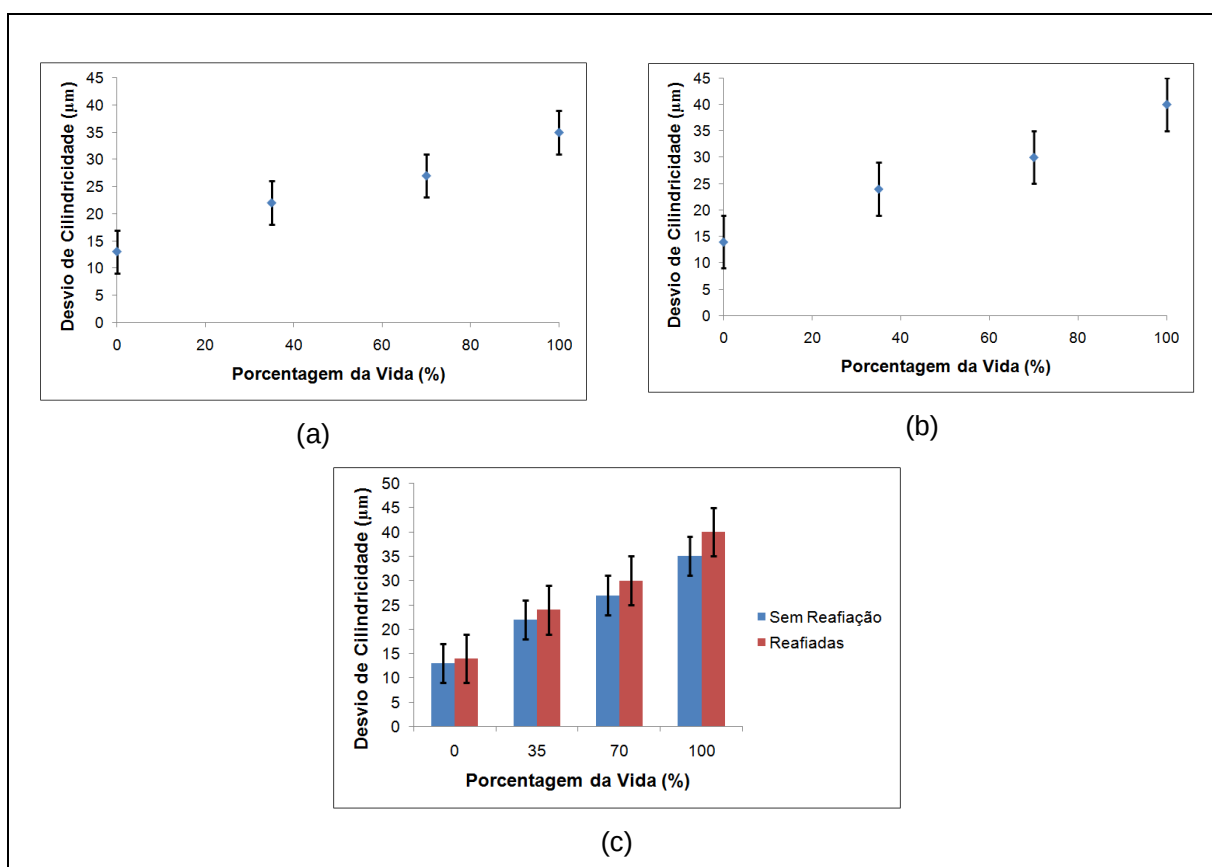


Figura 4.26 – Evolução do desvio de cilindridade ao longo da vida das brocas revestidas com AlCrN - a) Sem reafiação (brocas novas); b) Brocas reafiadas (OSG), sem novo revestimento; c) Comparação entre as brocas novas e reafiadas.

Assim como ocorreu para o desvio de circularidade, o desvio de cilindridade também apresentou um acréscimo do seu valor ao longo da vida das brocas. Note, também, que as brocas revestidas com AlCrN apresentaram um aumento no desvio de circularidade ao longo da vida das brocas. As brocas que passaram pelo processo de reafiação, sem recobrimento, possuem a superfície de folga isenta de proteção, o que, provavelmente, fez com que essas ferramentas perdessem resistência nesta região, além de atingir maiores valores de coeficiente de atrito do cavaco com a superfície de saída da ferramenta. Altos valores de coeficiente de atrito favorecem o aumento da temperatura na interface cavaco/ferramenta favorecendo, assim, maiores níveis de desgaste.

Verifique, também, que as brocas reafiadas tiveram maiores valores de desvio cilindridade em relação às brocas novas (em média 10,54 %, número calculado considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70 % e 100 % de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 7,69 %). A Tabela 4.15 mostra o aumento percentual médio do desvio de cilindridade ao longo da vida em relação às brocas que não passaram pelo processo de reafiação (brocas novas).

Tabela 4.15 - Aumento percentual médio do desvio de cilindridade ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (novas) – Brocas com revestimento AlCrN.

Brocas	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio do desvio de cilindridade (%)
Reafiação OSG	0	7,69
	35	9,09
	70	11,11
	100	14,28

4.3.3 – Ferramentas Sem Revestimento

4.3.3.1 – Desvio de Circularidade

A Figura 4.27 mostra a evolução e comparação do desvio de circularidade ao longo da vida das brocas sem revestimentos novas e reafiadas. Assim como ocorreu nas ferramentas revestidas (TiAlN e AlCrN, respectivamente), as ferramentas sem revestimento também demonstraram um aumento no desvio de circularidade ao longo da vida da ferramenta. Segundo Trent e Wright (2000), ferramentas sem revestimento apresentam valores mais

elevados de coeficiente de atrito em relação às ferramentas revestidas, pois o revestimento atua de forma a reduzir a adesividade do cavaco com a ferramenta, reduzindo, assim, a área de contato cavaco/ferramenta e, conseqüentemente, o atrito nessa região.

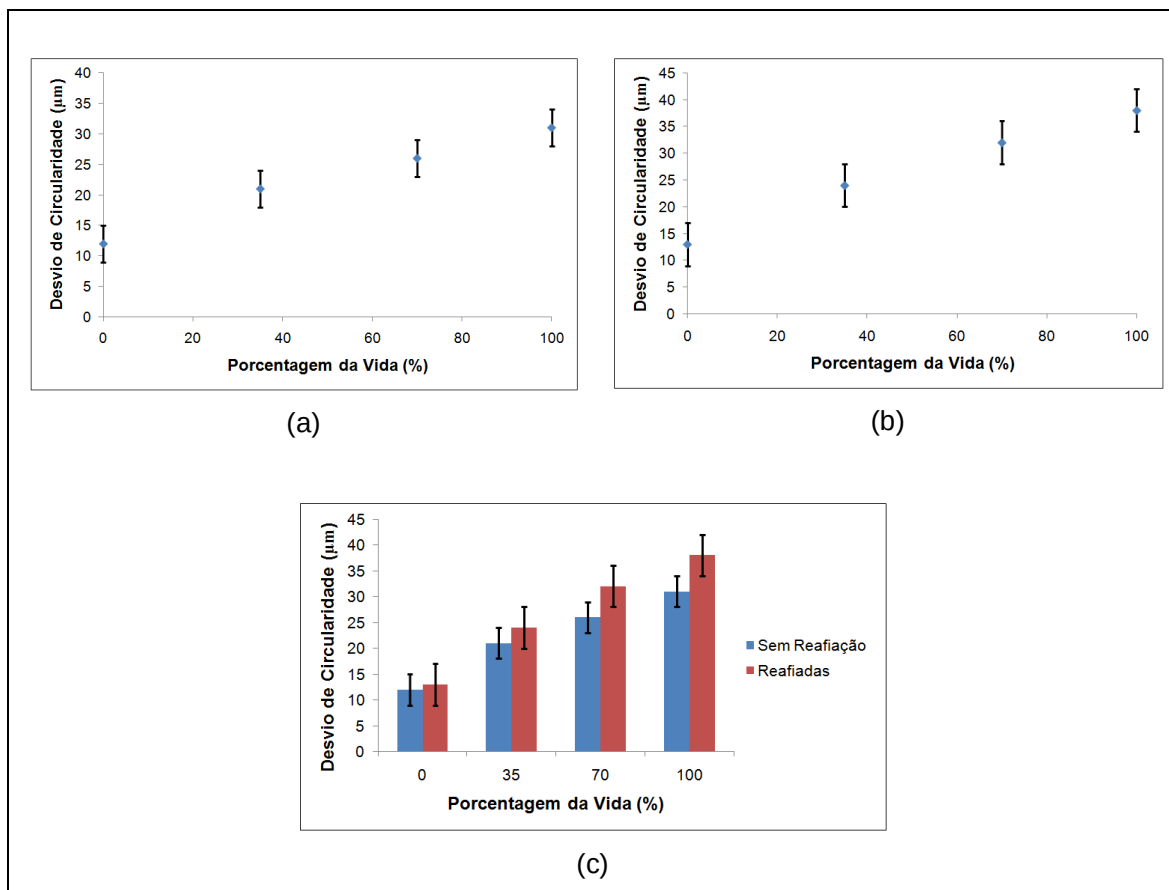


Figura 4.27 – Evolução do desvio de circularidade ao longo da vida das brocas sem revestimento - a) Brocas novas; b) Brocas reafiadas (OSG); c) Comparação entre as brocas antes e após serem reafiadas.

Observe que as brocas reafiadas também apresentaram maiores valores de desvio de circularidade em relação às brocas novas (em média 17,07 %, números calculados considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70 % e 100 % de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 14,28 %).

A Tabela 4.16 mostra o aumento percentual médio do desvio de circularidade ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (novas).

Tabela 4.16 - Aumento percentual médio do desvio de circularidade ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (novas) – Brocas sem revestimento.

Brocas	Porcentagem da Vida (%)	Aumento do desvio de circularidade (%)
Reafiação OSG	0	8,30
	35	14,28
	70	23,08
	100	22,58

4.3.3.2 – Desvio de Cilindricidade

A Figura 4.28 mostra a evolução e comparação do desvio de cilindridade.

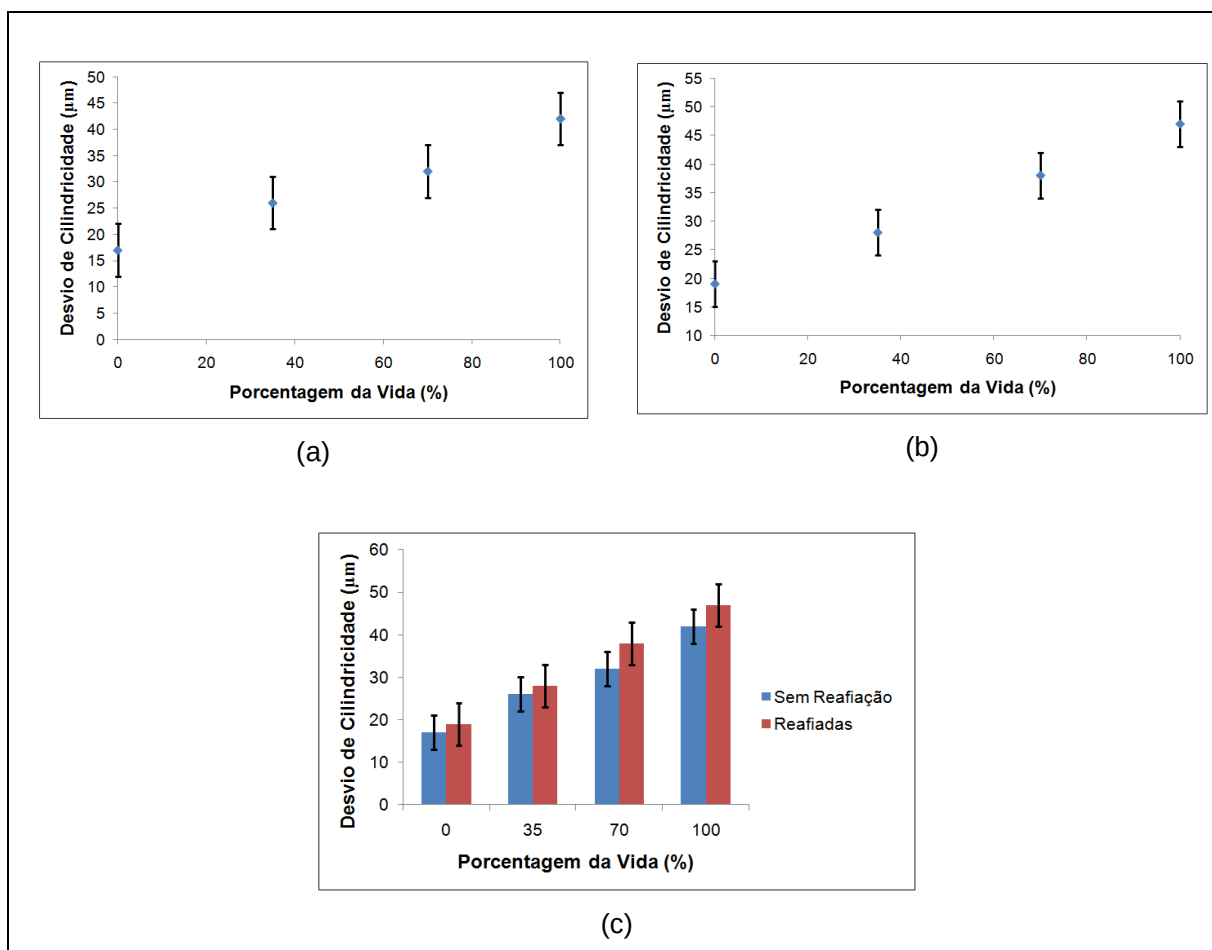


Figura 4.28 – Evolução do desvio de cilindridade ao longo da vida das brocas sem revestimento - a) Brocas novas; b) Brocas reafiadas (OSG); c) Comparação entre as brocas antes e após serem reafiadas.

Verifique que as brocas reafiadas também apresentaram maiores valores de desvio cilíndricidade em relação às brocas novas (em média 12,53 %, números calculados considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70 % e 100 % de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 11,73 %). A Tabela 4.17 mostra o aumento percentual médio do desvio de cilíndricidade ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (novas).

Tabela 4.17 - Aumento percentual médio do desvio de cilíndricidade ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (brocas novas) – Brocas sem revestimento.

Brocas	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio do desvio de cilíndricidade (%)
Reafiação OSG	0	11,76
	35	7,69
	70	18,75
	100	11,91

4.3.4 – Comparação Entre os Revestimentos

A Figura 4.29 mostra a comparação do desvio de circularidade e desvio de cilíndricidade ao longo da vida das brocas quando a variável em análise é o revestimento. Os resultados correspondem às brocas novas em sua primeira utilização.

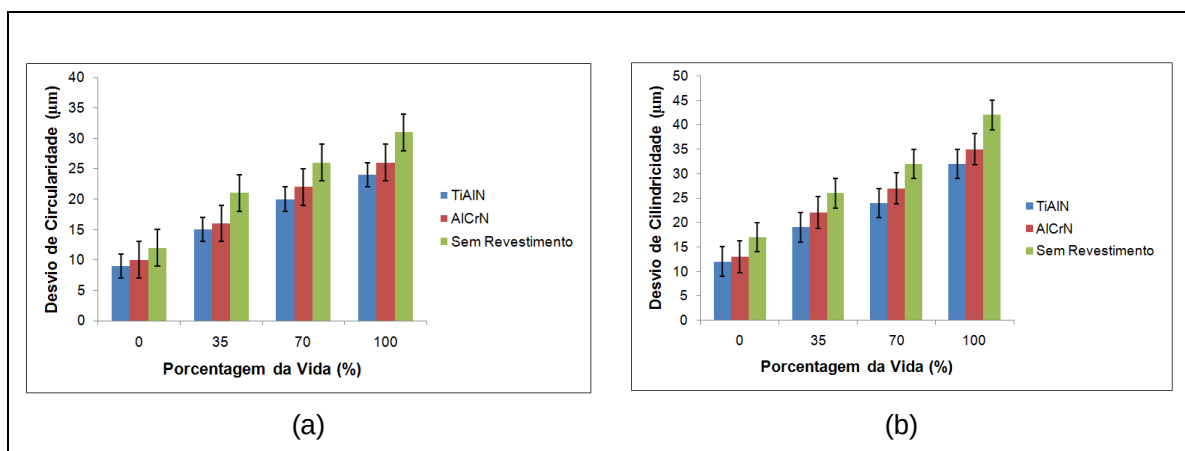


Figura 4.29 – Comparação entre os revestimentos para as brocas novas. - a) Desvio de circularidade; b) Desvio de cilíndricidade.

As Tabelas 4.18 e 4.19 mostram, respectivamente, o aumento percentual médio do desvio de circularidade e desvio de cilindridade ao longo da vida. Teixeira (1995) verificou, em seu trabalho, que altas velocidades de corte podem causar assimetria ou excentricidade nas arestas principais e transversal, favorecendo, assim, a presença de desvios geométricos.

Tabela 4.18 - Aumento percentual médio do desvio de circularidade ao longo da vida em relação às brocas novas revestidas com TiAlN.

Tipo de Revestimento	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio do desvio de circularidade (%)
AlCrN	0	11,11
	35	6,67
	70	10,00
	100	8,33
Sem Revestimento	0	33,33
	35	40,00
	70	30,00
	100	29,17

Tabela 4.19 - Aumento percentual médio do desvio de cilindridade ao longo da vida em relação às brocas novas revestidas com TiAlN.

Tipo de Revestimento	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio do desvio de cilindridade (%)
AlCrN	0	8,33
	35	15,79
	70	12,50
	100	9,37
Sem Revestimento	0	41,67
	35	36,84
	70	33,33
	100	31,25

4.3.5 – Comparação de 2 Tratamentos

As Tabelas 4.20 e 4.21 mostram, respectivamente, a comparação entre as brocas que não foram reafiadas (brocas novas) com as brocas reafiadas para o desvio de circularidade e desvio de cilindridade, utilizando a metodologia estatística de comparação de 2 tratamentos, com confiabilidade de 95%.

Tabela 4.20 – Comparações de 2 tratamentos para o desvio de circularidade.

Tipo de revestimento	Comparação	p-value
Sem revestimento	Sem reafiação e reafiadas	0,0694
AlCrN	Sem reafiação e reafiadas	0,0588
TiAlN	Sem reafiação e reafiadas na FPT	<u>0,0056</u>
	Sem reafiação e apenas reafiadas na OSG	<u>0,0057</u>
	Sem reafiação e reafiadas + recobertas (OSG)	<u>0,0132</u>
	Sem reafiação e decapagem + reafiadas + recobertas (OSG)	<u>0,0326</u>

Tabela 4.21 – Comparações de 2 tratamentos para o desvio de cilindridade.

Tipo de revestimento	Comparação	p-value
Sem revestimento	Sem reafiação e reafiadas	0,2308
AlCrN	Sem reafiação e reafiadas	0,2399
TiAlN	Sem reafiação e reafiadas na FPT	<u>0,0049</u>
	Sem reafiação e apenas reafiadas na OSG	<u>0,0044</u>
	Sem reafiação e reafiadas + recobertas (OSG)	<u>0,0132</u>
	Sem reafiação e decapagem + reafiadas + recobertas (OSG)	<u>0,0456</u>

4.4 – Rugosidades dos Furos Usinados

4.4.1 – Ferramentas com Revestimento TiAlN

As Figuras 4.30 e 4.31 mostram, respectivamente, os resultados e as comparações das rugosidades R_a , R_z e R_t ao longo da vida das brocas sem reafiação, ou seja, brocas novas.

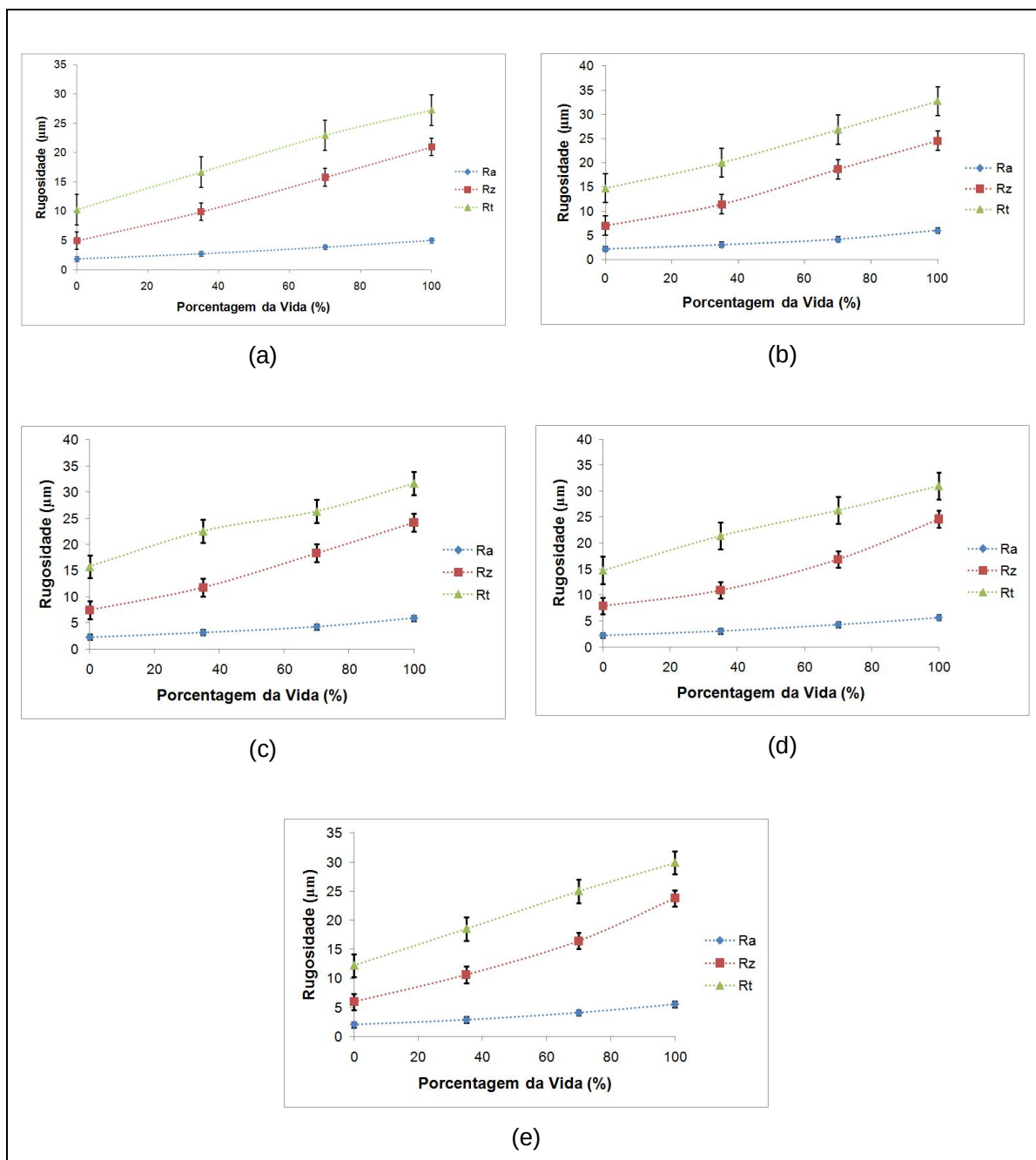
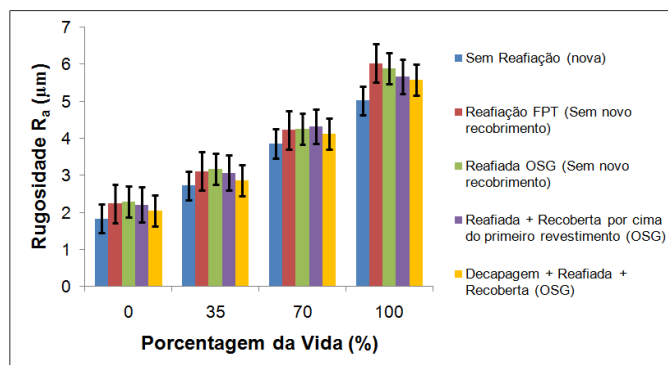
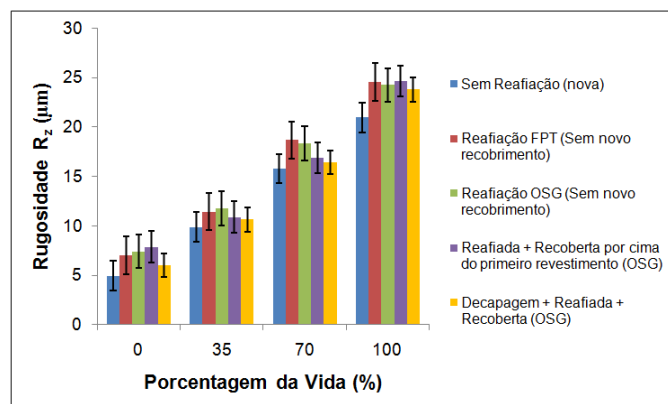


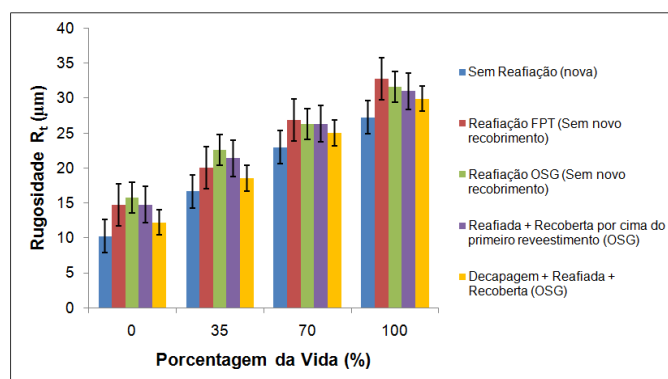
Figura 4.30 – Evolução da rugosidade R_a , R_z e R_t ao longo da vida das brocas revestidas com TiAlN – a) Sem reafiação (brocas novas); b) Reafiação FPT, sem novo revestimento; c) Apenas reafiada (OSG), sem novo revestimento; d) Reafiada + recoberta por cima do primeiro revestimento (OSG); e) Brocas que passaram pelo processo de decapagem + reafiação + recobrimento (OSG).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.31 – Comparações das rugosidades ao longo da vida das brocas revestidas com TiAlN – a) Rugosidade R_a ; b) Rugosidade R_z ; c) Rugosidade R_t .

Observe da Figura 4.30, que as brocas novas e reafiadas seguiram a mesma tendência, ou seja, os valores das rugosidades se elevaram ao longo da vida da ferramenta. Da Figura 4.31, pode-se notar que as brocas que passaram apenas pelo processo de reafiação (não

foram recobertas após a reafiação) obtiveram menor rendimento ao longo da vida da ferramenta. Entretanto, as brocas que passaram pelo processo de decapagem (retirada do revestimento) + reafiação + recobertas (inserção de um novo revestimento TiAlN) também foram as que obtiveram valores mais próximos das ferramentas novas com o mesmo revestimento em relação a rugosidade superficial R_a , R_z e R_t (em média 8,67 %, 33,15 % e 12,31 %, respectivamente, números calculados considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0%, 35%, 70% e 100% de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 6,73 %, 18,25 e 9,64 %, respectivamente).

As Tabelas 4.22, 4.23 e 4.24 mostram, respectivamente, o aumento percentual médio das rugosidades R_a , R_z e R_t ao longo da vida em relação às brocas que passaram pelo processo de reafiação, ou seja, brocas novas em sua primeira utilização. Note que os valores médios de rugosidade obtidos com as brocas reafiadas foram sempre superiores às brocas novas.

Tabela 4.22 - Aumento percentual médio do desvio da rugosidade R_a ao longo da vida em relação às brocas novas revestidas com TiAlN.

Brocas	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio da rugosidade R_a (%)
Reafiação FPT	0	22,40
	35	14,34
	70	9,58
	100	20,12
Reafiação OSG	0	24,59
	35	16,54
	70	10,36
	100	17,13
Reafiada + Recoberta por cima do primeiro revestimento (OSG)	0	20,76
	35	12,87
	70	11,92
	100	12,95
Decapagem + Reafiada + Recoberta (OSG)	0	11,47
	35	5,51
	70	6,73
	100	10,96

Tabela 4.23 - Aumento percentual médio do desvio da rugosidade R_z para as brocas novas.

Brocas	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio da rugosidade R_z (%)
Reafiação FPT	0	41,41
	35	15,57
	70	18,31
	100	17,28
Reafiação OSG	0	49,49
	35	18,91
	70	16,16
	100	15,65
Reafiada + Recoberta por cima do primeiro revestimento (OSG)	0	58,98
	35	10,11
	70	7,03
	100	17,47
Decapagem + Reafiada + Recoberta (OSG)	0	21,21
	35	7,48
	70	4,18
	100	13,51

Tabela 4.24 - Aumento percentual médio do desvio da rugosidade R_t ao longo da vida em relação às brocas novas revestidas com TiAlN.

Brocas	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio da rugosidade R_t (%)
Reafiação FPT	0	44,14
	35	20,42
	70	17,03
	100	20,14
Reafiação OSG	0	53,91
	35	35,37
	70	14,63
	100	16,07
Reafiada + Recoberta por cima do primeiro revestimento (OSG)	0	44,14
	35	28,65
	70	14,72
	100	13,79
Decapagem + Reafiada + Recoberta (OSG)	0	19,34
	35	11,29
	70	8,93
	100	9,65

4.4.2 – Ferramentas com Revestimento AlCrN

A Figura 4.32 mostra, respectivamente, os resultados e comparações das rugosidades R_a , R_z e R_t ao longo da vida das brocas novas.

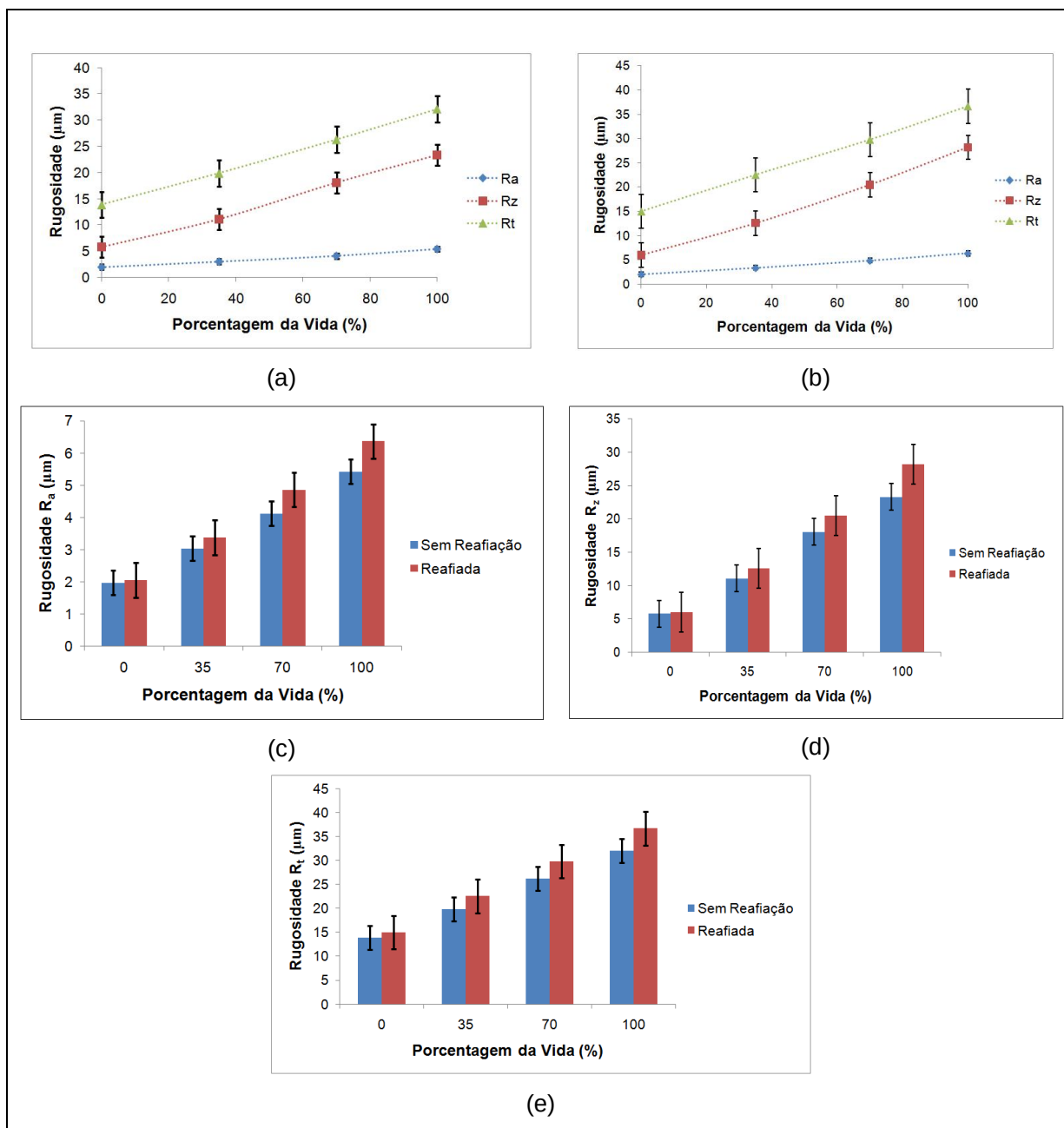


Figura 4.32 – Evolução da rugosidade R_a , R_z e R_t ao longo da vida das brocas revestidas com AlCrN – a) Brocas novas; b) Brocas reafiadas; c) Comparação da rugosidade R_a ; d) Comparação da rugosidade R_z ; e) Comparação da rugosidade R_t .

Note que as brocas reafiadas tiveram maiores valores de rugosidade superficial R_a , R_z e R_t (em média 12,65 %, 13,03 % e 12,36 %, respectivamente, números calculados considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0%, 35%, 70% e 100% de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 11,22 %, 11,21 e 8,14 %, respectivamente).

As Tabelas 4.25, 4.26 e 4.27 mostram, respectivamente, o aumento percentual médio das rugosidades R_a , R_z e R_t ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (novas), respectivamente.

Tabela 4.25 - Aumento percentual médio do desvio da rugosidade R_a ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (novas) – Brocas com revestimento AlCrN.

Brocas	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio da rugosidade R_a (%)
Reafiação OSG	0	4,07
	35	11,22
	70	17,96
	100	17,34

Tabela 4.26 - Aumento percentual médio do desvio da rugosidade R_z ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (novas) – Brocas com revestimento AlCrN.

Brocas	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio da rugosidade R_z (%)
Reafiação OSG	0	3,98
	35	13,45
	70	13,52
	100	21,18

Tabela 4.27 - Aumento percentual médio do desvio da rugosidade R_t ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (novas) – Brocas com revestimento AlCrN.

Brocas	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio da rugosidade R_t (%)
Reafiação OSG	0	8,15
	35	13,49
	70	13,40
	100	14,41

4.4.3 – Ferramentas Sem revestimento

A Figura 4.33 mostra os resultados de rugosidades R_a , R_z e R_t ao longo da vida das brocas que não foram submetidas ao processo de reafiação, ou seja, brocas novas.

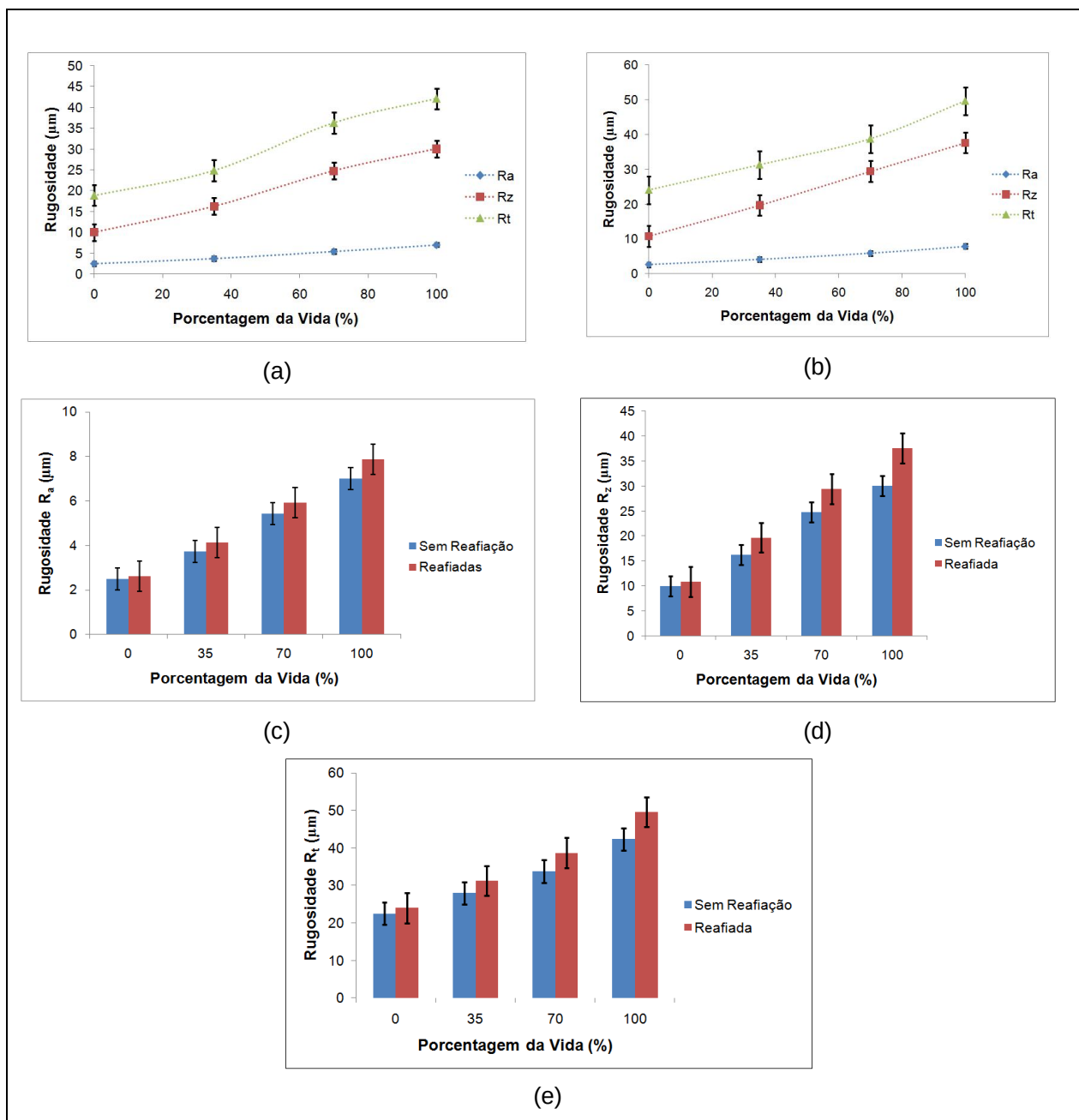


Figura 4.33 – Evolução da rugosidade R_a , R_z e R_t ao longo da vida das brocas sem revestimento – a) Brocas novas; b) Brocas reafiadas; c) Comparação da rugosidade R_a ; d) Comparação da rugosidade R_z ; e) Comparação da rugosidade R_t .

Verifique que as brocas reafiadas também apresentaram maiores valores de rugosidade superficial R_a , R_z e R_t (em média 9,37 %, 18,35 % e 12,45 %, respectivamente, números calculados considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0%, 35%, 70% e 100% de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 5,21 %, 11,13 e 8,03 %, respectivamente).

As Tabelas 4.28, 4.29 e 2.30 mostram, respectivamente, o aumento percentual médio das rugosidades R_a , R_z e R_t ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (novas), respectivamente.

Tabela 4.28 - Aumento percentual médio da rugosidade R_a ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (novas) – Brocas sem revestimento.

Brocas	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio da rugosidade R_a (%)
Reafiação OSG	0	5,21
	35	10,72
	70	9,01
	100	12,57

Tabela 4.29 - Aumento percentual médio da rugosidade R_z ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (novas) – Brocas sem revestimento.

Brocas	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio da rugosidade R_z (%)
Reafiação OSG	0	8,00
	35	21,27
	70	18,88
	100	25,25

Tabela 4.30 - Aumento percentual médio da rugosidade R_t ao longo da vida em relação às brocas sem reafiação (novas) – Brocas sem revestimento.

Brocas	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio da rugosidade R_t (%)
Reafiação OSG	0	6,57
	35	11,62
	70	14,54
	100	17,08

4.4.4 – Comparação Entre os Revestimentos

A Figura 4.34 mostra a influencia do tipo de revestimento nas rugosidades R_a , R_z e R_t .

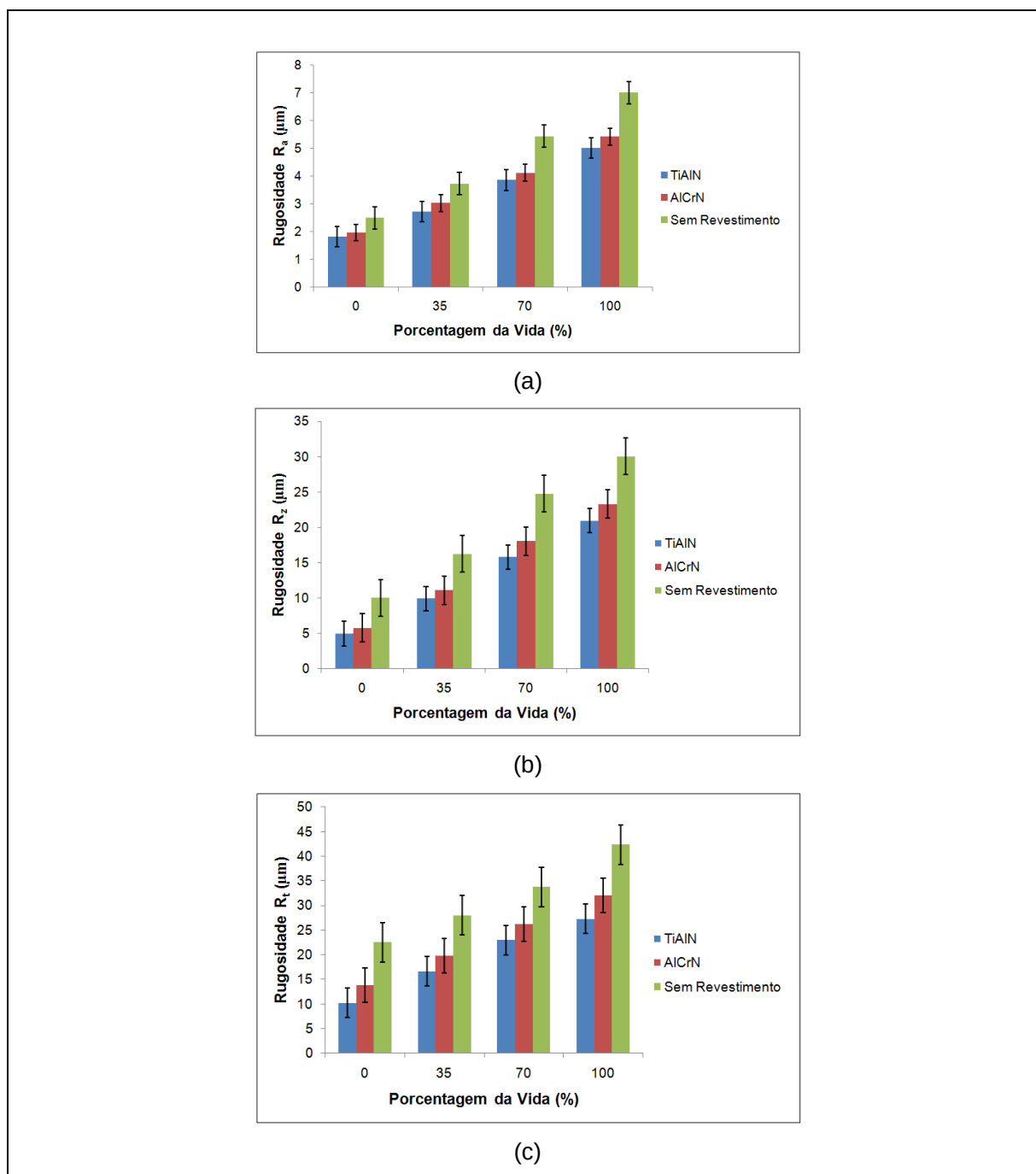


Figura 4.34 – Comparação da rugosidade para os revestimentos analisados - a) Rugosidade R_a ; b) Rugosidade R_z ; c) Rugosidade R_t .

Pode-se observar, da Figura 4.34, que todos os revestimentos analisados demonstraram a mesma tendência de crescimento da rugosidade ao longo da vida das ferramentas. Note, também, que não houve diferença significativa entre os revestimentos TiAlN e AlCrN. As brocas sem revestimentos foram as que apresentaram maiores valores de rugosidade.

As Tabelas 4.31, 4.32 e 4.33 mostram, respectivamente, o aumento percentual médio das rugosidades R_a , R_z e R_t ao longo da vida em relação às brocas com revestimento TiAlN sem reafiação, ou seja, novas.

Tabela 4.31 - Aumento percentual médio da rugosidade R_a ao longo da vida em relação às brocas com revestimento TiAlN sem reafiação (brocas novas).

Tipo de Revestimento	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio da rugosidade R_a (%)
AlCrN	0	7,65
	35	11,39
	70	6,73
	100	7,97
Sem Revestimento	0	36,61
	35	37,13
	70	40,93
	100	39,44

Tabela 4.32 - Aumento percentual médio da rugosidade R_z ao longo da vida em relação às brocas com revestimento TiAlN sem reafiação (brocas novas).

Tipo de Revestimento	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio da rugosidade R_z (%)
AlCrN	0	16,56
	35	12,03
	70	14,32
	100	11,12
Sem Revestimento	0	102,02
	35	64,00
	70	56,72
	100	43,29

Tabela 4.33 - Aumento percentual médio da rugosidade R_t ao longo da vida em relação às brocas com revestimento TiAlN sem reafiação (brocas novas).

Tipo de Revestimento	Porcentagem da Vida (%)	Aumento médio da rugosidade R_t (%)
AlCrN	0	35,45
	35	19,28
	70	14,37
	100	17,57
Sem Revestimento	0	119,92
	35	68,00
	70	47,04
	100	55,28

4.4.5 – Comparação de 2 Tratamentos

A Tabela 4.34 mostra a comparação entre as brocas que não foram reafiadas com as brocas reafiadas utilizando a metodologia estatística de comparação de 2 tratamentos, com confiabilidade de 95%. As comparações foram realizadas apenas com os valores de fim de vida das ferramentas (100 % da vida). Os valores de p-value < 0,05 mostram que os resultados obtidos diferem estatisticamente.

Tabela 4.34 – Comparações de 2 tratamentos para a rugosidade R_a .

Tipo de revestimento	Comparações	p-value
Sem revestimento	Sem reafiação e reafiadas	0,1503
AlCrN	Sem reafiação e reafiadas	0.0664
TiAlN	Sem reafiação e reafiadas na FPT	<u>0,0464</u>
	Sem reafiação e apenas reafiadas na OSG	0,0503
	Sem reafiação e reafiadas + recobertas (OSG)	0,1255
	Sem reafiação e decapagem + reafiadas + recobertas (OSG)	0,1596

Note que houve diferença significativa apenas nas brocas revestidas com TiAlN quando se comparou as brocas sem reafiação com as brocas reafiadas na FPT.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 - Conclusões

O elevado número de experimentos realizados neste trabalho produziu um grande número de resultados. Estes resultados foram apresentados, discutidos, e ao final de cada etapa foram feitas conclusões parciais. Este capítulo sintetiza as principais conclusões obtidas para cada parâmetro estudado, a seguir.

a) Desgaste

Considerando a uniformidade da geometria das brocas, seu material e por pertencerem aos mesmos lotes de fabricação, pode-se concluir que as brocas sem revestimento não é indicado para as operações de furação das coroas cilíndricas de aço DIN 19MnCr5G, pois mesmo usinando uma quantidade menor de furos, essas brocas apresentaram maiores níveis de desgaste em relação às ferramentas revestidas (TiAlN e AlCrN) (43,75% e 34,15%, respectivamente).

As ferramentas reafiadas apresentaram maiores taxas de desgaste (em média 33,85%, considerando todas as brocas testadas) em relação as ferramentas que não foram submetidas ao processo de reafiação.

Dentre as brocas revestidas com TiAlN, apenas as ferramentas que passaram pelo processo de decapagem (retirada do revestimento) + reafiação + recobertas (inserção de um novo revestimento TiAlN) foram as que obtiveram valores mais próximos das ferramentas novas (em média 11,74 %, número calculado considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70 % e 100 % de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 5,38 %).

Para as brocas revestidas com AlCrN, as ferramentas reafiadas tiveram maiores taxa de desgaste em relação às brocas novas (em média 45,15 %, número calculado considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70 % e 100 % de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 22,91 %).

Para as brocas sem revestimento, as ferramentas reafiadas também apresentaram maiores taxas de desgaste em relação às brocas novas (em média 43,75 %, número calculado considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70

% e 100 % de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de 39,28 %).

Através da análise estatística, verificou-se que não houve diferença significativa apenas para as brocas revestidas com TiAlN, quando se comparou o desgaste das ferramentas novas com as ferramentas que passaram pelo processo de decapagem, reafiação e recobrimento.

b) Esforços de Usinagem

O aumento do desgaste ao longo da vida das brocas influenciaram diretamente os valores de força de avanço e de torque para todas as brocas analisadas.

As ferramentas reafiadas apresentaram um acréscimo significativo nos valores de força de avanço e de torque quando comparados com as ferramentas que não foram submetidas ao processo de reafiação (em média 29,13 % e 32,04 %, respectivamente).

As brocas revestidas com TiAlN e que passaram pelo processo de decapagem (retirada do revestimento) + reafiação + recobertas (inserção de um novo revestimento TiAlN) foram as que obtiveram valores mais próximos das ferramentas novas com o mesmo revestimento em relação a força de avanço e torque (em média 24,56 % e 8,68 %, respectivamente, números calculados considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70 % e 100 % de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 15,99 % e 6,33 %, respectivamente).

Para as brocas revestidas com AlCrN, as ferramentas reafiadas tiveram maiores valores de força de avanço e torque em relação às brocas novas (em média 31,42 % e 40,64 %, respectivamente, números calculados considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70 % e 100 % de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 17,43 % e 14,04 %, respectivamente).

Para as brocas sem revestimento, as ferramentas reafiadas também apresentaram maiores valores de força de avanço e torque em relação às brocas novas (em média 20,08 % e 46,80 %, respectivamente, números calculados considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70 % e 100 % de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 8,08 % e 21,27 %, respectivamente).

As brocas sem revestimentos apresentaram maiores valores de força de avanço e torque em relação às brocas revestidas com TiAlN (em média 113,65 % e 101,34 %, respectivamente) e AlCrN (em média 81,69 % e 75,37 %, respectivamente).

Através da análise estatística, verificou-se que houve diferença significativa em todas as brocas novas quando se comparou com o desempenho das brocas reafiadas.

c) Qualidade dos Furos Usinados

As ferramentas sem revestimentos, mesmo usinando uma quantidade menor de furos, geraram maiores valores de desvios de circularidade e cilindridade em relação às ferramentas revestidas com TiAlN (em média 33,12 % e 35,77 %, respectivamente) e AlCrN (em média 22,17 % e 21,86 %, respectivamente).

Não houve diferença estatística significativa nos valores dos desvios geométricos para as brocas sem revestimento e revestidas com AlCrN quando se comparou o desempenho das ferramentas antes e após a reafiação.

As ferramentas com revestimento TiAlN que foram reafiadas apresentaram um acréscimo 21,68 % no valor do desvio de circularidade e 36,54 % no valor do desvio cilindridade quando comparados com as ferramentas que não foram submetidas ao processo de reafiação, ou seja, brocas novas.

As brocas revestidas com TiAlN e que passaram pelo processo de decapagem (retirada do revestimento) + reafiação + recobertas (inserção de um novo revestimento TiAlN) foram as que obtiveram valores mais próximos das ferramentas novas com o mesmo revestimento em relação aos valores de desvio de circularidade e desvio cilindridade (em média 12,35 % e 18,81 %, respectivamente, números calculados considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70 % e 100 % de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 11,33 % e 12,51 %, respectivamente).

Para as brocas revestidas com AlCrN, as ferramentas reafiadas tiveram maiores valores de desvio de circularidade e desvio cilindridade em relação às brocas novas (em média 20,40 % e 10,54 %, respectivamente, números calculados considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70 % e 100 % de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 13,63 % e 7,69 %, respectivamente).

Para as brocas sem revestimento, as ferramentas reafiadas também apresentaram maiores valores de desvio de circularidade e desvio cilindridade em relação às brocas novas (em média 17,07 % e 12,53 %, respectivamente, números calculados considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70 % e 100 % de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 14,28 % e 11,73 %, respectivamente).

d) Rugosidade dos Furos Usinados

As ferramentas reafiadas apresentaram um acréscimo nos valores de rugosidade superficial R_a , R_z e R_t quando comparados com as ferramentas novas (em média 20,18 %, 25,64 % e 21,93 %, respectivamente).

As brocas sem revestimentos apresentaram maiores valores de rugosidade superficial R_a , R_z e R_t em relação às brocas revestidas com TiAlN (em média 38,53 %, 66,51% e 72,57 %, respectivamente) e AlCrN (em média 27,79 %, 46,43 % e 40,97 %, respectivamente).

As brocas revestidas com TiAlN e que passaram pelo processo de decapagem (retirada do revestimento) + reafiação + recobertas (inserção de um novo revestimento TiAlN) também foram as que obtiveram valores mais próximos das ferramentas novas com o mesmo revestimento em relação a rugosidade superficial R_a , R_z e R_t (em média 8,67 %, 33,15 % e 12,31 %, respectivamente, números calculados considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70 % e 100 % de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 6,73 %, 18,25 e 9,64 %, respectivamente).

Para as brocas revestidas com AlCrN, as ferramentas reafiadas tiveram maiores valores de rugosidade superficial R_a , R_z e R_t (em média 12,65 %, 13,03 % e 12,36 %, respectivamente, números calculados considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70 % e 100 % de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 11,22 %, 11,21 e 8,14 %, respectivamente).

Para as brocas sem revestimento, as ferramentas reafiadas também apresentaram maiores valores de rugosidade superficial R_a , R_z e R_t (em média 9,37 %, 18,35 % e 12,45 %, respectivamente, números calculados considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70 % e 100 % de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 5,21 %, 11,13 e 8,03 %, respectivamente).

Apenas as brocas com revestimento TiAlN e que foram submetidas ao processo de reafiação na FPT apresentaram diferenças significativas nos valores da rugosidade R_a quando comparado com o desempenho das brocas revestidas com TiAlN e que não foram reafiadas.

5.2 - Sugestões para trabalhos futuros

Com o propósito de dar continuidade a esta mesma linha de pesquisa, sugerem-se os seguintes temas:

1. Estudar a viabilidade econômica da reafiação, relacionando os custos de produção para um lote de peças a ser determinado de acordo com uma necessidade de fabricação.
2. Avaliar os efeitos do fluido lubri-refrigerante sobre as grandezas de saída do processo, sobre o qual poderiam ser investigadas outras condições de pressão, vazão ou concentração do fluido.
3. Efetuar o estudo em outros materiais de peça, como outros aços, ferro fundidos, ligas não ferrosas, etc.
4. Verificar a aplicação de outros tipos de brocas (material, revestimento, geometria) para o material testado;
5. Verificar o comportamento de ferramentas reafiadas em outras operações de usinagem (torneamento, fresamento, mandrilamento).
6. Fazer uma análise minuciosa através de caracterização do revestimento para estudar o comportamento ao longo do recobrimento.
7. Comparar o estado da superfície que passou pelo processo de decapagem com ferramentas novas.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 6162, 1989, “Movimentos e relações geométricas na usinagem dos metais - Terminologia”.

ABNT NBR 6163, 1980, “Conceitos da técnica de usinagem - Geometria da cunha cortante – Terminologia”.

ABNT NBR 4282, 2002, “Rugosidade das superfícies”, Rio de Janeiro, RJ.

ABNT NBR 6409, 1976, “Tolerâncias de forma e tolerâncias de posição”, Rio de Janeiro, RJ.

AGOSTINHO , O. L., 1995, “Princípios de engenharia de fabricação mecânica: Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de dimensões”, São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda, 6a reimpressão.

ALMEIDA, D. O., 2008, “Investigação de desvios geométricos no alargamento de ferro fundido com ferramentas revestidas”. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, 117 p.

ALMEIDA, C. H. D., ABRAÃO, A. M., 2007, “Dimensional and geometric tolerances after machining case hardened AISI 1551 steel”, Journal Engineering Manufacture, vol. 217.

AMORIM, H., 2003, “Apostila de processos de fabricação por usinagem – Furação – 1ª Parte”, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 15 p.

ANDERSON, D. R., SWEENEY, D. J., WILLIAMS, T. A., 2008, “Estatística aplicada à administração e economia”, vol. 2, 219 p.

AUDY, J., 2008, “A study of computer-assisted analysis of effects of drill geometry and surface coating on force and power in drilling”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 204, p 130 - 138.

BAGCI, E., OZCELIK, B., 2004, "Investigation of the effect of drilling conditions on the twist drill temperature during step-by-step and continuous dry drilling", International Journal of Machine Tools & Manufacture.

BALZERS, 2006, "Catálogo de produtos G6 generation", Jundiaí – SP.

BAKKAL, M., SHINH, A. J., MCSPADDEN, S. B., SCATTERGOOD, R. O., 2005, "Thrust force, torque and tool wear in drilling the bulk metallic glass", International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 45, p 863-872.

BARROZO, M. A., 2007, "Planejamentos de experimentos", Apostila EQ127, Uberlândia, MG, PPG, Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 260 p.

BESTE, U., JACOBSON, S., 2008, "A new view of the deterioration and wear of WC/Co cemented carbide rock drill buttons", Wear, vol. 264, p 1129-1141.

BEZERRA, A. A., 1998, "Influência dos principais parâmetros no processo de alargamento de uma liga de alumínio-silício", Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, 139 p.

BOEIRA, A. M. G., 2010, "Modelagem e simulação das forças na furação com brocas helicoidais a partir de dados obtidos no torneamento de segmentos cilíndricos". Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 193 p.

BOEHS, L., SCHUITEK, A J., LEPKSON, M., 1992, "Estudo comparativo do desempenho de brocas com diversos tipos de revestimentos e várias geometrias na usinagem do aço SAE 4340 e do ferro fundido FE-450-12"., Florianópolis: LMP, p 58.

BONIFÁCIO, M. E. R., DINIZ, A. E., 1994, "Monitoring the tool life in finish turning using vibration signals", Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, vol. 16.

BORK, C. S., 1995., "Otimização de variáveis de processo para a furação do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541"., Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 127 p.

BRINKSMEIER E., 1990, "Prediction of tool fracture in drilling". Annals of the CIRP, vol. 39, p 97-100.

BUNSHAH R. F., 2001, "Handbook of hard coatings: depositions technologies, properties and applications". New Jersey: Noyes Publications, p 550.

BUTTON, S. T., 2010, "Metodologia para planejamentos experimental e análises de resultados", Universidade Estadual de Campinas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 88 p.

CAMPOS, L. A., 2004, "Otimização do processo de torneamento de peças endurecidas por meio da definição do intervalo de máxima eficiência da velocidade de corte". Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, PUC-MG, Belo Horizonte, MG, 115 p.

CASTILLO, W. J. G., 2005, "Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal-duro com canais", Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, 134 p.

CASTRO, P., 2001., "Aspectos tecnológicos da usinagem a seco com mínima quantidade de fluido de corte na furação com broca helicoidal". Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 180 p.

CHEN Y. C., LIAO Y. S., 2003, "Study on wear mechanisms in drilling of inconel 718 superalloy", Journal of Materials Processing Technology, vol. 140, p. 271-273.

CHUNG, S. C., 2005, "Temperature estimation in drilling processes by using an observer", Journal of Manufacturing Science and Engineering.

COLDWELL, H. L., 2004, "The use of soft/lubricating coatings when dry drilling BS L168 aluminium alloy". Elsevier, Surface and coatings technology, vol. 177-178, 716-726 p.

COSTA, E. S., 2004, "Furação de aços microligados com aplicação de mínima quantidade de fluido de corte – (MQF)". Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 311 p.

CSELLE T., 1998, "Carbide drills: ate the peak of development. Ratio drills and their applications", 3ª ed. Albstadt, Guhring., p 169.

DINIZ, A. E., 2000, Tecnologia da usinagem dos materiais. São Paulo, Art. Líber Editora, p 256.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N.L., 2006, "Tecnologia da usinagem dos materiais", Editora Artber.

DONALD M., 1998, "Handbook of physical vapor deposition processing (PVD)". New Jersey: Noyes Publications, p 790.

DORÉ, C., 2007, "Influência da variação da nodularidade na usinabilidade do ferro fundido vermicular". Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 132 p.

DORMER FERRAMENTAS., 2004, "Catálogo técnico".

DRAKE, P. J., 1999, "Dimensioning and tolerance handbook". New York: McGraw-Hill.

DROZDA, T. J., WICK, C., 1993, "Cutting fluids and industrial lubricants", Tool and Manufacturing Engineers Handbook, vol. 1, 4ª ed., p 4.1-4.60.

EDWARDS, R., 1993, "Cutting tools", The Institute of Materials, London, The Iniversty Press, Cambridge, p 200.

FERRARESI, D., 1977, "Fundamentos da usinagem dos metais"., São Paulo: Edgard Blücher, p 751.

FRANCO, P. G. R., 1999, "Procedimentos e critérios tradicionais de avaliação do desempenho de brocas helicoidais", Laboratório de Mecânica de Precisão da UFSC, p 151.

GODOY, J. M., 1998, "Furação profunda no alumínio de aviação com brocas normais". Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 86 p.

GOPAL, S. U., 1998, "Cemented tungsten carbides production, properties and testing", Kanpur, Índia: Noyes Publications, p 436.

GÜHRING, 1997, "Die ratiobohrer und ihre praxisgerechte anwendung". Catálogo do fabricante. Albstadt, Alemanha, p 156.

HAAN, D., 1997, "An experimental study of cutting fluid effects in drilling", Elsevier Journal of materials processing technology, vol. 71.

HAMADE, R. F. SEIF, C. Y., ISMAIL, F., 2006, "Extracting cutting force coefficients from drilling experiments", International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 46, p 387-396.

HARBER, R. H., HARBER, R., SCHMITTDIEL, M., DEL TORO, M. S., 2007, "A classic solution for the control of a high-performance drilling", International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 47, p 46-49

HARRIS, S. G., DOYLE, E. D., VLASVELD, A. C., AUDT, J., QUICK, D., 2003, "A study of the mechanisms of $Ti_{1-x}Al_xN$ and $Ti_{1-x-y}Al_xCr_yN$ coated high-speed steel drills under dry machining conditions", Wear, vol. 254, p 723-734.

HEINEMANN, R., HINDUJA, S., BARROW, G., PETUELLI, G., 2006, "Effect of MQL on the life of small twist drills in deep-hole drilling", International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 46, p 1-6.

HOCHENG, H., TSAO, C. C., 2007, "Parametric study on thrust force of core drill", International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 192, p. 37-40.

HORNE, J. G., WRIGHT, P. K., TABOR, D., 1979, "Boundary conditions at the chip-tool, interface in machining: comparisons between seizure and sliding friction", Wear, vol. 54, pp. 371-390.

HUNT, J. L., SANTHANAM, A. T., 1990, "Coated carbide metal cutting tools: development and applications", The Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers, vol. 25-30, p139-155.

HUANG, C. K., TARNG, Y. S., CHIU, C. Y., HUANG, A. P., 2009, "Investigation of machine vision assisted automatic resharpener process of micro-drills", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, p 5944-5954.

ISO 513, 2004, "Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges".

ISO 3685, 1993, "Tool life with single point turning tools".

ISO 4288, 2008, "Especificação geométrica do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade".

JAHAN, M. P., WONG, Y. S., RAHMAN, M., 2009, "A study on the quality micro-hole machining of tungsten carbide by micro-EDM process using transistor and RC-type pulse generator", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, p 1306-1716.

JAREO, J. E.; BRADBURY, J., 1999, "Tool coating for dry machining conditions". *Modern Machine Shop*, p. 212-216.

JOHNSON, W. S., RALPH, W. C., MAKEEV, A., NEWMAN, J. C., 2007, "Fatigue performance of production-quality aircraft fastener holes", *International Journal of Fatigue*, vol. 29, p 1319-1327.

KARABAY, S., 2007, "Performance testing of a constructed drilling dynamometer by deriving empirical equations for drill torque and thrust on SAE 1020 steel", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 28, p 1780-1793.

KAIPAKJIAN, S., CHANG, J. E., KO, S. L., 2007, "Development of drill geometry for burr minimization in drilling", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 202, p 28-35.

KAMMERMEIER, D., BORSCHERT, B, KAUPER, H. e SCHENEIDER, M., 2000, "Furação sem refrigeração: somente razões ecológicas.", Disponível em: www.usinagem-brasil.com.br/index.htm, acessado em 24/04/2010.

KAPOOR, S. G., KALIDAS, S., DEVOR, R. E., 2001, "Experimental investigation of the effect of drill coating on hole quality under dry and wet drilling conditions", Surface and Coating Technology, vol. 148, p. 117-128.

KENNEDY, B., 2009, "Survival of the fastest", Revista: Cutting Tool Engineering", p 42-43.

KHABEERY, M., 1990, "Some observations of surface integrity of deep drilling holes", Elsevier, Cairo Egito, vol. 142, p 331-349.

KLOCKE, F., 1996, "Trockenbearbeitung: grundlagen, grenzen, perspektiven", VDI Berichte n. 1240, Auf Dem Weg Zur Trocken-Bearbeitung, VDI Velag, Düsseldorf, Feb., p 1-40.

KÖNIG, W., 1990, "Fertigungsverfahren: drehen, fäsen und bohren", (Tradução: Prof. Dr. Ing Walter L. Weingaertner), Düsseldorf, vol 4, p 416.

KÖNIG, W., KLOCKE, F., 1997, "Fertigungsverfahren: drehen, fräsen, bohren", vol 5 Berlin: Springer, p 471.

KUDLA, L., 2001, "Influence of feed motion features on small holes drilling process". Journal of Materials Processing Technology, vol. 109, p. 236-241.

KUSTAS, F. M.; FEHREHNBACHER, L. L.; KOMANDURI, R., 1997, "Nanocoatings on cutting tools for dry machining", CIRP Annals, v. 46(1), p.39-42.

MACHADO, A. R., ABRÃO, A. M., COELHO, R. T., DA SILVA, M.B., 2009, "Teoria da usinagem dos materiais", Editora Edgar Blucher, São Paulo – SP, p 371.

MARTINS, P. S., MAIA, L. H. A., SALES, W. F., 2008, "Avaliação do sistema de fixação de brocas de metal duro integral na usinagem de ligas Al-Si-Cu em altas velocidades de corte", V Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – CONEM, Salvador – BA.

MARTINS, P. S., 2009, "Avaliação dos sistemas de fixação hidráulico e térmico de broca de metal duro em furação do cabeçote do motor fire" Dissertação de Mestrado, Pontíficia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC, Belo Horizonte - MG.

McCANN, D., 2010, "Should you outsource tool sharpening or do it in-house", Revista: "Cutting Tool Engineering", p 63-65.

METALS HANDBOOK, 1989, "Reaming machining". 9th, American Society for Metals, vol 16, p. 239-248.

MICHELETTI, G., F., 1980, "Mecanizado por arranque de viruta"., vol 1, Barcelona : Blume, vol 3, p.124-130.

MIRANDA, G. W. A., 2003, "Uma contribuição ao processo de furação sem fluido de corte com broca de metal duro revestida de TiAlN". Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 182 p.

MOHAN, N. S., RAMACHANDRA, A., KULKARNI, S. M., 2005, "Influence of process parameters on cutting force and torque during drilling of glass-fiber polyester reinforced composites", Composite Structures, vol. 71, p 407-413.

MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C., 2003, "Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros", vol. 3, 463 p.

MOTA, P. R., 2006, "Investigação do comportamento de ferramentas de aço-rápido no processo de rosqueamento interno em alta velocidade de corte" Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 142 p.

MUTHUKRISHNA S., SUJATHA C., 1995, "Twist drill deformation and optimum drill geometry. Computers & Structures", vol. 57, p. 903-914.

NAYEBI, A., MAUVOISIN, G., VAGHEFPOUR, H., 2008, "Modeling of twist drills wear by a temperature-dependent friction law", Journal of Material Processing Technology, vol. 207, p 98-106.

NETO, B. B., SCARMINIO, I. S., BRUNS, R. E., 1995, "Planejamentos e otimização de experimentos"., vol. 2, Editora da Unicamp, Campinas, SP, 229 p.

NIZAN, S. M., YILBAS, B. S., 2000, "Wear behavior of TiN coated AISI H11 and AISI M7 twist drills prior to plasma nitriding", Journal of Material Processing Technology, vol. 105, p 352-358.

NOVASKI, O., 1994, "Introdução à engenharia de fabricação mecânica", Editora Edgard Blucher, Cap.III, p. 69-85.

OSG, 2008, "Catálogos: Manuais de ferramentas".

OSTRONOFF, H., 2007, "Recondicionar ao invés de trocar", Revista "O mundo da Usinagem", São Paulo, p 6-11, nov.

PALMAI, Z., 1987, "Cutting temperature in intermittent cutting", International Journal of Machine Tools Manufacture, vol. 27(2), p 261-274.

PANGRÁCIO, M. L., 2003, "Análise da qualidade de furos realizados por fresamento helicoidal interpolado", Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Paraná - UFPR, 103 p.

PASTOR, H., 1987, "Present status and development of tool materials: Part 1: Cutting tools", International Journal of Refractory and Metals, vol. 6, nº 4, December, p 196-209.

PENG, Y., ZHANG, W., HE, F., XIONG, D., 2008, "Drill flank measurement and flank/flute intersection determination", vol. 18, p 666-678.

RALPH, W. C., JOHNSON, W. S., TOIVONEN, P., MAKEEV, A., NEWMAN, J. C., 2006, "Effect of various aircraft production drilling procedures on hole quality", International Journal of Fatigue, vol. 28, p 943-950.

RAWAT, S., ATTIA, H., 2009, "Wear mechanisms and tool life management of WC-Co drills during dry high speed drilling of woven carbon fibre composites", Wear, vol. 267, p 1022-1030.

REIS, M. A., 2004, "Avaliação do desempenho de diferentes materiais de ferramenta no processo de rosqueamento interno de ferro fundido cinzento através do monitoramento do desgaste", Tese de doutorado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia, UFU, 188 p.

RICHARDS, N., ASPINWALL, D., 1989, "Use of ceramic tools for machining nickel based alloys", Int. J. Mach. Tools Manufact, vol. 29(4), p 575-588.

RICHARDS, T., DETOURNAY, E., SHEPHERD, M., 2008, "Drilling response of drag bits: Theory and experiment", International Journal of Rock Mechanics e Mining Sciences, vol. 45, p 1347-1360.

ROBINSON, J. P., SNAPE, C. E., KINGMAN, S. W., SHANG, H., 2008, "Thermal desorption and pyrolysis of oil contaminated drill cutting by microwave heating", International Journal of Pyrolysis, vol. 81, p 27-32.

ROSA, L. C., 2005, "Acabamento de superfícies – Rugosidade superficial", OMA – Oficina Mecânica para Automação, Unesp, Sorocaba.

SANDVIK, 2003, "Catálogos: Manuais e boletins técnicos".

SANTOS, S. C., 1999, "Furação de ferro fundido cinzento com brocas de metal duro integral". Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, 108 p.

SANTOS, S. C., 2002, "Estudo da influência de revestimentos e da aplicação de fluidos de corte no desempenho de brocas de aço-rápido e de metal duro integral na usinagem de ferro fundido", Tese de doutorado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia, UFU, 199 p.

SCHROETER, R.B., 1999., "Estudo comparativo de desempenho de brocas DIN 338". Florianópolis, 32 p.

SCHROETER, R. B. WEINGAERTNER, W. L., 2001, "Processos de usinagem e ferramentas de corte: nível 1, parte 2", Laboratório de Mecânica de Precisão - UFSC.. 213 p.

SCHULZ, H.; EMRICH, K.; FINZER, T.; DÖRR, J., 2000., "Quais são e para que servem os revestimentos". Revista Máquinas e Metais. São Paulo. p. 30-37.

SCHULZ, H., MORIWAKI, T., 1993, "High speed machining", Annals of the CIRP, v. 41, p 637-643.

SILVA, H. A., 2010, "Influência do ciclo de furação na usinabilidade do ferro fundido cinzento GH 190"., Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, 189 p.

SMART, E. F., TRENT, E. M., 1975, "Temperature distribution in tools used to cutting iron, titanium and nickel", Int. J. Prod. Res., Vol. 13(3), p 265-290.

STEMMER, G. E., 1992, "Ferramentas de Corte II: Brocas, Alargadores, Ferramentas de Roscas, Fresas, Brochas, Rebolos e Abrasivos"., Florianópolis: Ed. da UFSC, 314 p.

STEMMER, C. E., 1995, "Ferramentas de corte I e ferramentas de corte II", Ed. da UFSC, 249 p e 314 p, respectivamente.

STEMMER, C. E., 2001., "Ferramentas de corte I"., 5ª Edição, Florianópolis: Editora da UFSC, 249 p.

STOETERAU, R. L. "Processos de usinagem". Disponível em: www.lmp.ufsc.br/disciplinas/emc5240/Aula-17-U-2007-1-furacao.pdf - acessado em 14 de setembro de 2009.

SUAREZ, M. P., 2008, "Fresamento de canais da liga de alumínio aeronáutico 7075-T7"., Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, 149 p.

SUH, N. P., 1976, "Coated carbides – Past, present and future", International Conference on Hard Materials Tool Technology, Carnegie-Melon University, Pittsburg, Pensilvânia.

TEIXEIRA, C., 1995., "Influencia dos erros geométricos de afiação nas brocas helicoidais de aço rápido na qualidade dos furos produzidos". Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 110 p.

TEIXEIRA, C. R., 2001, "Benefícios ecológicos da redução e eliminação de fluidos de corte nos processos de usinagem com ferramentas de geometria definida", Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica da UFSC, Florianópolis-SC, outubro, 153 p.

TÖNSHOFF, H. K., SPINTIG, W., 1994, "Machining of holes developments in drilling technology", CIRP Annals, vol. 43-2, p. 551-561.

TOOL AND MANUFACTURING ENGINEERS HANDBOOK, 1983, "Machining", Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, vol.1, p 10.1-10.76.

TRENT, E. M., 1984, "Metal cutting" vol. 2, Butterworths, ISBN 0-408-10856, 245 p.

TRENT, E. M., WRIGTH, P. K., 2000, "Metal cutting", vol. 4, Butterworths, England., 446 p.

VIANA, H., 2004, "Desempenho de brocas de HSS revestidas na furação de ligas de Al-Si", Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, 143 p.

WANG, Z. M., 1997, "Advances in precision machining of small deep holes". Journal of Materials and Processing Technology, vol. 68, p. 257-261.

WANG, J., ZHANG, Q., 2008, "A study of high-performance plane rake faced twist drills. Part 1: Geometrical analysis and experimental investigation", International Journal of Machine Tools e Manufacture, Vol. 48, p 1276-1286.

WERTHEIM, R., SIVAN, R. PORAT R., BER, A., 1982, "Characterization of CVD coated carbide layers and their thermal properties", Annals of the CIRP, vol. 31/1, p 3-11.

WEINGAERTNER, W. L., SCHROETER, R., TEIXEIRA, C. R., 1999, "Influências do tipo de fluido de corte no comportamento da temperatura nas brocas DIN 338", Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. Águas de Lindóia, 9 p.

WEINGAERTNER, W.L., SCHROEDER, R.B., 2002., "Tecnologia da usinagem com ferramentas de corte de geometria definida – Parte I". Tradução do livro "Fertigungsverfahren – Drehen, Bohren, Fräsen" de Wilfried König e Fritz Klocke, Florianópolis,

ZITOUNE, R., COLLOMBET, F., 2007, "Numerical prediction of the force responsible of delimitation during the drilling of the long-fibre composite structures", International Journal of Machine Tools e Manufacture, vol. 38, p 858-866.