



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE BROCAS
DE AÇO RÁPIDO AISI M2 REVESTIDAS COM SiO₂ PELO
PROCESSO SOL-GEL NA FURAÇÃO DO FERRO FUNDIDO
NODULAR**

NATÁLIA FERNANDA SANTOS PEREIRA

Belo Horizonte
2017

NATÁLIA FERNANDA SANTOS PEREIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE BROCAS
DE AÇO RÁPIDO AISI M2 REVESTIDAS COM SiO₂ PELO
PROCESSO SOL-GEL NA FURAÇÃO DO FERRO FUNDIDO
NODULAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Juan Carlos Campos Rubio

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Araújo Câmara

**Belo Horizonte
2017**

Dedico esta obra aos meus pais, Geraldino e Maria Dulce (*in memoriam*), e às minhas queridas irmãs, Naiara e Nara.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Minas Gerais, seu corpo docente e em especial ao meu orientador Prof. Dr. Juan Carlos Campos Rubio, pelos ensinamentos, confiança, incentivo e disponibilidade desde o início.

Ao coorientador Prof. Dr. Marcelo Araújo Câmara, pelos ensinamentos, paciência, disponibilidade e incentivo.

Ao Prof. Dr. Alexandre Mendes Abrão, pelos ensinamentos e pelas valiosas discussões técnicas.

Ao Prof. Dr. Manuel Houmard pelos ensinamentos, auxílio na realização do revestimento das brocas e contribuições na revisão bibliográfica.

Aos colegas mestrandos, doutorandos e amigos do laboratório de usinagem pelo apoio e valiosas ajudas na consecução desta obra.

Ao Instituto Politécnico da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais pela disponibilização do microscópio eletrônico de varredura na pessoa de Edilene Carvalho e aos técnicos do Laboratório da PUC Contagem-MG, Ernani Silva e Thaís Campos pelo auxílio na máquina de medição por coordenadas.

Ao Professor Klaus Silva, pelo auxílio na medição da dureza dos corpos de prova da furação e tribômetro.

A todos os meus colegas e amigos da empresa Saint-Gobain Canalização, pelo apoio inicial, fundamental para a concretização desta dissertação.

Aos meus familiares, em especial aos meus pais, pelo amor incondicional, ensinamentos e motivação ao estudo; às minhas irmãs Naiara e Nara, pelo apoio, conselhos e moradia durante minha estadia em Belo Horizonte.

A todos os meus amigos, pelo incentivo, em especial, ao Lucas Herculano, pela disponibilidade em fotografar as brocas e pinos desta dissertação.

Aos professores José Felipe e Marlon Pinheiro, pela amizade e incentivo, e à professora Tânia Nogueira, pelos conselhos e orações.

Aos órgãos de fomento Capes, CNPq e Fapemig, pelos recursos disponibilizados para a execução deste trabalho.

Ao meu Deus e senhor. A Ele, toda honra e glória.

"De resto, por mais que alguém fosse perfeito entre os filhos dos homens, sem a sabedoria que vem de ti, seria contado como nada. Junto de ti está a sabedoria que conhece tuas obras e que estava presente quando criavas o mundo. Ela sabe o que é agradável a teus olhos e o que é reto segundo teus mandamentos. Fá-la descer dos santos céus, do trono de tua glória digna-te enviá-lá para que se afadigue ao meu lado e eu conheça o que te agrada. E ela, que sabe e compreende tudo, guiar-me-á em minha conduta com medida e me protegerá por sua glória."

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE QUADROS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS DE COMPOSTOS QUÍMICOS	xiv
NOMENCLATURAS	xv
RESUMO	xvii
ABSTRACT	xviii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo geral	3
1.2 Objetivos específicos	3
1.3 Estrutura do trabalho	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Ferro fundido	4
2.1.1 Ferro fundido nodular	5
2.1.2 Usinabilidade do ferro fundido nodular	7
2.2 Operação de furação	10
2.3 Ferramentas empregadas no processo de furação.....	11
2.3.1 Características das brocas helicoidais	11
2.4 Parâmetros de usinagem	14
2.4.1 Velocidade de corte e velocidade de avanço	14
2.4.2 Largura de corte	15
2.4.3 Profundidade de usinagem	15
2.4.4 Espessura de corte.....	16
2.5 Materiais para ferramentas de corte.....	16
2.5.1 Aço rápido.....	18
2.5.2 Revestimentos para ferramentas de corte	21
2.5.3 Processos para cobertura de ferramentas	22
2.5.4 Revestimento com nitreto de titânio	23
2.5.5 Revestimentos pelo método sol-gel	24
2.5.5.1 Introdução e aplicações do método sol-gel	24
2.5.5.2 Deposição do filme e revestimento sol-gel	24
2.5.5.3 Comportamento do revestimento sol-gel no processo de usinagem	24
2.6 Tribologia na usinagem	27
2.6.1 Fatores que afetam o comportamento tribológico	28
2.7 Força na usinagem	31
2.7.1 Força na usinagem no ferro fundido nodular	32
2.8 Integridade superficial	35
2.8.1 Rugosidade.....	36
2.8.2 Rugosidade na usinagem do ferro fundido nodular	37
2.9 Desvios geométricos e dimensionais na furação	38
2.10 Rebarbas na furação	41

2.11	Mecanismos de formação do cavaco	44
2.11.1	Cavacos na usinagem do ferro fundido nodular	45
2.12	Desgaste e avarias em ferramentas de corte	46
2.12.1	Mecanismos de desgaste	47
2.12.2	Desgaste em brocas helicoidais	49
2.13	Planejamento fatorial completo	52
2.14	Considerações parciais	54
3	MATERIAIS E MÉTODOS	57
3.1	Materiais	57
3.1.1	Características dos materiais utilizados	57
3.1.2	Deposição sol-gel de Dióxido de Silício	60
3.2	Equipamentos e métodos	63
3.2.1	Tribômetro	63
3.2.2	Análise metalográfica dos corpos de prova da furação	63
3.2.3	Durômetro	63
3.2.4	Montagem experimental	64
3.2.5	Calibração do sistema	66
3.2.6	Rugosidade	66
3.2.7	Erros geométricos	67
3.2.8	Coleta dos cavacos	67
3.2.9	Imagens	67
3.3	Planejamento fatorial completo	68
3.4	Ensaio na furação	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
4.1	Análise metalográfica	71
4.2	Análise da dureza	72
4.3	Caracterização do revestimento de Dióxido de silício	72
4.4	Caracterização do revestimento de Nitreto de titânio	74
4.5	Análise do coeficiente de atrito	75
4.6	Análise das pistas	79
4.7	Análise dos pinos	88
4.8	Análise qualitativa do desgaste das ferramentas	94
4.9	Forças de avanço	96
4.10	Rugosidade dos furos	100
4.11	Diâmetro médio dos furos	103
4.12	Erro de circularidade	106
4.13	Análise da rebarba	108
4.14	Análise dos cavacos	110
4.15	Análise do desgaste das ferramentas	113
5	CONCLUSÃO	120
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	123
	REFERÊNCIAS	124
	ANEXOS	131
	APÊNDICE A – Curva de calibração da velocidade do <i>dip-coating</i>	133

APÊNDICE B – Cargas utilizadas para a calibração e equação de regressão da força de avanço x ddp.....	134
APÊNDICE C – Desenho do corpo de prova utilizado para a programação no CNC.....	135
APÊNDICE D – Dureza dos corpos de prova utilizados no ensaio na furação e no tribômetro	136
APÊNDICE E – Variação das massas dos pinos utilizados no tribômetro	136
APÊNDICE F – Resultado das medições da força de avanço [N]	137
APÊNDICE G – Resultado das medições do R_a e R_z [μm]	137
APÊNDICE H – Resultado das medições do diâmetro [mm].....	138
APÊNDICE I – Resultado das medições do erro de circularidade médio.....	139
APÊNDICE J – Comportamento do revestimento SiO_2 na broca helicoidal	139

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2. 1 - Morfologia da grafita, a) ferro fundido cinzento, b) ferro fundido nodular, c) ferro fundido ferrimiclar	5
FIGURA 2. 2 - Diferentes tipos de ferro fundido nodular: a) ferrítico, b) ferrítico-perlítico, c) perlítico.....	6
FIGURA 2. 3 - Vida da ferramenta para o ferro fundido nodular perlítico (SG-2) e ferrítico (SG-5)	8
FIGURA 2. 4 - Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo na furação	10
FIGURA 2. 5 - Partes de uma broca helicoidal e principais ângulos	13
FIGURA 2. 6 - Profundidade de corte (a_p).....	16
FIGURA 2. 7 - Dureza dos materiais em relação à temperatura.....	17
FIGURA 2. 8 - Dureza e tenacidade dos materiais das ferramentas utilizadas no processo de furação	18
FIGURA 2. 9 - Representação esquemática do processo de obtenção de filmes por “ <i>dip-coating</i> ”	26
FIGURA 2. 10 - Força de avanço média (F_z) em função da variação do avanço (f) com aplicação de fluido de corte por jorro e MQF	32
FIGURA 2. 11 - a) Influência da velocidade de corte, b) Influência da taxa de avanço.....	33
FIGURA 2. 12 - Forças de corte em relação ao comprimento de corte	34
FIGURA 2. 13 - Desgaste de flanco em relação à velocidade de corte	34
FIGURA 2. 14 - Influência dos parâmetros velocidade de corte e avanço na rugosidade superficial (R_a).....	37
FIGURA 2. 15 - Influência dos parâmetros de corte na rugosidade superficial (R_a).....	38
FIGURA 2. 16 - Desvios de circularidade	39
FIGURA 2. 17 - Desvios de circularidade e rugosidade dos furos em relação ao desgaste de flanco	40
FIGURA 2. 18 - a) influência da velocidade de corte, b) influência do avanço no diâmetro dos furos	41
FIGURA 2. 19 - Rebarba: 1) uniforme tipo I; 2)uniforme tipo II, 3) uniforme com tampa, 4) transição; 5) coroa	43
FIGURA 2. 20 - Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos.....	45
FIGURA 2. 21 - Tipos de cavacos produzidos na furação com brocas helicoidais	45
FIGURA 2. 22 - Mecanismos de desgaste predominantes em relação à temperatura de corte	47
FIGURA 2. 23 - Regiões de desgaste em uma broca helicoidal	49
FIGURA 2. 24 - Representação dos tipos de desgaste	50
FIGURA 2. 25 - Imagens do desgaste da superfície para a ferramenta revestida com (Ti, Al, Cr) N.....	52
FIGURA 2. 26 - Imagens do desgaste da superfície para a ferramenta revestida com TiAlN. 52	52
FIGURA 2. 27 - Sistema considerado como uma função ligando os fatores (variáveis de entrada) às respostas (variáveis de saída)	53
FIGURA 3. 1 - Pino de topo esférico	57
FIGURA 3. 2 - Pinos de topo esférico: a) pino sem revestimento; b) pino revestido com SiO_2 ; c) pino revestido com TiN	58
FIGURA 3. 3 - Pino de topo reto.....	58
FIGURA 3. 4 - Brocas HSS a) sem revestimento; b) revestida com TiN; c) revestida com SiO_2	59
FIGURA 3. 5 - Região da broca com facetamento.....	60
FIGURA 3. 6 - Fluxograma da preparação e aplicação do revestimento de SiO_2 por sol-gel . 61	61

FIGURA 3. 7 - Broca revestida pelo método de sol-gel	62
FIGURA 3. 8 - Curva de tratamento térmico realizado nas brocas e pinos revestidos de topo esférico e topo reto	62
FIGURA 3. 9 - Região do ensaio de dureza a) corpo de prova utilizado na furação; b) detalhe da marca do indentador; c) corpo de prova utilizado no tribômetro	64
FIGURA 3. 10 - Imagem do dispositivo conforme projeto, detalhando o posicionamento da célula de carga, corpo de prova e o espaçador de madeira.....	65
FIGURA 3. 11 - Imagem do dispositivo posicionado no CNC.....	65
FIGURA 3. 12 - Sistema para aquisição de dados	66
FIGURA 3. 13 - Disposição dos furos no corpo de prova	69
FIGURA 4. 1 - a) corpo de prova para a broca sem revestimento e sem ataque; b) com ataque.....	71
FIGURA 4. 2 - a) corpo de prova para a broca revestida com SiO ₂ sem ataque; b) com ataque.....	71
FIGURA 4. 3 - a) corpo de prova para a broca revestida com TiN sem ataque; b) com ataque.....	72
FIGURA 4. 4 - Espessura do revestimento de dióxido de silício e comportamento do revestimento no substrato	73
FIGURA 4. 5 - EDS do revestimento e do substrato e o mapeamento do revestimento.....	74
FIGURA 4. 6 - EDS e espessura do revestimento TiN	75
FIGURA 4. 7 - Coeficiente de atrito para a velocidade de deslizamento 40 m/min	76
FIGURA 4. 8 - Coeficiente de atrito para a velocidade de deslizamento 55 m/min	76
FIGURA 4. 9 - Coeficiente de atrito para a velocidade de deslizamento 70 m/min	76
FIGURA 4. 10 - Ensaio pino sobre disco a) pino sem revestimento, b) pino revestido com SiO ₂ , c) pino revestido com TiN	88
FIGURA 4. 11 - Imagens do MEV e EDS da região da pista desgastada.....	88
FIGURA 4. 12 - Gráfico de probabilidade para a força de avanço	96
FIGURA 4. 13 - a) análise dos resíduos versus ordem, b) análise dos resíduos versus ajustes	97
FIGURA 4. 14 - Gráfico de efeito principal para a força de avanço.....	99
FIGURA 4. 15 - Gráfico de interação para a força de avanço	99
FIGURA 4. 16 - Gráfico de probabilidade para a rugosidade média	100
FIGURA 4. 17 - a) análise dos resíduos versus ordem, b) análise dos resíduos versus ajustes	101
FIGURA 4. 18 - Gráfico de efeito principal para a rugosidade	102
FIGURA 4. 19 - Gráfico de probabilidade para o diâmetro médio dos furos	103
FIGURA 4. 20 - a) análise dos resíduos versus ordem, b) análise dos resíduos versus ajustes	104
FIGURA 4. 21 - Efeitos principais para o diâmetro médio.....	105
FIGURA 4. 22 - Erro de circularidade em relação à velocidade de corte e a ferramenta de corte	107
FIGURA 4. 23 - Erro de circularidade em relação à ferramentas sem revestimento e revestidas	107
FIGURA 4. 24 - a) avaliação do desgaste com a broca sem revestimento e revestida com SiO ₂ ; b) avaliação do desgaste com a broca revestida com TiN	114
FIGURA 4. 25 - Desgaste de flanco máximo para as ferramentas sem revestimento e revestidas	116

LISTA DE TABELAS

TABELA 2. 1 - Classificação do ferro fundido nodular, segundo a ABNT 6916/1981	7
TABELA 2. 2 - Composição e características dos aços rápidos	19
TABELA 2. 3 - Comparação dos processos CVD e PVD.....	23
TABELA 2. 4 - Análise de variância para um experimento de um fator	54
TABELA 3. 1 - Composição química do aço rápido AISI M2	58
TABELA 3. 2 - Composição química do corpo de prova a ser furado	59
TABELA 3. 3 - Ensaio de tração.....	59
TABELA 3. 4 - Composição química do ferro fundido do disco	60
TABELA 3. 5 - Condições testadas	69
TABELA 4. 1 - Ensaio metalográfico	72
TABELA 4. 2 - Coeficiente atrito para cada velocidade de deslizamento.....	77
TABELA 4. 3 - Taxa de desgaste do corpo de prova.....	78
TABELA 4. 4 - Análise de variância para os dados da força de avanço.....	98
TABELA 4. 5 - Análise de variância para os dados da rugosidade	102
TABELA 4. 6 - Análise de variância para os dados do diâmetro médio	105

LISTA DE QUADROS

QUADRO 4. 1 - Imagens e largura das pistas para o pino sem revestimento.....	82
QUADRO 4. 2 - Imagens do MEV e EDS para as pistas do pino sem revestimento	83
QUADRO 4. 3 - Imagens e largura das pistas para o pino de dióxido de silício	84
QUADRO 4. 4 - Imagens do MEV e EDS para as pistas do pino dióxido de silício.....	85
QUADRO 4. 5 - Imagens e largura das pistas para o pino de nitreto de titânio	86
QUADRO 4. 6 - Imagens do MEV e EDS para a pista do pino nitreto de titânio	87
QUADRO 4. 7 - Imagens dos pinos com desgaste em relação à velocidade de deslizamento	89
QUADRO 4. 8 - Imagens do MEV e EDS para o pino sem revestimento.....	91
QUADRO 4. 9 - Imagens do MEV e EDS para o pino de dióxido de silício	92
QUADRO 4. 10 - Imagens do MEV e EDS para o pino nitreto de titânio	93
QUADRO 4. 11 - Imagens do desgaste das brocas sem revestimento e revestidas com SiO ₂ e TiN nas velocidades de corte 40, 55 e 70 m/min e avanço = 0,25 mm/rev.....	95
QUADRO 4. 12 - Imagens das rebarbas para os três corpos de prova.....	110
QUADRO 4. 13 - Imagens dos cavacos coletados para ferramenta sem revestimento.....	111
QUADRO 4. 14 - Imagens dos cavacos coletados para ferramenta revestida com dióxido de silício.....	112
QUADRO 4. 15 - Imagens dos cavacos coletados para ferramenta revestida com nitreto de titânio.....	113
QUADRO 4. 16 - Imagens iniciais das brocas e após teste de desgaste	115
QUADRO 4. 17 - Valores do desgaste de flanco médio das brocas avaliadas	116
QUADRO 4. 18 - Imagens do desgaste das brocas sem revestimento e revestidas	117
QUADRO 4. 19 - Região ampliada indicando o lascamento e material aderido para as ferramentas sem revestimento e revestidas	118

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADI	Ferro Fundido Nodular Austemperado (<i>Austempered Ductile Iron</i>)
AISI	Instituto Americano do Ferro e do Aço (<i>American Institute for Iron and Steel</i>)
ANOVA	Análise de Variância (<i>Analysis of Variance</i>)
APC	Aresta postiça de corte
CNC	Controle numérico computadorizado
CVD	Deposição química de vapor (<i>Chemical Vapour Deposition</i>)
DOE	Planejamento fatorial de experimentos
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
GGG50	Classe de ferro fundido nodular
HSS	Aço Rápido (<i>High Speed Steel</i>)
HV	Dureza Vickers
ISO	Organização Internacional de Padronização (<i>International Organization for Standardization</i>)
IT	Intervalo de tolerância
IPUC	Instituto Politécnico da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
k	Número de variáveis controladas no planejamento experimental
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MQF	Mínima quantidade de fluido (<i>minimum quantify of fluid</i>)
M2	Classe de aço rápido
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
P_f	Plano admitido de trabalho
P_o	Plano ortogonal
P_s	Plano principal de corte
P_r	Plano de referência
PEALL	Polietileno alumínio laminado
Q	Taxa de desgaste
PVD	Deposição Física de Vapor (<i>Physical Vapour Deposition</i>)
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

LISTA DE ABREVIATURAS DE COMPOSTOS QUÍMICOS

Al_2O_3	Óxido de alumínio
AlCrN	Nitreto de alumínio cromo
CBN	Nitreto de boro cúbico
CeO_2	Óxido de cério
CrN	Nitreto de cromo
SiO_2	Dióxido de silício
Si_3N_4	Nitreto de silício
TaC	Carboneto de tântalo
TiAlN	Nitreto titânio alumínio
TiC	Carboneto de titânio
TiCN	Carbonitreto de titânio
TiN	Nitreto de titânio
TiO_2	Dióxido de titânio
TiSiN	Nitreto de titânio silício
WC	Carboneto de tungstênio
ZrN	Nitreto de zircônio
ZrO_2	Dióxido de zircônio

NOMENCLATURAS

Letras Latinas

a_p	profundidade ou largura de usinagem	[mm]
b	largura de corte	[mm]
C_m	largura do desgaste da aresta transversal	[mm]
C_t	ponto mais alto do desgaste da aresta transversal	[mm]
D	diâmetro da ferramenta	[mm]
ddp	diferença de potencial	[V]
f	avanço	[mm/rev]
F_c	força de corte	[N]
F_f	força de avanço	[N]
F_p	força de passiva	[N]
h	espessura local de corte	[mm]
H	desgaste de guia	[mm]
kb	desgaste de cratera	[mm]
KT	profundidade da cratera	[mm]
n	número de rotações por minuto	[rpm]
P_m	largura do lascamento	[mm]
P_t	profundidade do lascamento	[mm]
R_a	desvio aritmético médio	[μ m]
R_z	altura máxima do perfil	[μ m]
V_B	desgaste de flanco	[mm]
VB_B	desgaste de flanco médio	[mm]
VB_{Bmax}	desgaste de flanco máximo	[mm]
V_c	velocidade de corte	[m/min]
V_f	velocidade de avanço	[mm/min]
w	desgaste de quina	[mm]

Letras Gregas

α_o	ângulo de folga no plano ortogonal	[graus]
β_o	ângulo de cunha da ferramenta no plano ortogonal	[graus]
ϵ_r	ângulo da ponta	[graus]

γ_o	ângulo de saída no plano ortogonal	[graus]
X_r	ângulo de posição	[graus]
δ	ângulo de hélice	[graus]
σ	ângulo de ponta da ferramenta	[graus]
μ	coeficiente de atrito	adimensional

RESUMO

Dentre os processos de fabricação, a usinagem ganhou destaque principalmente com as inovações tecnológicas aplicadas a esse setor, especialmente, com objetivo de aumentar a vida da ferramenta. As aplicações em revestimentos para as ferramentas de corte têm contribuído para esse ganho, além de proporcionar o aumento de produtividade. Nesse intuito, estudou-se o comportamento das brocas de aço rápido AISI M2, diâmetro de 10 mm, sem revestimento e revestidas por dióxido de silício (SiO_2) pelo método sol-gel e nitreto de titânio (TiN) por processo PVD na furação do ferro fundido nodular. O revestimento de SiO_2 apresentou espessuras de 390 a 500 nm e o revestimento de TiN espessuras entre 3,4 a 3,9 μm . No ensaio pino sobre disco, os maiores valores de coeficiente de atrito e taxa de desgaste foram para a ferramenta sem revestimento que obteve um desgaste abrasivo severo; já o pino revestido de SiO_2 apresentou melhor comportamento até a velocidade de deslizamento 55 m/min, caracterizando um desgaste abrasivo suave. O pino revestido de TiN mostrou os menores coeficientes de atrito e taxas de desgaste para todas as velocidades de deslizamento indicando um desgaste abrasivo suave. Em relação ao ensaio de furação, aplicou-se a análise estatística, totalizando 54 testes para os dados da força de avanço, rugosidade e diâmetro médio, sendo que o erro de circularidade foi avaliado graficamente. Os resultados assinalaram que a força de avanço foi maior para a ferramenta sem revestimento. Em relação à rugosidade média (R_a) e ao diâmetro médio, o aumento do avanço contribuiu para aumentar a R_a ; porém, em relação ao diâmetro, as menores variações dimensionais dos furos foram para o maior avanço. No que se refere à ferramenta, os revestimentos influenciaram para menores valores de R_a e do diâmetro médio, e, quanto ao erro de circularidade, observou-se que as ferramentas revestidas proporcionaram menores erros. Em relação à rebarba, os parâmetros de corte - velocidade de corte 40 e 55 m/min e avanço 0,25 mm/rev. - apresentaram rebarbas uniformes para as ferramentas sem revestimento e revestida com SiO_2 . A ferramenta de TiN exibiu rebarbas uniformes para a maioria dos furos. Sobre a forma dos cavacos, o aumento da velocidade de corte e do avanço reduziu o tamanho do cavaco, sem alteração do tipo. Uma última avaliação referente ao ensaio de desgaste, as ferramentas revestidas obtiveram menores valores de desgaste de flanco médio e máximo, porém não foi possível avaliar os mecanismos de desgaste devido à aderência de material presente nas brocas.

Palavras-chave: furação; ferro fundido nodular; sol-gel; dióxido de silício; nitreto de titânio

ABSTRACT

Among the manufacturing processes, the machining stands out mainly with the technological innovations applied to this field, specially, with the target of increasing the life of the tool. The applications of coatings in cutting tools have contributed to this gain, besides providing the increase of productivity. On this purpose, the behavior of drills in High Speed Steel AISI M2 was studied, with diameter of 10 mm, uncoated and coated with silicon dioxide (SiO₂) by the sol-gel method and titanium nitride (TiN) by PVD process in the drilling of nodular cast iron. The SiO₂ coating had thicknesses of 390 to 500 nm, the TiN coating had thicknesses of 3,4 to 3,9 μm. In the pin on disk test, the highest friction coefficient and wear rate were for the uncoated tool, obtaining a severe abrasive wear; the SiO₂ coated pin showed the best performance up to the 55 m/min sliding speed characterizing a mild abrasive wear. The TiN coated pin showed lower friction coefficients and wear rates for all speeds of slipping indicating mild abrasive wear. Regarding the drilling test, the statistical analysis were applied totalizing in 54 tests for the data of feed force, roughness and average diameter. The roughness error was evaluated graphically. The results indicated that the feed force was higher for the uncoated tool. In relation to the average roughness (R_a) and the mean diameter, the increase of the feed contributed to increase R_a , but when it comes to the diameter, the smaller dimensional variations of the holes were for the higher feed. Regarding the tool, the coatings influenced to lower values of R_a and of average diameter. As for the roughness error, it was observed that the coated tools provided decreasing errors. About the burr, the cutting parameters - cutting speed 40 m/min and 55 m/min, feed 0.25 mm/rev. -presented uniform burrs for the uncoated and SiO₂ coated tool. The TiN tool showed uniform burrs for most holes. In relation to the shape of the chips, the increase of cutting speed and feed reduced the size of the chip, without changing the type. A final evaluation regarding on the wear test, the coated tools obtained lower mean and maximum flank wear values, but it was not possible to evaluate the wear mechanisms due to the adherence of material present in the drills.

Key words: drill; nodular cast iron; sol-gel; silicon dioxide; titanium nitride

1 INTRODUÇÃO

O desgaste e a falha de brocas são de grande importância, tanto tecnológica quanto econômica para o processo de usinagem industrial. Com o crescente aumento da produtividade e a necessidade de diminuição do tempo gasto para a fabricação dos componentes, a vida da ferramenta apresenta vital importância, fazendo-se necessária a resistência ao desgaste, à corrosão e à fadiga das brocas, visando maior eficiência nos processos produtivos. Uma das tendências adotadas nas indústrias é o uso de revestimentos com o objetivo de aumentar a vida da ferramenta e, conseqüentemente, assegurar maiores velocidade de corte e ganho de produtividade.

Apesar de sua importância, a operação de furação ficou estagnado durante muitos anos. O surgimento de revestimentos para ferramentas, tais como carboneto de titânio (TiC), nitreto de titânico, nitreto de titânio alumínio (TiAlN), óxido de alumínio (Al₂O₃) etc., de materiais para ferramentas, como o metal duro, cerâmica, nitreto de boro cúbico, diamante, dentre outros, e de modernas geometrias para ferramentas de corte foi absorvido inicialmente pela operação de torneamento e fresamento, não se aplicando de imediato na furação. Porém, com a introdução do controle numérico computadorizado (CNC), alguns desses revestimentos, materiais de ferramenta e geometrias têm sido incorporados na operação de furação, o que trouxe avanços significativos, como a melhoria na qualidade dos furos e o aumento da velocidade de corte e da taxa de penetração.

Existem diversas técnicas de deposição de revestimentos utilizadas pelas indústrias como, por exemplo, pulverização a plasma, deposição química de vapor (CVD - *Chemical Vapour Deposition*), deposição física de vapor (PVD - *Physical Vapour Deposition*), eletrodeposição e aspersão térmica (AMIRI e RAHIMI, 2016). As ferramentas de aço rápido apresentam como característica restritiva a revestimentos por métodos que utilizam temperaturas elevadas, da ordem de 900°C, como o CVD. Um dos métodos de revestimento a baixas temperaturas, que se apresentam promissores é o revestimento pelo método sol-gel. A fabricação de finos óxidos de metal pela técnica de sol-gel é rentável, reprodutiva e aplicável a amplos substratos sem qualquer restrição. É uma técnica simples, de baixa temperatura e não exige vácuo. Esse método permite a preparação de materiais com boa pureza e homogeneidade, formando revestimentos de um ou mais constituintes na forma de mono ou

multicamadas (TLILI *et al.*, 2016).

O revestimento de dióxido de silício, também conhecido como sílica, é um material dielétrico, de alta estabilidade térmica, resistência química e alta dureza que tem sido utilizado como revestimento em forma de filme fino, depositado pelo método sol-gel, principalmente em aplicações como camada dielétrica para constituintes microeletrônicos, camada antirreflexiva e camada de proteção contra corrosão (GUNDUZ *et al.*, 2011). Entretanto, ainda há poucos estudos sobre esse revestimento para ferramentas de corte. Assim, um dos motivos que impulsionaram esta pesquisa foi conhecer o comportamento desse revestimento na furação do ferro fundido nodular e comparar com outras ferramentas de corte.

O ferro fundido nodular, material discutido nesta dissertação, tem ganhado popularidade e rapidamente está substituindo os ferros fundidos cinzentos e os aços de baixa resistência (GRZESIK, 2009). Devido ao seu desempenho mecânico e tribológico, comparado com outros tipos de aço, o ferro fundido nodular tem sido usado para várias aplicações estruturais, principalmente quando são exigidas boa rigidez e usinabilidade. A segunda maior área de aplicação é na indústria automobilística, por causa da sua baixa densidade, boa resistência ao desgaste e baixo coeficiente de atrito (TKAYA, 2009). A grafita esferoidal contribui para uma elevada resistência, superior tenacidade e ductilidade, que melhoram suas propriedades mecânicas (CESCHINI, 2016). Segundo Trent e Wright (2000), uma razão significativa para a utilização desses materiais na engenharia, em larga escala, não é apenas o baixo custo do material e do processo de fundição, mas também a economia da usinagem de peças acabadas, quando comparadas ao aço.

Diante desse contexto, um estudo foi realizado com o intuito de verificar o desempenho das brocas de aço rápido AISI M2 sem revestimento e revestidas com dióxido de silício, pelo processo sol-gel, e nitreto de titânio, pelo processo PVD e analisar qual ferramenta apresentou melhor comportamento na furação do ferro fundido nodular.

Objetivo geral

A proposta deste trabalho foi avaliar o desempenho do revestimento de SiO₂ pelo método sol-gel, em brocas de aço rápido AISI M2, na operação de furação do ferro fundido nodular e comparar seu resultado com a broca sem revestimento e a broca revestida com TiN por processo PVD.

1.1 Objetivos específicos

Os principais objetivos específicos foram:

- avaliar o comportamento tribológico por meio do coeficiente de atrito juntamente com a análise das pistas desgastadas e dos pinos sem revestimento e revestidos com SiO₂ e TiN;
- avaliar o desempenho das brocas sem revestimento e revestidas por meio dos ensaios de força na furação, rugosidade, variação do diâmetro médio, erro de circularidade dos furos produzidos; rebarbas na furação e análise de cavacos;
- analisar os mecanismos de desgaste das brocas sem revestimento e revestidas.

1.2 Estrutura do trabalho

A apresentação desta dissertação está estruturada em seis capítulos. No capítulo I, encontram-se a introdução e os objetivos principais e específicos. Na sequência, no capítulo II, são abordados os conhecimentos necessários à compreensão do trabalho, como a operação de furação e principais parâmetros de controle como força, rugosidade, diâmetro médio e erro de circularidade, o processo sol-gel e principais aplicações e os tipos de desgaste para as brocas helicoidais. No capítulo III, há o detalhamento de todo o procedimento experimental para a execução da pesquisa, dentre os materiais e equipamentos utilizados. No capítulo IV, estão os resultados e discussões das análises tribológicas, as análises estatísticas que envolvem a parte dinâmica da operação de furação e a avaliação do desgaste das brocas; no capítulo V, as principais conclusões referentes à avaliação do desempenho das brocas de aço rápido sem revestimento e revestidas; e, no capítulo VI, as sugestões para trabalhos futuros. Por fim, são citadas as referências bibliográficas, juntamente com os anexos e os apêndices.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são descritos os aspectos mais relevantes que envolvem a operação de furação. Primeiramente, apresentam-se as principais características do ferro fundido nodular; em seguida, a definição e a caracterização da operação de furação, com uma descrição dos tipos de ferramentas e sua geometria. Na sequência, são retratados os principais parâmetros de usinagem. Em seguida, são mencionados os materiais para as ferramentas de corte e as técnicas e os tipos de revestimentos aplicados. A parte dinâmica que envolve a operação de furação também é abordada, bem como as forças na usinagem, integridade superficial, erros dimensionais e geométricos, rebarbas na furação e formação dos cavacos. Por fim, apresenta-se uma abordagem sobre os mecanismos de desgaste, o planejamento de experimento e a análise de variância.

2.1 Ferro fundido

Segundo Chiaverini (2012), dentre as ligas ferro-carbono, os ferros fundidos constituem um grupo de ligas de importância fundamental para a indústria, não só devido às características do próprio material, mas também pelo fato de, mediante introdução de elemento de liga, aplicação de tratamentos térmicos adequados e pelo desenvolvimento dos ferros fundidos, dentre eles o ferro fundido nodular, no qual foi viável o seu emprego em aplicações que, de certo modo, eram exclusivas dos aços.

“Ferro fundido é a liga ferro-carbono silício, de teores de carbono geralmente acima de 2,0% em quantidade superior à que é retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita” (CHIAVERINI, 2012, p.494).

Os elementos que mais influenciam na estrutura dos ferros fundidos são o carbono e o silício. O carbono determina a quantidade de grafita que se pode formar, e o silício é o elemento grafitizante. O manganês, presente em menor porcentagem, tem efeito oposto ao do silício, promovendo a presença de cementita; assim, contrabalança a ação grafitizante do silício. O fósforo é um estabilizador relativamente forte do carboneto de ferro; sua principal ação é na estrutura do material, porque forma um composto eutético (carboneto e fosfeto de ferro), chamado steadita. O enxofre, juntamente com o manganês, forma o composto chamado de

sulfeto de manganês (MnS) que tende a melhorar a usinabilidade dos ferros fundidos (CALLISTER JR., 2008)

Conforme descrito por Smith (1998), com a adição de elementos de liga, pode-se obter excelente resistência ao desgaste, à abrasão e ou à corrosão. A vasta utilização industrial dos ferros fundidos deve-se essencialmente ao seu baixo custo, comparado com outros materiais, e à versatilidade das suas propriedades de engenharia. No entanto, os ferros fundidos têm resistência ao impacto e ductilidade relativamente baixa, o que limita o seu emprego em algumas aplicações.

Os ferros fundidos são classificados, de acordo com a composição química e a microestrutura, mais especificamente quanto à existência e a forma da grafita. Dentro da denominação geral de “ferro fundido”, podem ser distinguidos os seguintes tipos de liga: ferro fundido cinzento, ferro fundido branco, ferro fundido mesclado, ferro fundido maleável, ferro fundido nodular e ferro fundido vermicular (CHIAVERINI, 2012). Na FIG. 2.1 (a), pode ser observada a morfologia da grafita do ferro fundido cinzento, que se apresenta sob a forma lamelar; a FIG. 2.1 (b) mostra a grafita do ferro fundido nodular sob a forma de nódulos; e a FIG. 2.1 (c) detalha a morfologia da grafita do ferro fundido vermicular, sob a forma alongada e arredondada na extremidade.

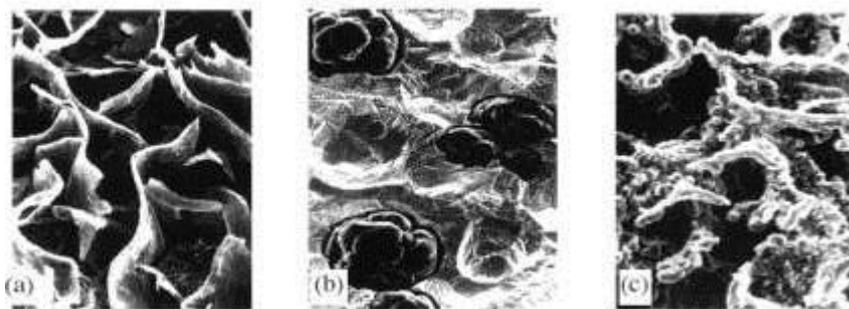


FIGURA 2. 1 - Morfologia da grafita, a) ferro fundido cinzento, b) ferro fundido nodular, c) ferro fundido vermicular

FONTE - Andrade (2005) *apud* Guessser *et al.* (2011)

2.1.1 Ferro fundido nodular

Ferros dúcteis, conhecidos como ferro fundido nodular ou ferro fundido de grafita esferoidal, têm sido cada vez mais utilizados pela indústria de fabricação desde o primeiro

desenvolvimento em 1940 (YIGIT *et al.*, 2008). Segundo Callister Jr. (2008) a adição de uma pequena quantidade de magnésio e/ou cério ao ferro fundido cinzento antes da fundição produz uma microestrutura e um conjunto de propriedades bastante diferentes. A grafita ainda se forma, porém, na forma de nódulos ou partículas com formato esférico, e não em flocos.

O ferro fundido dúctil ou nodular caracteriza-se pelas propriedades de ductilidade, tenacidade e resistência mecânica. Quanto às propriedades mecânicas, a que mais se destaca é o limite de escoamento, que é mais elevado no ferro fundido nodular que no ferro fundido cinzento, no ferro maleável e até mesmo nos aços-carbono comuns. A grafita do ferro fundido nodular apresenta-se na forma esferoidal, a qual não interrompe a continuidade da matriz tanto quanto a grafita em veio, resultando em melhor ductilidade e tenacidade (CHIAVERINI, 2012).

Conforme Hütter *et al.* (2015), a matriz metálica do ferro fundido nodular poder ser ferrítica, perlítica ou estrutura austenítica ou fases intermediárias, dependendo da composição química da matriz e do tratamento térmico. Neri e Carreño (2003) afirmam que os elementos comuns utilizados para controlar os teores de ferrita e perlita são o Si, Mn e o Cu. O Mn e o Cu são empregados para promover a perlita, e o Si, para promover a ferrita. A FIG 2.2 apresenta os diferentes tipos de ferro fundido nodular.

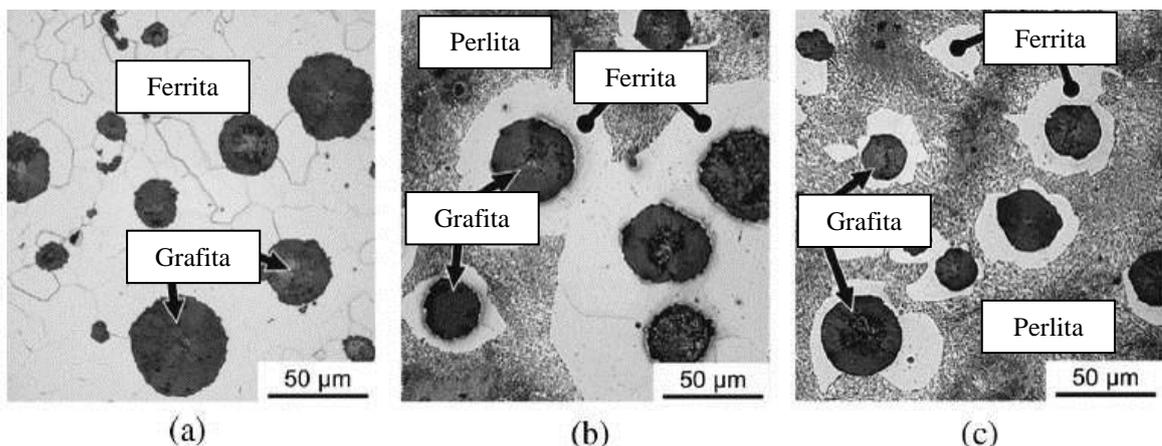


FIGURA 2. 2 - Diferentes tipos de ferro fundido nodular: a) ferrítico, b) ferrítico-perlítico, c) perlítico

FONTE - Hütter (2015)

As propriedades mecânicas deste material, como a resistência à tração e a tenacidade, são determinadas pela proporção de ferrita e perlita na matriz. Baixa resistência mecânica e boa tenacidade consistem predominantemente na matriz ferrítica. Alta resistência mecânica, em combinação com baixa tenacidade, apresenta matriz predominantemente perlítica. Esta

proporção de ferrita e perlita resulta da quantidade de carbono ligado na matriz, que pode ser alterada por meio de um tratamento térmico (KLOCKE, 2011).

Na TAB. 2.1, está a classificação do ferro fundido nodular segundo a ABNT NBR 6916/1981. Conforme Callister Jr. (2008), o número de nódulos e a nodularidade são identificados como fatores importantes nas propriedades mecânicas. Maior quantidade de nódulos no ferro fundido nodular perlítico representa um aumento no limite de resistência à tração; enquanto, no ferro fundido ferrítico, indica aumento no alongamento.

TABELA 2. 1 - Classificação do ferro fundido nodular, segundo a ABNT 6916/1981

Propriedades Mecânicas do Ferro Fundido Nodular - Norma ABNT NBR 6916/1981					
Classe	Limite mínimo de Resistência à tração - LR MPA	Limite mínimo de Escoamento (0,2%) - LE MPA	Alongamento mínimo em 5d - A %	Faixa Aproximada da dureza Brinell	Estrutura Metalográfica predominante
FE 38017	380	240	17	140-180	Ferrítica
FE 42012	420	280	12	150-200	Ferrítica-Perlítica
FE 50007	500	350	7	170-240	Perlítica-Ferrítica
FE 60003	600	400	3	210-280	Perlítica
FE 70002	700	450	2	230-300	Perlítica
FE 80002	800	550	2	240-312	Perlítica
FE 38017- RI *	380	240	17	140-180	Perlítica

* Classe com requisitos de impacto

FONTE - Chiaverini (2012)

As inspirações do estudo experimental na usinagem de ferros nodulares são originadas nas estatísticas promissoras da indústria automotiva, que relatam o crescente uso de ferros fundidos, não só o ferro fundido vermicular e o ferro fundido nodular austemperado (ADI - *Austempered Ductile Iron*), mas também o ferro nodular. Recentemente, este último ganhou popularidade e está substituindo rapidamente os ferros fundidos cinzentos e alguns aços de baixa resistência. O aumento do uso do ferro fundido nodular diz respeito a muitas aplicações, especialmente nos setores automotivo, de equipamentos pesados e na indústria de transportes não automotivos (GRZESIK *et al.*, 2009).

2.1.2 Usinabilidade do ferro fundido nodular

Os ferros fundidos em geral são considerados materiais com boa usinabilidade. A razão para a continuidade de seu uso em larga escala na engenharia não é somente pelo seu baixo custo e o

processo de produção na fundição, mas também pela economia na usinagem. Sua boa usinabilidade tem sido confirmada por meio das baixas taxas de desgaste das ferramentas, altas taxas de remoção de material, força de usinagem, potência de corte relativamente baixa e também pelo fato de seus cavacos serem geralmente pequenos e fragmentados (TRENT E WRIGHT, 2000).

A grafita dos ferros fundidos, por ser um componente de dureza relativamente baixa, se comparada com aos constituintes da matriz, produz descontinuidades no material, facilitando a quebra do cavaco na usinagem. Por outro lado, a grafita atua como agente lubrificante, reduzindo o atrito entre a peça e a ferramenta, além de reduzir o risco de microsolda (GUESSER *et al.*, 2011).

Nayyar *et al.* (2012) afirmam que as diferentes formas da grafita, em combinação com os constituintes da matriz, afetam as propriedades como a dureza, resistência à tração, amortecimento, condutividade térmica, fadiga etc., e a diferença dessas propriedades influenciam na usinabilidade. Esse mesmo autor realizou uma comparação quanto à usinabilidade de dois materiais: ferro fundido nodular perlítico (SGI-2) e ferrítico (SGI-5) no torneamento, utilizando insertos de metal duro com revestimento de carbonitreto de titânio (TiCN), Al_2O_3 e TiN. A velocidade de corte foi de 250 m/min, avanço de 0,3 mm/rev., e profundidade de usinagem de 3,5 mm, tendo sido utilizada emulsão de óleo solúvel com concentração de 8%. O resultado apresentado na FIG. 2.3 mostra que o tempo de vida da ferramenta do ferro fundido nodular ferrítico é quase o dobro em comparação à do ferro fundido nodular perlítico.

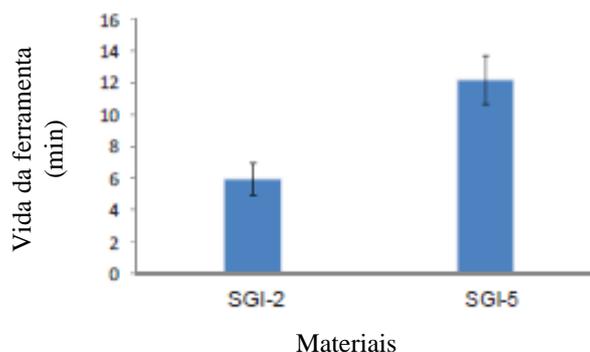


FIGURA 2. 3 - Vida da ferramenta para o ferro fundido nodular perlítico (SG-2) e ferrítico (SG-5)

FONTE - Nayyar (2012)

Ceschini *et al.* (2016) relataram que uma matriz ferrítica garante melhor usinabilidade e, por outro lado, uma matriz perlítica confere resistência mecânica superior, mas reduz fortemente a usinabilidade. Neri e Carreño (2003) detalham que as partículas de grafita influenciam na força e no acabamento da superfície, enquanto a matriz determina a vida da ferramenta. Por meio de um estudo da usinabilidade do ferro fundido nodular com matrizes diferentes, na operação de furação, observa-se quebra das brocas nos materiais com maiores porcentagens de carbono, cobre e com maior valor de dureza Vickers. Os autores concluíram que o ferro fundido que apresentaram maior dureza, assim como a presença de perlita fina ocasionaram pior usinabilidade.

Yigit *et al.* (2008), realizaram uma comparação entre a usinabilidade do ferro fundido cinzento e do nodular, e constataram que a usinabilidade de ferro fundido nodular é pior que a do ferro fundido cinzento, pois as lamelas de grafita em ferros fundidos cinzentos atuam como concentradoras de tensão no plano de cisalhamento e, portanto, facilitam o corte. No ferro fundido nodular, por outro lado, as esferas de grafita são menos eficazes que a grafita lamelar no enfraquecimento do material no plano de cisalhamento, e a zona de fluxo de material pode, por vezes, ser extremamente dúctil. De acordo com Trent e Wright (2000), a zona de fluxo dos ferros fundidos nodulares ferríticos, por ser dúctil, pode aderir à superfície de folga da ferramenta quando usinar em altas velocidades. Isso provoca altas forças nas ferramentas, altas temperaturas e acabamento pobre de superfície. Este problema pode ser superado pela utilização de um maior ângulo de folga da ferramenta.

Além das características inerentes ao material, as condições de corte empregadas podem igualmente, dificultar a furação dos ferros fundidos nodulares. Uma vez que, a velocidade de corte diminui da periferia para o centro da broca, no caso de furação sem pré-furo, existe grande probabilidade de que seja formada aresta postiça de corte (APC), nas proximidades do centro da ferramenta. Entretanto, o aumento da velocidade de corte para minimizar a formação de APC, pode provocar maiores desgastes na ferramenta, na vizinhança da periferia da broca (DINIZ *et al.*, 2013).

Conforme relato dos autores supracitados, acredita-se que a usinabilidade do ferro fundido nodular poderá ser afetada por diversos fatores, tais como; às características associadas à microestrutura do material, à quantidade e tipo de grafita, à presença de elementos de ligas e às propriedades mecânicas. Todo esse conjunto de fatores associado aos parâmetros de corte

utilizado na furação terá efeitos em relação ao desgaste das ferramentas, à força de usinagem, ao tipo de cavaco e ao acabamento dos furos.

2.2 Operação de furação

Novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas e aplicadas na furação em resposta às exigências em termos de produtividade, flexibilidade, precisão e requisitos ambientais. De acordo com Paiva *et al.* (2013) a furação é uma das mais importantes técnicas de corte de metais e representa aproximadamente 33% de todas as operações de usinagem. Ferraresi (1970) detalha a operação de furação:

“A furação é um processo mecânico de usinagem, utilizado para a obtenção de um furo geralmente cilíndrico em uma peça, com auxílio de uma ferramenta geralmente multicortante. Para tanto, a ferramenta ou a peça gira e simultaneamente a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela com o eixo principal de rotação da máquina” (FERRARESI, 1970, p.XXIX).

Segundo a norma ABNT NBR 6162:1989 *apud* Machado *et al.* (2011), os movimentos de corte e de avanço que são realizados entre a peça e a aresta de corte provocam a retirada contínua do cavaco. O movimento efetivo é resultante desses dois movimentos, que são realizados ao mesmo tempo. A FIG. 2.4 ilustra as direções dos movimentos de corte, de avanço e efetivo para a operação de furação.

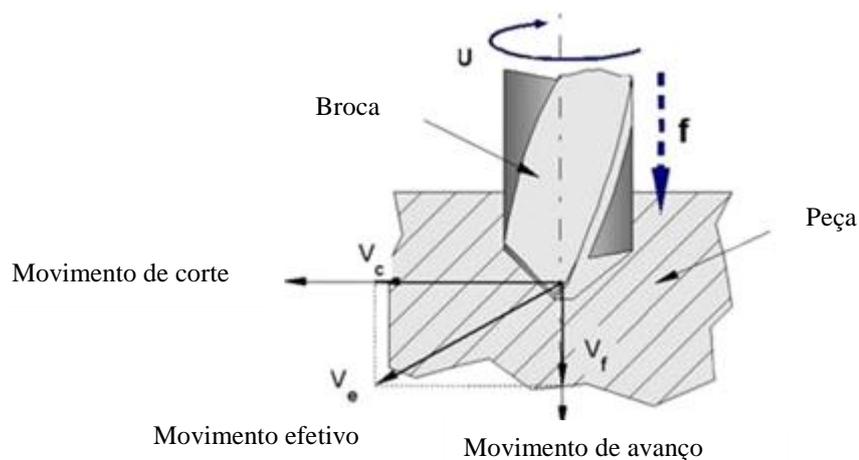


FIGURA 2. 4 - Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo na furação

FONTE - MACHADO *et al.* (2011)

De acordo com Klocke (2011) a operação de furação possui algumas características particulares, tais como:

- apresenta dificuldade no transporte dos cavacos para fora da cavidade da broca;
- distribuição inadequada de calor na região do corte;
- a fragilidade das pontas de corte, susceptíveis a avarias e desgaste;
- as guias da ferramenta se atritam com a parede do furo durante o processo.

2.3 Ferramentas empregadas no processo de furação

Na sua obra de 2014, Viktor Astakhov afirma que cada ferramenta de furação tem recursos projetados para resolver problemas específicos a fim de estender a vida da ferramenta, melhorar o escoamento do cavaco, reduzir a força de furação, permitir o aumento da taxa de penetração e melhorar a rugosidade da superfície ou a linearidade do furo usinado.

As brocas podem apresentar vários tipos de geometrias tais como: broca chata, broca escalonada, broca helicoidal, broca com canais de refrigeração, broca de centro, broca-canhão, broca oca de trepanação, broca de pastilhas intercambiáveis e brocas especiais conforme as características do processo (STEMMER, 1993). De acordo com Trent e Wright (2000), o tipo de broca mais comumente utilizado é a helicoidal. Brocas são delgadas e ferramentas muito solicitadas, seus canais têm de ser cuidadosamente projetados para permitir o fluxo de cavaco, mantendo a resistência adequada.

Considerando a sua importância e o fato de que esta dissertação se restringiu ao uso de brocas helicoidais para a furação de ferro fundido nodular, somente os elementos descritivos das brocas helicoidais serão detalhados no tópico a seguir.

2.3.1 Características das brocas helicoidais

A norma ABNT NBR 5419:2009 define as partes e geometria de uma broca helicoidal; abaixo, algumas delas:

- **diâmetro da broca:** medida imediatamente perto da ponta cortante;
- **núcleo:** porção central da broca, localizada em todo o comprimento entre os canais para a

saída de cavaco;

- **espessura do núcleo:** medida mínima do núcleo, mensurando no plano normal do eixo. A espessura do núcleo é determinada no final da ponta;
- **guia:** é a superfície principal cilíndrica ou cônica da broca;
- **aresta principal de corte:** é a quina formada pelo cruzamento da superfície principal de folga e a superfície de saída do cavaco;
- **aresta transversal:** é a quina formada pelo cruzamento das superfícies principais de folga;
- **comprimento total:** é a distância entre os dois planos normais, medindo pelo eixo central da broca, partindo da aresta transversal até o final da haste;
- **comprimento do canal para saída do cavaco:** é a medida do eixo da broca, partindo da aresta transversal até o final do canal para saída de cavaco da haste;
- **canal para saída do cavaco:** canal no corpo da broca, que, no cruzamento com a superfície principal de folga, forma a aresta principal de corte, que permite a passagem dos cavacos, assim como possibilita que o fluido de corte alcance a aresta principal de corte;
- **ângulo de hélice:** o ângulo entre a tangente da aresta helicoidal e a linha do eixo;
- **superfície principal de folga:** é a superfície na ponta da broca formada pela aresta de corte principal, pela profundidade da superfície lateral de folga e pela aresta transversal;
- **superfície lateral de folga:** superfície com diâmetro reduzido, para obter folga lateral;
- **superfície de saída do cavaco:** a parte na superfície do canal próximo à aresta principal de corte, onde o cavaco passa quando é removido da peça-obra;
- **quina:** é formada pelo cruzamento da aresta principal de corte e a aresta lateral.

O ângulo de ponta, definido na norma ABNT NBR 6163:1980 *apud* Machado *et al.* (2011), é formado pelo plano principal de corte (P_s) e plano secundário de corte, medido sobre o plano de referência da ferramenta (P_r). Porém, essa definição difere da norma ABNT NBR 5419:2009, que considera o ângulo de ponta como o ângulo formado pelo eixo da broca e a projeção da aresta principal de corte, em um plano passando pelo eixo da broca, paralelamente à aresta de corte.

Na FIG. 2.5 podem ser observadas as partes de uma broca helicoidal juntamente com os ângulos principais conforme a norma ABNT NBR 5419:2009 e de acordo com MACHADO *et al.* (2011).

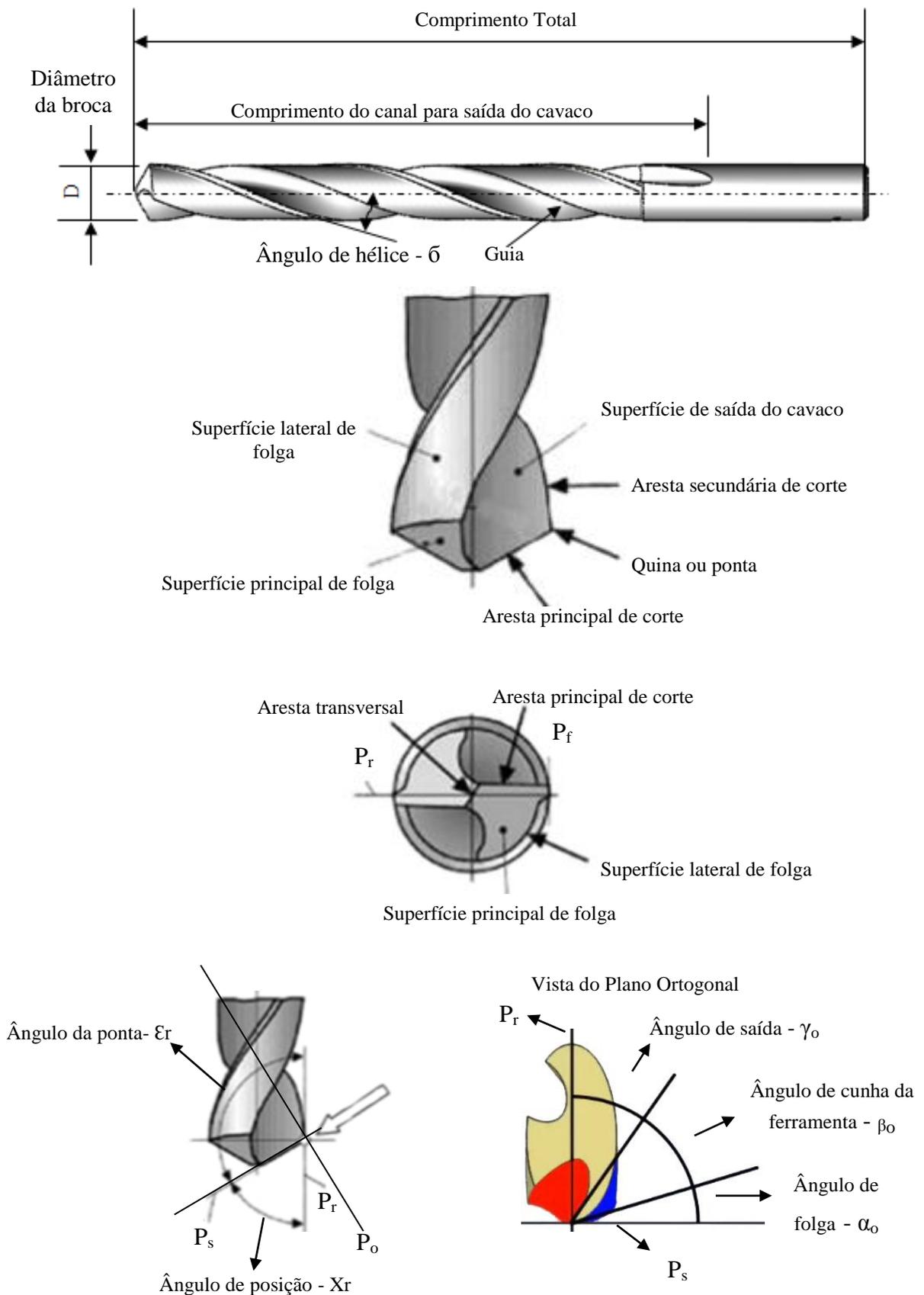


FIGURA 2. 5 - Partes de uma broca helicoidal e principais ângulos
 FONTE - ABNT NBR ISO 5419:2009 e Machado *et al.* (2011)

A broca helicoidal, assim como qualquer ferramenta de corte, tem seu desempenho afetado por sua geometria. O ângulo de hélice, o ângulo de ponta e a espessura do núcleo são os itens mais significantes, que determinam o desempenho da broca (SHAW, 1984). Compreender a geometria da ferramenta é a chave para melhorar a eficiência das operações de furação, pois permite determinar parâmetros importantes como: espessura de cavaco não deformada, relação de compressão e direção do fluxo do cavaco, qualidade da superfície usinada e a vida útil da ferramenta (ASTAKHOV, 2014).

2.4 Parâmetros de usinagem

De acordo com Marques (2012), os parâmetros de usinagem na furação podem ser administrados para o atendimento das necessidades de tempo, custo, especificação de produto, equipamento, entre outros, sendo definidos de acordo com o material a ser usinado, equipamento disponível e materiais das ferramentas. O controle dos parâmetros é indicado para a estimativa de vida das ferramentas. A resistência destas, assim como o equipamento disponível, é fator determinante para a definição dos parâmetros de usinagem permissíveis para o processo. A norma ABNT NBR 6162:1989 *apud* Machado *et al.* (2011) define os parâmetros de usinagem, conforme relacionados a seguir.

2.4.1 Velocidade de corte e velocidade de avanço

Velocidade de corte (V_c) é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido de corte. Para processos com movimentos de rotação, a velocidade de corte é calculada pela EQ. (2.1), unidades mais comuns em usinagem:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad [m/min] \quad (2.1)$$

Onde:

d = diâmetro da peça ou da ferramenta em mm;

n = número de rotações por minuto (rpm).

A velocidade de avanço (V_f) é a velocidade da ferramenta na direção do avanço, que pode ser

medida em (mm/min), sendo calculada pela EQ. (2.2):

$$V_f = f \cdot n \quad (2.2)$$

Onde:

f = avanço em mm/ revolução;

n = número de rotações por minuto.

A seleção da velocidade e do avanço adequados para cada material, a serem aplicados na operação de furação, é importante para retardar o desgaste e a quebra da ferramenta, bem como para atingir alta eficiência, pois se trata de uma questão de economia do processo para atingir o objetivo do sistema (ASTAKHOV, 2014).

2.4.2 Largura de corte

A largura de corte (b) é a largura da seção transversal de corte a ser retirada, medida na superfície em usinagem principal e segundo a direção normal à direção de corte. Em ferramentas com aresta cortante retilínea e sem curvatura na ponta, a largura de corte (b) é definida pela EQ. (2.3):

$$b = \frac{a_p}{\text{sen}(X_r)} \text{ [mm]} \quad (2.3)$$

Onde:

a_p = profundidade de usinagem [mm];

X_r = ângulo de posição da aresta principal de corte [graus].

2.4.3 Profundidade de usinagem

Conforme Stemmer (1993) a profundidade de corte (a_p) refere-se à profundidade de penetração da aresta principal, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. Na furação o a_p corresponde à metade do diâmetro da broca, conforme indicado na FIG. 2.6. O (d) diz respeito ao diâmetro da broca; o (b), à largura de corte; e o (h), à espessura de corte.

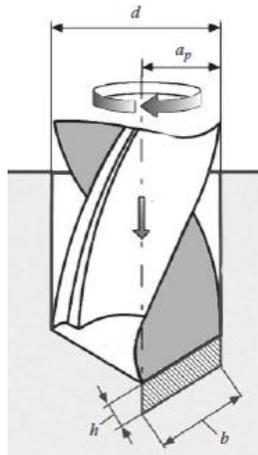


FIGURA 2. 6 - Profundidade de corte (a_p)

FONTE - Adaptado de Astakhov (2014)

2.4.4 Espessura de corte

A espessura de corte (h) é a espessura da seção transversal de corte a ser retirada e medida, na superfície, em usinagem principal, e segundo a direção perpendicular à direção de corte. Em ferramentas com arestas de corte retilíneas, ela é definida pela EQ. (3.4):

$$h = f_c \cdot \text{sen}(X_r) \text{ [mm]} \quad (2.4)$$

Onde:

f_c = avanço [mm/rev];

X_r = ângulo de posição da aresta principal de corte [graus].

2.5 Materiais para ferramentas de corte

Segundo Astakhov (2014), a seleção de um tipo de material de ferramenta de corte e sua particular classe é um fator importante a ser considerado quando se planeja uma operação de furação bem-sucedida. Uma das características mais relevantes dos materiais das ferramentas de corte é manter a dureza mesmo em temperatura elevadas, para garantir um bom desempenho da ferramenta. Nesse sentido, esse mesmo autor correlacionou a dureza dos materiais de ferramenta de corte em função da temperatura, conforme pode ser visto na FIG. 2.7.

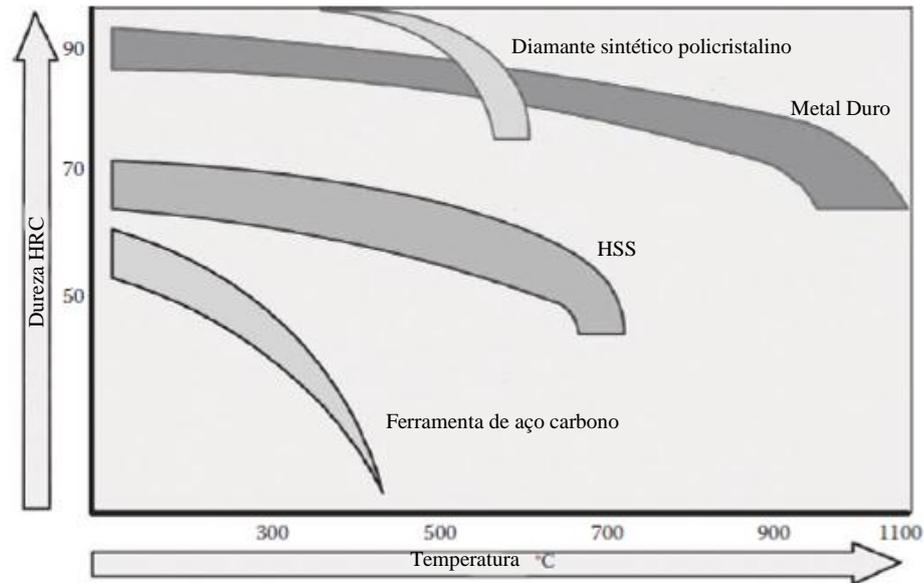


FIGURA 2. 7 - Dureza dos materiais em relação à temperatura

FONTE - Astakhov, 2014

De acordo com Klocke (2011), os materiais para ferramentas de corte devem apresentar diversas propriedades de forma a garantir a usinagem de materiais sem apresentar desgastes excessivos e/ou falhas catastróficas, tais como: dureza e resistência à compressão, resistência à flexão e à tenacidade, resistência ao cisalhamento, fortes ligações atômicas, resistência à alta temperatura, resistência à oxidação, pequena propensão à difusão e à aderência, resistência à abrasão e comportamento de desgaste progressivo.

Dentre essas propriedades, a dureza a quente e a tenacidade são fundamentais para um bom desempenho da ferramenta de corte, mas dificilmente são encontradas em um mesmo material. Machado *et al.* (2011) afirmam que tal balanço pode ser obtido por meio da produção de ferramentas com diferentes composições químicas, refinamentos dos grãos, controle dos processos de fabricação e tratamento térmico. Astakhov (2014) detalha o comportamento de cada material de ferramentas de corte utilizado na furação em relação às propriedades de dureza e tenacidade, conforme FIG. 2.8. Normalmente, alta dureza associa-se a baixa tenacidade e vice-versa. Os aços rápidos e o metal duro, atualmente, dominam o mercado e são considerados importantes materiais para a fabricação da complexa geometria da broca, devido às suas boas propriedades de tenacidade e dureza.

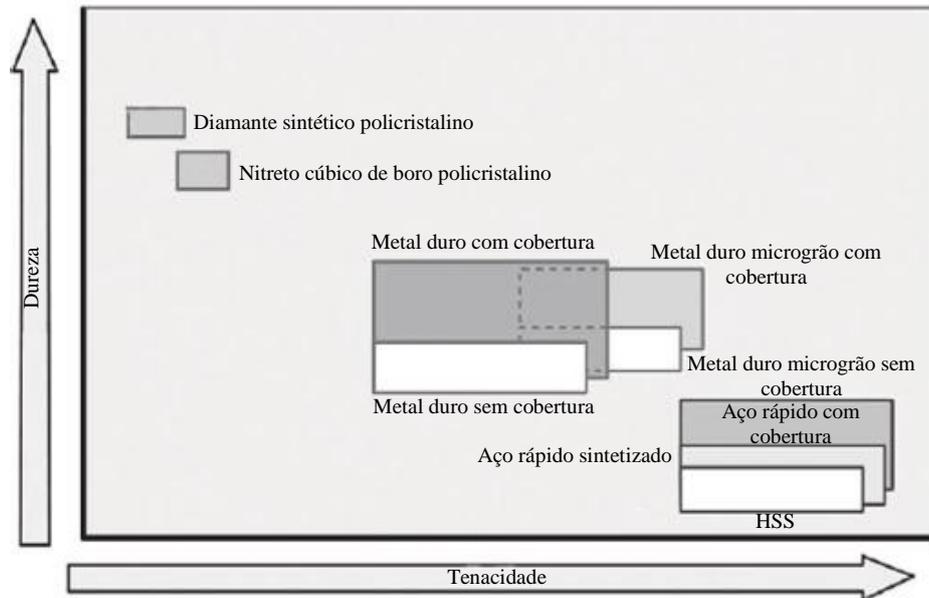


FIGURA 2. 8 - Dureza e tenacidade dos materiais das ferramentas utilizadas no processo de furação

FONTE - Adaptado de Astakhov, 2014

Desta forma, na seleção de um material para a fabricação de brocas, devem ser consideradas a resistência ao desgaste (dureza a quente) e a tenacidade como os principais critérios de escolha, devido ao desgaste por abrasão e aos esforços (forças de compressão, flexão e torção) estarem presentes no processo (KÖNIG e KLOCKE, 1997).

A seguir, apresentam-se as principais características do aço rápido, material das ferramentas de corte que pode ser empregado na furação do ferro fundido nodular.

2.5.1 Aço rápido

O desenvolvimento do aço rápido (*High Speed Steel* - HSS) teve como marco o início do século XIX, sendo desenvolvido por Frederick Winslow Taylor e Maunsel White (MACHADO *et al.*, 2011). Esse material apresenta elementos de liga como tungstênio, molibdênio, carbono, cromo, vanádio e cobalto. O seu nome HSS provém do fato de que era o tipo de material que suportava maiores velocidades de corte entre os demais (TRENT E WRIGHT, 2000).

A *American Iron and Steel Institute* (AISI) introduziu símbolos para as duas maiores classes, sendo o símbolo T designado aos aços, tendo sua base com tungstênio; enquanto o símbolo M apresenta molibdênio nos aços HSS. Estas categorias, por sua vez, são divididas em dois

subgrupos: com e sem cobalto. Os aços rápidos ainda possuem, em sua composição, cromo e vanádio (SHAW,1984). A TAB. 2.2 apresenta a classificação, a composição e as características dos aços rápidos.

TABELA 2. 2 - Composição e características dos aços rápidos

Tipo de Aço	Classificação SAE	%C	%Mn	%Si	%Cr	%V	%W	%Mo	%Co	Tenacidade	Resistência ao desgaste	Dureza a quente
ao W	T1	0,7	0,3	0,25	4,0	1	18	-	-	Baixa	Média	Muito boa
	T2	0,85	0,3	0,25	4,0	2	18	-	-			
	T3	1	0,3	0,25	4,0	3	18	-	-			
	T7	0,8	0,3	0,25	4,0	2	14	-	-			
	T9	1,2	0,3	0,25	4,0	4	18	-	-			
ao W-Co	T4	0,75	0,3	0,25	4,0	1	18	-	5	Baixa	Alta	Excelente
	T5	0,8	0,3	0,25	4,0	2	18	-	8			
	T6	0,8	0,3	0,25	4,0	1,5	20	-	12			
	T8	0,8	0,3	0,25	4,0	2	14	-	5			
ao Mo	M1	0,8	0,3	0,25	4,0	1	1,5	8	-	Baixa	Média	Muito boa
	M2	0,85	0,3	0,25	4,0	2	6	5	-			
	M3	1	0,3	0,25	4,0	2,75	6	5	-			
	M4	1,3	0,3	0,25	4,0	4	5,5	4,5	-			
	M10	0,85	0,3	0,25	4,0	2	-	8	-			
ao Mo-Co	M6	0,8	0,3	0,25	4,0	1,5	4	5	13	Baixa	Alta	Excelente
	M30	0,85	0,3	0,2	4,0	1,25	2	8	5			
	M34	0,85	0,3	0,25	4,0	2	2	8	8			
	M35	0,85	0,3	0,25	4,0	2	6	5	5			
	M36	0,85	0,3	0,25	4,0	2	6	5	8			

FONTE - Adaptado de Diniz *et al.* (2013) *apud* Chiaverini, 1981

Segundo Shaw (1984), a dureza e a resistência do HSS dependem da composição, do tamanho e da distribuição dos carbonetos no aço e sobre a estabilidade da matriz em temperaturas elevadas. A mistura de carbonetos mais duros é atribuída ao aumento do teor dos elementos carbono e vanádio.

Chiaverini (2012) detalha os principais elementos de liga dos aços rápidos com seus respectivos efeitos:

- **carbono:** atua no sentido de aumentar a dureza e a temperabilidade do material. À medida que o carbono aumenta, cresce a formação de carbonetos complexos, que possibilitam a obtenção de melhores durezas e resistência ao desgaste;
- **tungstênio e molibdênio:** ambos são formadores de carbonetos, responsáveis pela elevada resistência ao desgaste e dureza a quente do aço rápido. O tungstênio está sempre presente e o molibdênio é introduzido como seu substituto parcial, gerando outras classes de aços rápidos. Como apresenta peso atômico de, aproximadamente, metade do peso do

tungstênio, a mesma porcentagem em peso produz o dobro de átomos para se ligar ao carbono do aço, usando 1% de molibdênio para substituir 1,6 a 2,0 % de tungstênio;

- **vanádio e nióbio:** o carboneto de vanádio é o mais duro encontrado nos aços rápidos. Os aços com alto teor de carbono e vanádio são os que possuem melhor resistência ao desgaste. O vanádio também aumenta a dureza a quente, que atribui melhor eficiência de corte. No Brasil, o vanádio é mais caro e tem sido substituído pelo nióbio, por possuírem características semelhantes;
- **cromo:** é o elemento que combina as melhores condições de dureza com tenacidade nos aços rápidos. Juntamente com o carbono, o cromo é o principal responsável pela alta temperabilidade dos aços rápidos, além de diminuir a oxidação do aço durante o tratamento térmico;
- **cobalto:** aumenta a dureza a quente, elevando, em consequência, a eficiência das ferramentas em operações de usinagem em que se verificam altas temperaturas. Por essa razão, os aços rápidos com cobalto são considerados excelentes nas operações de desbaste ou de corte muito profundo.

Segundo Marmentini (2009), para condições especiais de usinagem, as brocas de aço rápido podem ser aplicadas, já que elas apresentam maior tenacidade. Porém, contam com a peculiaridade de serem mais sensíveis à temperatura, já que o aço rápido apresenta uma drástica redução da sua dureza em temperaturas acima de 600°C, acelerando, assim, o processo de desgaste por abrasão.

Dentre as principais aplicações do aço rápido como ferramenta de usinagem, podem ser citadas as brocas, fresas inteiriças, cossinetes, brochas e até em ferramentas de barra para a aplicação em torneamento de peças com geometrias especiais. A presença dos elementos de liga e tratamento térmico atribuíram aos aços rápidos importantes características para o processo de usinagem, como dureza e tenacidade, e permitiram também aumento da velocidade de corte cerca de 10 vezes, em comparação às ferramentas de aço carbono, revolucionando as práticas de usinagem, na época (MACHADO *et al.*, 2011).

Como forma de melhorar o desempenho das ferramentas, o uso de revestimentos surgiu como uma alternativa objetiva para esse fim. Alguns dos revestimentos empregados nas ferramentas de aço rápido são: TiN, TiCN, TiAlN e Nitreto de cromo alumínio (AlCrN), que são depositados sobre o substrato da ferramenta pelo processo PVD, realizado em temperaturas

que não prejudicam o tratamento térmico efetuado previamente nos aços rápidos (DINIZ et al. 2013).

Nos próximos tópicos, serão detalhadas as características dos revestimentos e suas influências, os métodos de deposição e os revestimentos aplicados a esta dissertação.

2.5.2 Revestimentos para ferramentas de corte

Segundo Astakhov (2014), os revestimentos melhoram o desempenho das ferramentas de corte, trabalhando no sentido de aumentar a vida da ferramenta mesmo em condições mais adversas como na usinagem a seco e ou permitindo a usinabilidade de difíceis materiais. Entre outros, os revestimentos apresentam características, tais como:

- alta dureza superficial e por consequência maior resistência ao desgaste (desgaste abrasivo, adesivo, flanco ou desgaste de cratera);
- menor coeficiente de atrito, reduzindo as forças de corte e melhorando a qualidade da superfície das peças acabadas;
- dificulta aderência nas superfícies de contato;
- baixa condutividade térmica, reduzindo o calor gerado pela presença do cavaco.

Holmberg e Matthews (2009) afirmam que as propriedades requeridas pelo substrato e pelo revestimento envolvem a resistência do material e os atributos térmicos, os quais são determinados pela sua composição e microestrutura, bem como pela porosidade e homogeneidade do material. Na interface entre eles, a aderência e a resistência ao cisalhamento da junção são importantes. Na superfície do revestimento, a reatividade química e a rugosidade devem ser consideradas em adição à tensão de cisalhamento.

Dessa forma, Kalpakjian e Schmid (2010) relatam que as ferramentas revestidas são usadas em cerca de 40 a 80 % de todas as operações de usinagem, principalmente nas operações de torneamento, fresamento e furação. Elas podem ter uma vida dez vezes maior em relação às ferramentas não revestidas, permitindo velocidades de corte elevadas e reduzindo, assim, tanto o tempo necessário para operações de usinagem quanto os custos de produção.

Os materiais de revestimento mais comumente disponíveis em ferramentas de corte

comerciais: são: TiN, TiC, TiCN e Al₂O₃ (KALPAKJIAN; SCHMID, 2010). Estes revestimentos apresentam uma gama de espessura de 2 a 15 µm e são aplicados em ferramentas de corte, insertos por duas técnicas: CVD e PVD, incluindo a deposição de vapor químico assistido por plasma (PCVD - *Plasma-Assisted Chemical-Vapor Deposition*) (KLOCKE, 2011).

No próximo tópico, serão apresentados os processos de deposição CVD e PVD, que são os mais utilizados no mercado, pois trabalham com uma grande variedade de componentes e composições para revestimento de ferramentas de corte. Destaca-se o processo PVD, pois é o método comumente aplicado ao revestimento de brocas de aço rápido.

2.5.3 Processos para cobertura de ferramentas

De acordo com Mattox (1998), o processo CVD é a deposição de átomos ou moléculas pela alta temperatura de redução ou pela decomposição de uma espécie precursora de vapor químico que contém o material a ser depositado. Normalmente, a redução é realizada pelo hidrogênio em elevadas temperaturas, geralmente entre 800 e 1200°C, e a decomposição é acompanhada pela ativação térmica. O material depositado pode reagir com outras espécies gasosas no sistema, dando origem a compostos. Em geral, o processo CVD é acompanhado pela reação volátil de subprodutos e espécies precursoras não utilizadas.

Por sua vez, o processo PVD envolve atomização ou vaporização do material de uma fonte sólida e a deposição desse material sobre o substrato, para formar um revestimento. A temperatura de deposição do revestimento PVD é menor que a do processo CVD; reduzindo os danos ao substrato, tais como a diminuição da dureza durante o revestimento ou alterações geométricas. Embora o processo PVD tenha sido inicialmente utilizado como um meio de deposição de filmes metálicos, a aplicação dessa técnica tem sido utilizada para a deposição de revestimentos cerâmicos (HOLMBERG; MATTHEWS, 2009). De acordo com Mattox (1998), o material é vaporizado a partir de uma fonte sólida ou líquida, na forma de átomos ou moléculas, e transportado, na forma de vapor, por meio de um vácuo ou baixa pressão gasosos (ou plasma), ao substrato onde se condensa. As principais categorias de processamento PVD são: evaporação a vácuo, deposição por pulverização catódica (*sputtering*) e deposição assistida por feixes de íons. Os materiais compostos, como TiN e nitreto de zircônio (ZrN),

são depositados de forma reativa, por pulverização catódica, utilizando-se um gás no plasma. A TAB. 2.3 apresenta uma comparação entre as características dos processos PVD e CVD, conforme detalhado por Mitsubishi (2006) e Fukui (2016).

TABELA 2. 3 - Comparação dos processos CVD e PVD

	CVD	PVD
Princípio	Gás reativo em altas temperaturas	Evaporação, pulverização, deposição por íons
Temperatura de deposição	800 a 1000 °C	400 a 600 °C
Material do filme	TiC, TiN, TiCN, Al ₂ O ₃	TiN, TiCN, TiAlN, TiSiN, CrN
Espessura revestimento	5-20 µm	0,5-5 µm
Tenacidade	Reduzida	Não é afetada
Adesão ao substrato	Maior aderência, permite camadas espessas	Menor aderência, permite camadas finas
Revestimentos com óxidos	Possível revestir com óxidos termoestáveis	Difícil aplicar óxidos
Substrato	Limitado	Vários substratos
Aresta de corte	Não podem ser aplicados a arestas agudas	Aplicável a ferramenta que exigem maior agudez
Principais aplicações	Torneamento e mandrilhamento	Fresamento, roscamento e furação

FONTE - Adaptado de Mitsubishi (2006) e Fukui (2016)

2.5.4 Revestimento com nitreto de titânio

Os revestimentos de TiN são amplamente utilizados para melhorar o acabamento superficial, estender a vida da ferramenta e aumentar a produtividade. Há cerca de quarenta anos, a primeira geração de ferramentas revestidas com PVD mostrou o TiN como um revestimento que fornece boa proteção contra corrosão e boas propriedades antidesgaste (BLANCO *et al.*, 2016).

Chatterjee *et al.* (1992), relataram que o uso desse revestimento apresenta boas aplicações devido ao excelente desempenho no aumento das taxas de remoção de material e resistência ao desgaste e à corrosão, além de apresentar alta dureza, resistência a altas temperaturas e uma boa adesão ao substrato.

Paldey e Deevi (2003) mencionaram que as características do revestimento de TiN, como a alta dureza a quente, resistência superior à oxidação e baixa condutividade térmica, fazem esse revestimento ser mais desejável na usinagem a seco e na usinagem de ligas abrasivas em altas velocidades. De acordo com Aboukhashaba (2013), o revestimento de TiN tornou-se importante para estender a vida do aço rápido e de outras ferramentas de corte. É um

revestimento com aparência amarelo-dourado, com alto ponto de fusão (>2000°C) e alta estabilidade química.

Cardoso (2015) realizou um estudo sobre o revestimento de brocas de aço rápido M2 na furação de ferro fundido nodular FE45012. O autor comparou o desempenho de brocas revestidas com TiN, brocas com tratamento termoquímico de boretação sólida e brocas sem revestimento. Fizeram-se os ensaios de furação tendo como parâmetros velocidades de corte 20 e 35 m/min e avanço de 0,1 e 0,2 mm/rev. O desgaste das brocas sem revestimento e com revestimento de boro foi mais intenso com o aumento da velocidade de corte e do avanço, apresentando aderência de material na aresta transversal. A broca revestida de TiN foi a que apresentou melhor comportamento em relação ao desgaste e sem aderência de material na aresta de corte.

2.5.5 Revestimentos pelo método sol-gel

As técnicas de deposição de filmes finos podem ser divididas em três grupos principais: i) *sputtering* e deposição iônica assistida; ii) deposição PVD e CVD e iii) crescimento de filme em fase líquida, como é efetuado para o processo sol-gel (MINASSIAN-SARAGA, 1994 *apud* ALVES *et al.*, 2002).

O método sol-gel é diferente de alguns processos de deposição, pois é realizado a baixas temperaturas. Ao contrário do processo CVD que dependem de altas temperaturas para o recobrimento de filmes, uma vez que os seus precursores são pirolizados ou evaporados (fenômeno de decomposição térmica) antes da etapa de deposição.

2.5.5.1 Introdução e aplicações do método sol-gel

O método sol-gel apresenta diversas vantagens, dentro das quais se destaca a fácil aplicação, baixo custo, equipamento de deposição simples, fácil fabricação de filmes em grande área e fácil ajuste de composição. Este processo é adequado especialmente para a fabricação de revestimentos compostos (YAZICI *et al.*, 2016).

Sakka *et al.* (1992) e Marsal *et al.* (2013) apresentam as aplicações para os revestimentos de sol-gel: revestimento anticorrosão e barreiras térmicas ou filmes de alto desempenho

eletroquímico. Além disso, por ser processado em baixas temperaturas, é empregado para revestimento de semicondutores e dispositivos eletrônicos, e, devido a sua baixa espessura, é aplicado em alguns dispositivos ópticos.

Os materiais sol-gel são sólidos metaestáveis formados em reações cinematicamente controladas a partir de precursores moleculares. Um sol é uma suspensão estável de partículas coloidais (nanopartículas) em um líquido. As partículas podem ser amorfas ou cristalinas, e podem ter partículas densas, porosas ou subestruturas poliméricas (devido à agregação de unidades químicas subcoloidais). Um gel consiste em uma rede sólida porosa, tridimensionalmente contínua, envolvendo e suportando uma fase líquida contínua nos seus poros ("gel molhado"). Os sistemas sol-gel para a síntese de materiais óxidos devem-se à formação de ligações primárias entre as partículas de sol. A estrutura de uma rede de gel depende do tamanho e da forma das partículas do sol (LEVY, 2015). O uso do sol ou da suspensão estabilizada permite a deposição de camada superficial.

2.5.5.2 Deposição do revestimento sol-gel

De acordo com Guglielmi (1997), os revestimentos sol-gel em metais apresentam um potencial interesse tecnológico. As películas derivadas de sol-gel podem ser depositadas em metais para melhorar sua resistência à oxidação e à corrosão ou para modificar suas propriedades superficiais. Wang *et al.* (2009) citaram que o revestimento sol-gel apresenta excelente estabilidade química e controle de oxidação, além de aumentar a resistência à corrosão, para substratos metálicos. O dióxido de silício (SiO_2), dióxido de zircônio (ZrO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), dióxido de titânio (TiO_2) e óxido de cério (CeO_2) demonstram boa estabilidade química e podem fornecer efetiva proteção no substrato metálico.

Segundo Gouveia (2013) e Sanchez *et al.* (2002), os métodos de deposição da solução sol-gel em substratos por: imersão, pulverização, centrifugação e, mais recentemente, eletrodeposição. O método de imersão (em inglês, *dip-coating*) é o mais antigo e usado no setor de pesquisa e desenvolvimento e consiste basicamente em quatro etapas, conforme ilustrado na FIG. 2.9:

- imersão do substrato para o interior da solução sol-gel;
- permanência por um tempo determinado;
- emersão a uma velocidade constante com temperatura e atmosfera controladas;

- evaporação dos solventes (essencialmente álcoois e água) levando à concentração, agregação e gelificação das espécies não voláteis (etapa de secagem).

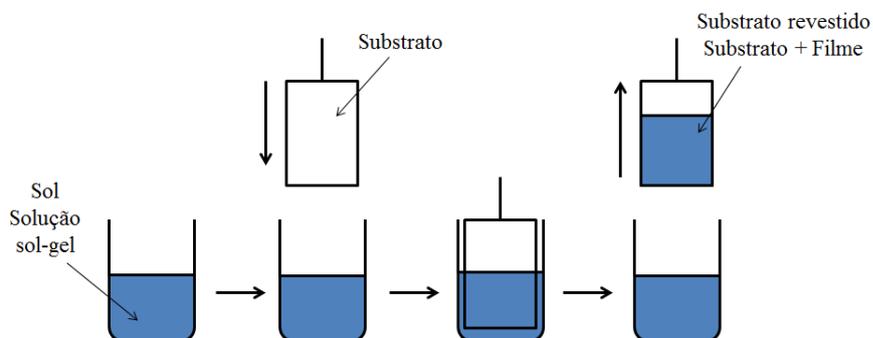


FIGURA 2. 9 - Representação esquemática do processo de obtenção de filmes por “*dip-coating*”

FONTE - O autor (2016)

Chen *et al.* (2000) afirmam que a espessura dos revestimentos preparados pelo método sol-gel por *dip-coating* é afetada por vários fatores, tais como: a concentração de óxido, a viscosidade do sol, a taxa de retirada, a temperatura e o tempo de aquecimento. Além disso, a molhabilidade do sol sobre a superfície do substrato deve ser boa e a propagação do sol na superfície do substrato deve ser uniforme, para assegurar que os revestimentos sejam densos, uniformes e firmemente ligados ao substrato.

2.5.5.3 Comportamento do revestimento sol-gel no processo de usinagem

Rezende *et al.* (2017) realizaram a furação do material compósito Polietileno Alumínio Laminado (PEALL) utilizando brocas helicoidais de aço rápido M2, com diâmetro de 5 mm, revestidas por TiO_2 , pelo método sol-gel e sem revestimento. Com relação à formação de rebarbas, observou-se que a presença do revestimento influenciou na redução da altura da rebarba. O revestimento contribuiu para um baixo coeficiente de atrito, que favoreceu o cisalhamento do material, evitando a formação de rebarbas maiores.

Chen *et al.* (2000) estudaram a durabilidade de ferramentas de corte, inserto de metal duro revestido com alumina, pelo método sol-gel e por CVD (revestimento de TiC e Al_2O_3). Os resultados mostraram que a vida da ferramenta revestida pelo método sol-gel foi maior que a da ferramenta sem revestimento. Embora sua durabilidade tenha sido menor que a da ferramenta revestida por CVD, seu desempenho parece promissor.

Silva (2015) realizou um estudo na furação a seco de ferro fundido cinzento com brocas helicoidais de aço rápido M2, diâmetro de 10 mm, revestidas com SiO_2 , pelo processo sol-gel, sendo três camadas o revestimento de SiO_2 , broca sem revestimento e com o mesmo tratamento térmico da brocas revestidas; e broca sem revestimento e sem tratamento térmico, nas velocidades de corte 30, 40 e 50 m/min e avanços de 0,05 e 0,25 mm/rev. A broca com revestimento de SiO_2 foi capaz de realizar 50% de furos a mais antes de atingir a falha, apresentando menor desgaste quando comparada às brocas sem revestimento. Em relação ao diâmetro médio e à rugosidade, a broca revestida executou furos com melhor precisão e menor rugosidade em relação às brocas sem revestimento.

Os resultados obtidos por Silva (2015) permitem pressupor que ferramentas de HSS revestidas por SiO_2 apresentaram um desempenho melhorado. O método sol-gel pode ser promissor para revestimento de aço rápido nas ferramentas de corte, pois esse material não suporta altas temperaturas sem mudança microestrutural, que altera suas boas propriedades, como dureza, tenacidade e resistência ao desgaste.

Como forma de melhor entender os fenômenos envolvidos na interação entre as superfícies revestidas e sem revestimento, detalham-se a seguir o comportamento tribológico e fatores que influenciam no desgaste, atrito e taxa de desgaste do ferro fundido nodular, material usado neste estudo e em outros tipos de materiais.

2.6 Tribologia na usinagem

A tribologia desempenha um papel importante na discussão do comportamento de pares tribológicos, envolvendo materiais com ou sem revestimento, influenciados pela velocidade de deslizamento, variação de cargas, alteração da camada superficial de materiais e outros parâmetros, por meio da análise do coeficiente de atrito, força de atrito e taxa de desgaste. A seguir, serão apresentados alguns trabalhos envolvendo a tribologia e alguns fatores que influenciam no comportamento do par tribológico de alguns materiais, como o ferro fundido nodular e revestimentos depositados pelo método sol-gel discutido nesta dissertação. Sabe-se que o atrito entre o cavaco e a ferramenta apresenta influência no processo de usinagem em relação à força de corte, qualidade da superfície usinada, rebarbas, desgaste de ferramentas e formação do cavaco.

2.6.1 Fatores que afetam o comportamento tribológico

Ceschini *et al.* (2016) esclarecem que os nódulos de grafita, dispersos na matriz ferrítica, promovem larga ductilidade e boa resistência à fadiga, e seu comportamento tribológico depende da matriz e da morfologia da grafita. Pagano *et al.* (2016) retratam que, em relação ao comportamento tribológico do ferro fundido nodular, as microestruturas ferríticas apresentam boa resistência sob condições onde ocorrem atrito e abrasão moderados.

O ferro fundido nodular é um material heterogêneo. Um estudo microscópico mostrou que danos são produzidos pelas cavitações plásticas e pela instabilidade da ductilidade da matriz que envolve a grafita esferoidal, as quais atuam como uma cavidade (TKAYA, 2009). Esse mesmo autor estudou o papel da grafita no comportamento tribológico durante um *scratch* (teste), para simular os elementos abrasivos do ferro fundido nodular. Foi utilizado um indentador cônico, com variação do ângulo de ataque (10° , 30° e 45°) e cargas normal entre (2 N a 25 N), deslizando sobre o ferro fundido nodular com velocidade de deslizamento de 0,1 mm/s e distância fixa percorrida de 5 mm. Quando o indentador encontrou um nódulo de grafita, houve um processo de remoção deste, ocorrendo diversos fragmentos na superfície, que, juntamente com o vazio provocado por essa remoção, tornaram a superfície mais áspera, acelerando o desgaste. Os efeitos da grafita sobre a abrasão do ferro fundido nodular foram intensificados para maiores ângulos de ataque e maiores cargas aplicadas.

Em geral, a presença da grafita na tribologia tem efeito lubrificante que auxilia na redução do desgaste e do coeficiente de atrito. Entretanto, no trabalho de Tkaya (2009), verificou-se que a grafita apresentou comportamento contrário, pois a grafita do ferro fundido nodular contribuiu para acelerar o processo de desgaste por abrasão e seu efeito foi mais intenso com o aumento da carga e do ângulo de ataque devido ao processo de remoção dos nódulos de grafita.

O efeito da velocidade de deslizamento na taxa de desgaste e no coeficiente de atrito, para os materiais de ferro fundido cinzento, nodular, vermicular com tratamento de austêmpera, foi estudado por Ghaderi *et al.* (2003). Os testes de desgaste por deslizamento foram realizados pelo par tribológico bloco e anel, sendo o bloco em ferro fundido com tratamento de austêmpera; e o anel, feito de uma roda de trem a velocidades de rotação de 250 e 950 rpm e com tensão nominal de 2MPa. À medida que a velocidade de rotação aumentou, ocorreu

elevação da taxa de desgaste para todos os materiais com tratamento. Quanto ao mecanismo de desgaste, o aumento da velocidade elevou a temperatura e afetou as propriedades das superfícies das amostras, pois a taxa de oxidação aumentou e contribuiu para um desgaste suave. O coeficiente de atrito, para todas as amostras, diminuiu com o aumento da velocidade de rotação. Essa redução foi atribuída à formação de óxidos nas superfícies desgastadas e à presença de grafite na superfície, proveniente do ferro fundido.

Pesquisadores relatam a influência da temperatura sobre a velocidade de deslizamento e suas interferências no coeficiente de atrito. Rabinowicz (1995) constatou mudanças no atrito com o aumento da temperatura, o qual causou queda no atrito, devido à formação de uma fina camada de óxido, e reduziu a interação metálica. Hutchings (1992) também correlacionou os mecanismos de remoção de material, que dependem das condições da carga normal, da velocidade e da temperatura. A velocidade de deslizamento determina uma relativa importância para a temperatura. Em baixas velocidades, a condução do calor para fora da interface é rápida e a temperatura de interface permanece baixa; porém, para altas velocidades, a temperatura na interface é alta, levando a uma interação química das superfícies, causando o crescimento de filmes óxidos e reduzindo a resistência mecânica das asperezas próximas à superfície do material.

A dureza também interfere no comportamento tribológico, como pode ser visto no trabalho de Pagano *et al.* (2016), que estudaram o comportamento tribológico do ferro fundido nodular ferrítico EN-GJS400-12, em comparação com o tratamento de modificação a laser, no estado sólido, que alterou a microestrutura superficial devido à dissolução dos nódulos da grafita e à difusão de carbono na atmosfera da matriz austenítica, com conseqüente aumento de dureza. O teste no tribômetro foi investigado por meio de ensaios de deslizamento a seco, plano sobre o cilíndrico, o qual era um aço cementado. A dureza do ferro fundido nodular sem tratamento era de 160 HV e $R_a = 0,3 \mu\text{m}$; já a superfície tratada apresentou dureza de 1100 HV e $R_a = 0,3 \mu\text{m}$. Aplicou-se uma carga de 10 N, velocidade de deslizamento de 0,3 m/s e distância de deslizamento de 1000 m. Quanto aos valores de coeficiente de atrito, para o ferro fundido nodular não tratado, obteve-se um valor médio de 0,54. A presença da grafita, que atuou como lubrificante sólido, contribuiu para a redução do coeficiente de atrito. Para o ferro fundido nodular tratado, o coeficiente de atrito apresentou um valor médio de 1,14. Esse comportamento pode ser atribuído à mudança na microestrutura, em decorrência do tratamento a laser, que apresentou uma dissolução parcial da grafita, reduzindo seu efeito

lubrificante. Outro fator associado foi a presença de cementita e martensita, que aumenta a dureza do material e, conseqüentemente, induz a um aumento do coeficiente de atrito. Quanto à perda de volume, o aumento da dureza do material tratado contribuiu para reduzi-la, apresentando maior resistência ao desgaste, ao contrário do material sem tratamento. A superfície desgastada do ferro fundido nodular não tratado mostrou evidências de deformação plástica, com ranhuras paralelas à direção de deslizamento influenciadas pela baixa dureza do material. Para o ferro fundido nodular tratado, parcialmente coberto por óxido de ferro, devido à ação abrasiva do cilíndrico, as partículas levaram a um moderado regime de desgaste tribooxidativo.

Yazici *et al.* (2016) estudaram o comportamento do par tribológico de um corpo de prova de uma liga de titânio puro revestido pelo filmes compostos de $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ (dióxido de titânio e dióxido de silício) depositados pelo método sol-gel com diferentes tempos de envelhecimento, sendo eles: não envelhecidos e envelhecidos com 1, 3 e 10 semanas, comparados com amostra sem revestimento, deslizando contra um pino de diâmetro de 6mm, material cerâmico Al_2O_3 , que apresenta alta dureza e inércia química. O revestimento foi depositado pelo método *dip coating* a uma velocidade de 10 cm/min. O processo de imersão e secagem foi repetido três vezes. O teste no tribômetro foi realizado com carga constante de 1 N, distância de deslizamento de 141 m e velocidade de deslizamento de 5,22 m/min. O comportamento tribológico foi influenciado pelo revestimento e pelo tempo de envelhecimento do sol, pois o aumento do tempo de envelhecimento resultou na ampliação do tamanho dos grãos e, como consequência, em menor dureza e aumento do coeficiente de atrito. Os menores tamanhos de grãos foram para os compostos de filmes não envelhecidos, pois a redução do tamanho do grão contribuiu para elevar a dureza superficial do revestimento composto. O filme composto não envelhecido demonstrou menor coeficiente de atrito e menor taxa de desgaste, porque a presença do filme revestido apresentou uma menor área de contato e maior resistência ao desgaste, influenciado também pelo aumento da dureza superficial. Quanto às pistas geradas do ensaio pino sobre disco, observou-se uma maior diferença na largura para as amostras com maior tempo de envelhecimento. A pista do corpo de prova revestido não envelhecido exibiu menor largura, e a amostra sem revestimento obteve maior coeficiente de atrito, seguido de altas taxa de desgaste e aumento da largura da pista, proporcionando baixa resistência ao desgaste e, conseqüentemente, ocasionando um desgaste severo e abrasivo.

Em suma, os trabalhos citados apontam que a grafita do ferro fundido desempenha um papel

tribológico importante, pois ela contribui para minimizar o desgaste e reduzir o coeficiente de atrito. No entanto, o seu comportamento dependerá das propriedades metalúrgicas dos materiais, como resistência, dureza e microestrutura, além das condições dos parâmetros do sistema tribológico, que, em alguns casos, podem contribuir no desgaste abrasivo. Outros fatores que influenciam no coeficiente de atrito e na taxa de desgaste foram relatados, como a temperatura, a dureza e a presença de revestimentos.

Nos próximos itens, serão apresentados a influência da força, a integridade superficial, os desvios dimensionais e geométricos, as rebarbas, a formação do cavaco e os mecanismos de desgaste provenientes da operação de furação.

2.7 Força na usinagem

A medição dos esforços de corte nos processos de usinagem é importante na avaliação das condições de corte dos processos de furação. Além disso, o conhecimento da magnitude das forças atuantes permite também um melhor entendimento dos fenômenos de formação de cavaco e dos mecanismos de desgaste envolvidos no processo de usinagem (KÖNIG e KLOCKE, 1997). Neste sentido, pode-se afirmar que as forças na furação são influenciadas por fatores tais como: o material da peça de trabalho, o estado metalúrgico, as propriedades mecânicas, a geometria e o material da ferramenta, os parâmetros de corte empregados e outras particularidades do sistema (ASTAKHOV, 2014).

A força de usinagem é a resultante composta pelas forças de corte (F_c), passiva (F_p) e de avanço (F_f), provocadas pela reação aos movimentos de rotação da ferramenta e de avanço. A força de corte é decorrente da resistência ao corte do material usinado e é, predominantemente, a responsável pelo momento torsor gerado no processo. As forças passivas, atuantes nas duas arestas principais, anulam-se mutuamente devido à simetria das arestas principais em relação ao eixo central. A força de avanço é ocasionada pela resistência ao corte do material (penetração da ferramenta) no sentido do avanço (KÖNIG e KLOCKE, 1997).

Conforme citado por Ferraresi (1970), as forças que atuam sobre uma broca helicoidal durante o corte geram esforços de torção (devido à rotação da broca) e de compressão, devido ao

avanço da broca. Segundo Mocellin (2004) e Bork (1995), as forças de corte na furação não são medidas diretamente, sendo calculadas a partir da medição do momento torsor. A força de avanço pode ser aferida diretamente durante a furação.

2.7.1 Força na usinagem no ferro fundido nodular

Uma das características dos ferros fundidos, diz respeito principalmente os flocos de grafita, que ocupam uma área apreciável na extensão dos planos de cisalhamento que contribuem para reduzir as forças de usinagem (TRENT E WRIGHT, 2000).

Por outro lado, Lau *et al.* (2000), alertam a influência do desgaste em relação os esforços de corte, pois quanto maiores os níveis de desgaste, maiores serão as forças de usinagem no ferro fundido nodular.

Barbosa *et al.* (2009) avaliaram a furação do ferro nodular perlítico (FE 70003) e do ferro vermicular (FV 450) quanto à força de avanço e torque, em relação à velocidade de corte e avanço. Utilizaram brocas de aço rápido M2, revestidas com TiN, e a influência do tipo de aplicação de fluido de corte por jorro e mínima quantidade de fluido (MQF). As velocidades de corte testadas foram de 25 e 35 m/min, e os avanços, de 0,15 e 0,25 mm/rev. Os autores observaram que, ao ampliar o avanço de 0,15 para 0,25 mm/rev., os valores das forças de avanço aumentaram. O aumento do avanço eleva diretamente as áreas de cisalhamento primário e secundário, ampliando a força de avanço dos dois materiais, conforme a FIG. 2.10.

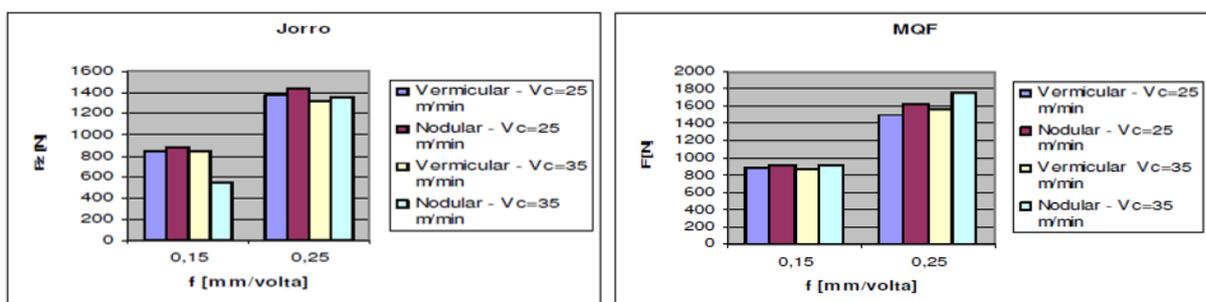


FIGURA 2. 10 - Força de avanço média (F_z) em função da variação do avanço (f) com aplicação de fluido de corte por jorro e MQF

FONTE - Barbosa *et al.* (2009)

Grzesik *et al.* (2009) registraram o comportamento das forças de usinagem no torneamento do

ferro fundido nodular perlítico-ferrítico (EN-GJS-500-07), utilizando ferramentas de metal duro ISO-P20 nas seguintes condições: sem revestimento, com uma camada de revestimento de TiAlN e múltiplas camadas de TiC/Ti(C,N)/Al₂O₃/TiN, comparadas com a ferramenta de cerâmica de Nitreto de silício (Si₃N₄). As forças de corte foram mais elevadas para a ferramenta de nitreto de silício e para a ferramenta sem revestimento. As menores forças foram atribuídas para a ferramenta com múltiplas camadas de revestimento devido aos menores valores de coeficiente de atrito para essa ferramenta, conforme indicado na FIG. 2.11 (a). Essa mesma tendência foi mantida quando se comparou a força de corte em relação ao avanço, ou seja, quando aumentou a taxa de avanço, a força de avanço aumentou, sendo a ferramenta com múltiplas camadas de revestimento que apresentou as menores forças, conforme é detalhado na FIG. 2.11 (b).

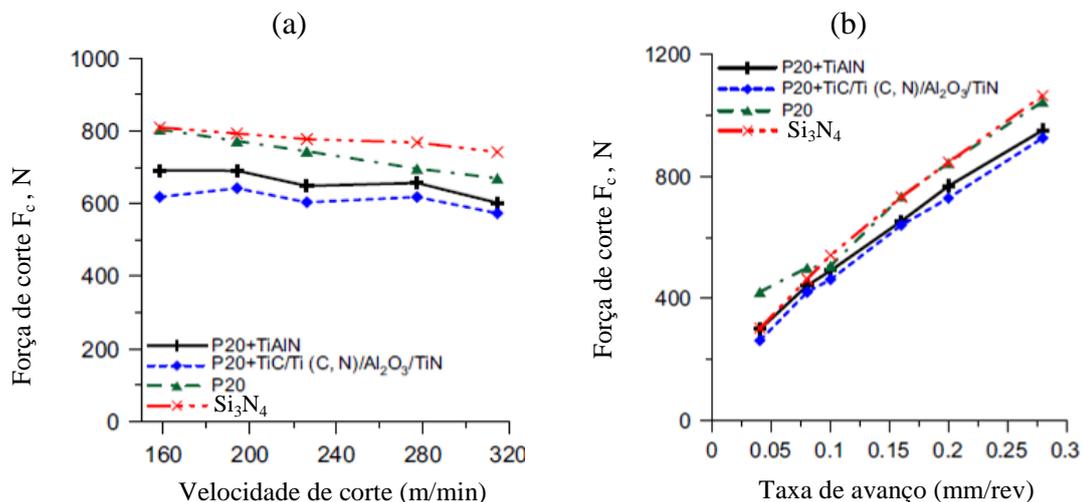


FIGURA 2. 11 - a) Influência da velocidade de corte, b) Influência da taxa de avanço

FONTE - Grzesik *et al.* (2009)

Yigit (2008) estudou o torneamento do ferro fundido nodular perlítico utilizando três tipos de ferramentas: ferramenta de metal duro sem revestimento (T1) e duas ferramentas de metal duro revestidas com TiCN+TiC+TiCN+Al₂O₃+TiN, variando a espessura de revestimento em 7,5 e 10,5 μ m (ferramenta T2 e T3 respectivamente). Observou-se um aumento da força de avanço quando aumentou o comprimento de corte para a ferramenta sem revestimento para todas as velocidades avaliadas. Diferentes resultados foram verificados para as ferramentas revestidas, que possibilitaram um maior comprimento de corte e menores forças de avanço. A presença do revestimento de TiN melhorou consideravelmente a resistência ao desgaste das ferramentas, garantindo menores esforços de corte, conforme detalhado na FIG. 2.12.

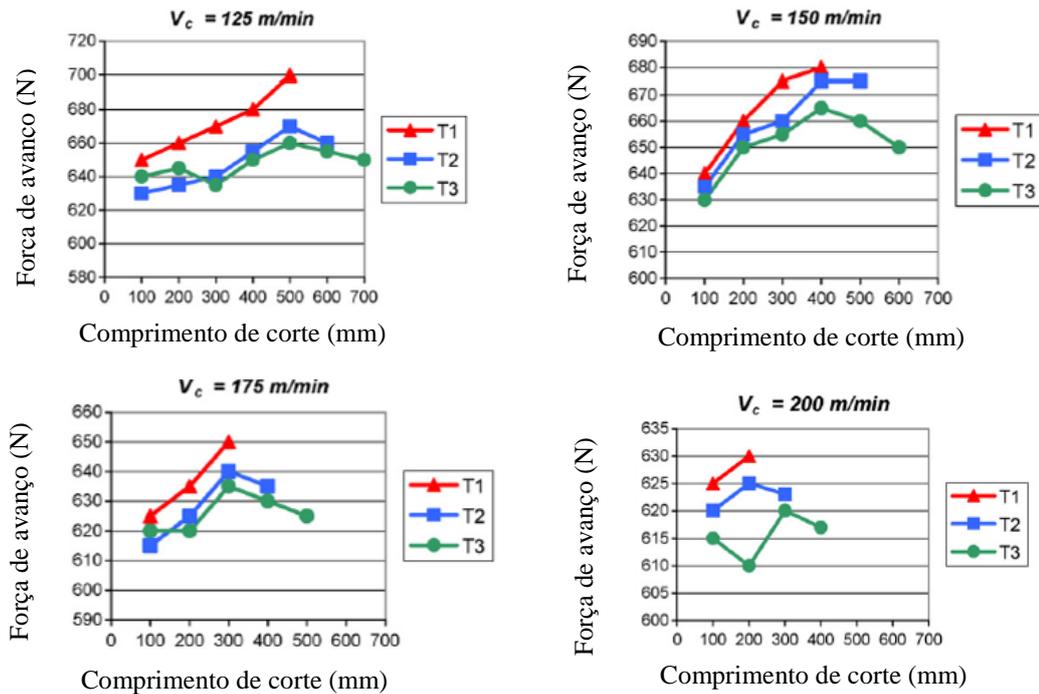


FIGURA 2. 12 - Forças de corte em relação ao comprimento de corte

FONTE - Yigit (2008)

A FIG. 2.13. detalha o desgaste de flanco para as três ferramentas. Com o aumento da velocidade de corte, todas as ferramentas submeteram-se a um maior desgaste. As ferramentas T2 e T3 apresentaram comportamentos semelhantes, sendo os valores de desgaste de flanco bem próximos e a ferramenta T3 apresentou ligeiramente um melhor desempenho. Porém os maiores valores de desgaste de flanco foram para a ferramenta sem revestimento. Esse fato é atribuído que a elevada dureza do revestimento de TiN melhora consideravelmente a resistência ao desgaste das ferramentas em comparação à ferramenta sem revestimento para as quatro velocidades de corte testada, conforme verificado na FIG. 2.13.

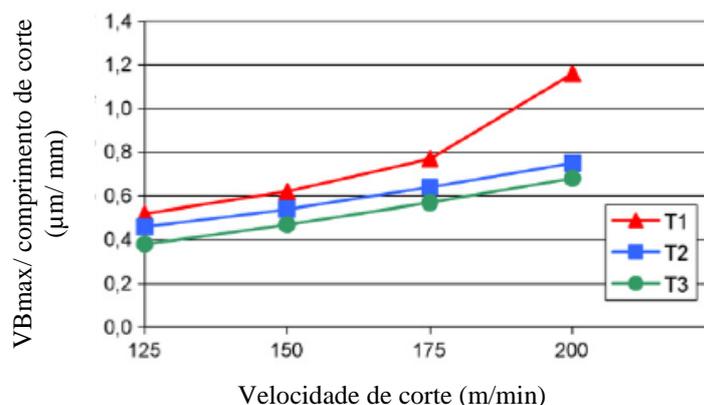


FIGURA 2. 13 - Desgaste de flanco em relação à velocidade de corte

FONTE - Yigit (2008)

De acordo com Trent e Wright (2000), a redução das forças de usinagem, devido ao aumento da velocidade de corte, está relacionada ao acréscimo da temperatura nas zonas de cisalhamento, ocasionando, assim, a diminuição da resistência ao escoamento do material da peça e da espessura do cavaco formado durante o corte, além de reduzir o comprimento de contato entre ferramenta e cavaco. Esses mesmos autores também afirmam que as forças de corte ao utilizar ferramentas revestidas são mais baixas do que ferramentas não revestidas. Isso está relacionado a uma redução da área de contato na face de saída da ferramenta, e uma das vantagens, por exemplo, é a redução da incidência de fratura em brocas helicoidais, facilitando a remoção rápida.

Por meio dos trabalhos citados, é possível afirmar que o comportamento da força de usinagem sofre influência significativa dos materiais das ferramentas de corte, do tipo de revestimento, do atrito cavaco-ferramenta e da utilização de fluido. No entanto, esta influência pode ser negativa ou positiva, dependendo de vários fatores, como: composição química do material a ser usinado, parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço), geometria e desgaste das ferramentas.

2.8 Integridade superficial

A integridade superficial é um termo que descreve a qualidade de uma superfície e envolve varias considerações: acabamento superficial, trincas, alterações químicas, danos térmicos e adversos, como tensão residual de tração. O acabamento superficial é o mais importante nas operações de usinagem (SHAW, 1984).

O acabamento de uma superfície usinada pode ser dividido em: ondulações, falhas e rugosidade. As ondulações são as irregularidades com espaçamentos maiores que a rugosidade da peça, ou seja, a rugosidade está contida ao longo das ondulações. Falhas são interrupções indesejáveis e inesperadas na superfície, como bolhas, inclusões e trincas, que podem surgir durante o processo de corte. Já a rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou de erros microgeométricos resultantes da ação inerente ao processo de corte, como marcas de avanço, aresta postiça de corte e desgaste da ferramenta (FERRARESI, 1970). Em muitos casos, a rugosidade é utilizada como parâmetro de saída para controlar um processo de usinagem.

Conforme Ghani (2002), a rugosidade superficial e a precisão dimensional apresentam um papel importante no desempenho de um componente usinado. Nos processos de usinagem, a qualidade da peça de trabalho (rugosidade ou dimensão) é influenciada pelas condições de corte, geometria do material, processo de usinagem, formação de cavacos, material da peça, desgaste da ferramenta e vibração durante o corte.

2.8.1 Rugosidade

A rugosidade é resultado da ação inerente do processo de corte causado pela ferramenta, sendo medida em um intervalo de comprimento denominado cut-off (comprimento de rugosidade da amostra). De acordo com a Norma ABNT NBR ISO 4287: 2002, o comprimento de amostragem é utilizado para a identificação das irregularidades do perfil sob avaliação, e o comprimento de avaliação, para estabelecer o perfil sob avaliação, contendo um ou mais comprimentos de amostragem. Para essa norma, recomenda-se um comprimento de avaliação equivalente a cinco vezes o comprimento de amostragem, de forma a obter uma maior confiabilidade dos dados.

Um dos métodos utilizados para medição de rugosidade é por contato direto, por meio do apalpador de um perfilômetro ou rugosímetro. Contudo, existem vários parâmetros na avaliação da rugosidade superficial, em diversas aplicações. Machado *et al.* (2011) apresentam os principais parâmetros de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4287: 2002:

- desvio aritmético médio (R_a): define-se como a média aritmética dos valores absolutos das variações do perfil real em relação à linha média no comprimento de amostragem;
- desvio médio quadrático (R_q): caracteriza-se como a raiz quadrada da média dos valores das variações do perfil no comprimento de amostragem. Este parâmetro amplia os valores de picos ou vales isolados, evidenciando defeitos em superfícies com bom acabamento;
- altura total do perfil (R_t): define-se como a soma da maior profundidade de vale e maior altura de pico do perfil no comprimento de avaliação;
- altura máxima do perfil (R_z): revela-se como a soma da maior profundidade de vale e maior altura de pico do perfil no comprimento de amostragem.

Um aspecto relacionado à rugosidade é o aparecimento da aresta postiça de corte (APC) em baixas velocidades de corte. Partes da APC são cisalhadas durante o processo e permanecem aderidas à superfície da peça usinada. Com o aumento da velocidade de corte, o aparecimento

da APC é dificultado, a temperatura eleva-se e, conseqüentemente, diminui-se a resistência do material ao cisalhamento, reduzindo, assim, as forças de usinagem, gerando um melhor acabamento (SHAW, 1997). Porém, o aumento excessivo da velocidade de corte poderá provocar vibrações indesejadas, além de acelerar o desgaste da ferramenta, piorando o acabamento.

Dentre os parâmetros de corte que afeta a rugosidade superficial, o avanço é o mais influente, uma vez que a distância dos picos e vales tende a aumentar com o crescimento do avanço, em uma proporção quadrática MACHADO *et al.* (2011).

2.8.2 Rugosidade na usinagem do ferro fundido nodular

Yanda *et al.* (2010) estudaram o torneamento do ferro fundido nodular perlítico FE 700 utilizando ferramenta de corte revestida de TiN na condição a seco. As velocidades de corte foram 220, 300 e 360 m/min, avanços de 0,2;0,3 e 0,5 mm/rev. e a profundidade de corte foi de 2 mm, sendo esse valor constante durante o ensaio. De acordo com a análise estatística, os parâmetros velocidade de corte e avanço tiveram significância na rugosidade R_a . Foram obtidos menores valores de rugosidade quando houve aumento da velocidade de corte e menores avanços. Conforme detalhado na FIG. 2.14, o avanço apresentou maior contribuição (74%), seguido da velocidade de corte (14%), confirmando que o avanço é um dos parâmetros mais influentes sobre a rugosidade.

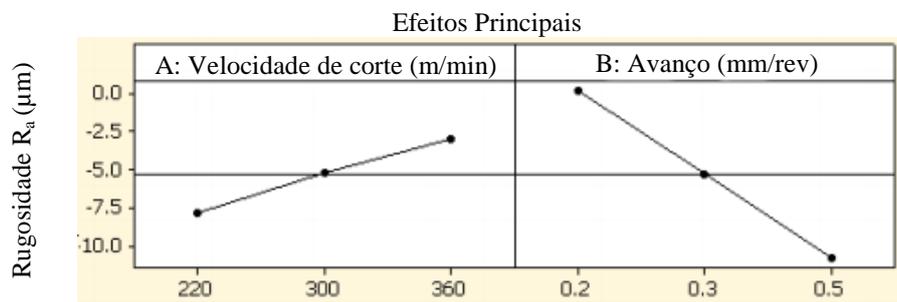


FIGURA 2. 14 - Influência dos parâmetros velocidade de corte e avanço na rugosidade superficial (R_a)

FONTE - Yanda (2010)

Um resultado similar a esse foi encontrado por Grzesik *et al.* (2012), ao investigarem o torneamento de um ferro fundido nodular perlítico-ferrítico (EN- GJS-500-7) contendo 50% de perlita e 40% de ferrita, utilizando ferramentas de Nitreto cúbico de boro (CBN). A

rugosidade superficial média reduziu com o aumento da velocidade de corte, conforme apresentado na FIG. 2.15. Os autores mencionam que esse efeito teve a contribuição de uma boa rigidez e satisfatória estabilidade térmica do centro de torneamento utilizado. Além disso, foram obtidos melhores resultados de rugosidade para menores avanços.

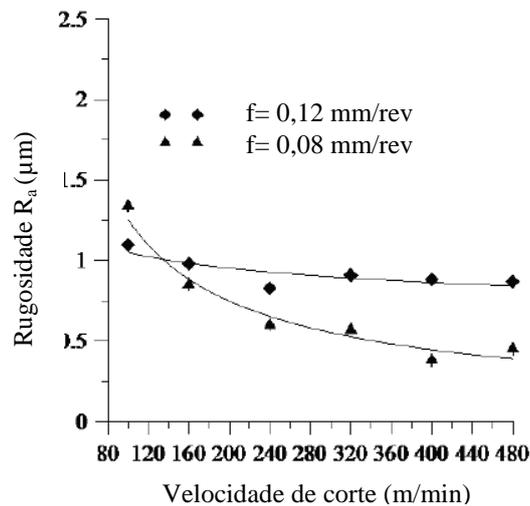


FIGURA 2. 15 - Influência dos parâmetros de corte na rugosidade superficial (R_a)

FONTE - Grzesik (2012)

Marques (2012) realizou um estudo com brocas de aço rápido M2, sem revestimento e com revestimento de AlCrN e TiAlN, na furação do ferro fundido nodular GGG-50, nas velocidades de corte de 25 e 35 m/min e avanço de 0,15 e 0,25 mm/rev. Para as maiores condições, como $V_c=35$ m/min e avanço= 0,25 mm/rev, a presença dos revestimentos se mostrou mais efetiva quanto aos valores de R_a . Isto pode ser explicado pela presença do alumínio, que atuou como lubrificante, na interface cavaco/ferramenta, facilitando o escoamento do cavaco e limpando a superfície interna do furo. A condição não revestida apresentou resultados inferiores.

2.9 Desvios geométricos e dimensionais na furação

Os erros dimensionais, geométricos e a presença de rebarba definem usualmente a qualidade do processo de furação. A precisão resultante dos furos dependem do tipo de processo de furação, da peça, da ferramenta que envolve grau de afiação e da geometria da ponta da broca, da máquina-ferramenta, das condições de corte e rigidez do sistema máquina-ferramenta-peça (SME, 1983).

De acordo com Castillo (2005), os erros presentes na furação são: os erros de forma, que podem ser referentes à circularidade e à cilindricidade; os erros de posição, que são os batimentos radial e axial; os erros de dimensão, relacionados ao diâmetro do furo; e os erros de acabamento, que são referentes à rebarba, à quebra de borda do furo na saída e às marcas na parede do furo. Quanto às tolerâncias, estas podem ser dimensionais e de forma. As tolerâncias dimensionais estão relacionadas com a medida do diâmetro nominal e a medida real encontrada no furo; já as tolerâncias de forma estão ligadas à geometria dos furos.

A seguir, serão detalhados o erro de circularidade, que será avaliado e discutido nesta dissertação, e a influência dos parâmetros de corte em relação à circularidade e aos diâmetros dos furos.

A circularidade controla erros com forma de esfera ou de geometrias que possuem seções transversais circulares, ou seja, é a condição na qual o perfil real do furo deve estar dentro de uma faixa definida por dois círculos concêntricos cuja distância entre as bordas é a tolerância. O erro de circularidade é calculado pela diferença dos diâmetros D e d dos círculos concêntricos (ASME Y14.5M, 1994), conforme detalhado na FIG. 2.16. É possível reduzir os erros de circularidade aumentando-se o avanço, com o uso de ferramentas mais rígidas e afiadas (CASTILLO, 2005 *apud* WICK *et al.*, 1988).

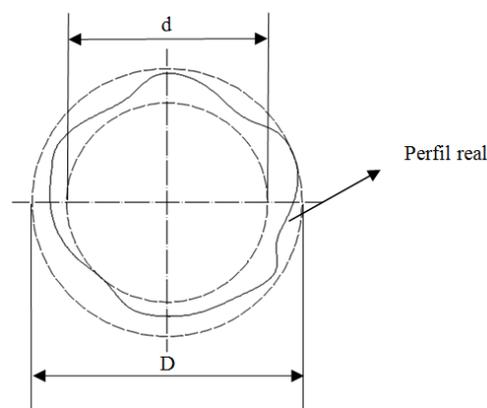


FIGURA 2. 16 - Desvios de circularidade

FONTE - O autor (2016)

Paiva Jr. *et al.* (2013) avaliaram a furação do ferro fundido vermicular CGI 450, com dureza 254 HB, quanto ao desempenho da circularidade e rugosidade dos furos, utilizando brocas de metal duro tipo k10, revestidas com TiAlN/TiN múltiplas camadas, Nitreto de alumínio cromo (AlCrN), única camada, e Nitreto de titânio silício e nitreto de alumínio cromo

(TiSiN/AlCrN) múltiplas camadas, na velocidade de corte 80 e 150 m/min e avanço de 0,1 mm/rot. Para as três ferramentas revestidas, o erro de circularidade apresentou-se melhor para a velocidade de corte de 150 m/min. No início do processo de furação, o erro de circularidade é mais baixo, à medida que o processo de corte progride, o erro de arredondamento aumenta de forma diferente, dependendo da velocidade de corte e do revestimento. A ferramenta revestida com TiSiN / AlCrN apresentou menor variação da circularidade em relação ao desgaste de flanco, seguida pela ferramenta revestida de TiAlN/TiN, conforme FIG. 2.17 (a). A menor variação da circularidade para a maior velocidade de corte está relacionada com a aresta de corte e o tempo de contato, sendo menor para a velocidade de 150 m/min, pois o tempo de corte mais curto diminui o efeito de arredondamento da ferramenta no furo. Em relação à rugosidade, no princípio da furação, as ferramentas com múltiplas camadas TiAlN/TiN e TiSiN/AlCrN exibiram maiores valores de rugosidade para a velocidade de corte de 80 m/min. Com o progresso da furação, as ferramentas TiSiN / AlCrN e AlCrN apresentaram menores valores de rugosidade. Para a ferramenta de TiAlN/TiN, observou-se maior área desgastada e adesão de ferro, o que contribuiu para maiores valores de rugosidade, conforme demonstrado na FIG. 2.17 (b). A rugosidade da superfície usinada é diretamente influenciada pela integridade da superfície. A circularidade é diretamente relacionada à velocidade de corte e à presença do revestimento, sendo que o aumento da velocidade de corte melhora a circularidade. Já a rugosidade é diretamente influenciada pelo desgaste e pela adesão de material. Para baixas velocidades de corte, a redução do desgaste e da adesão na aresta de corte resultou em baixos valores de rugosidade.

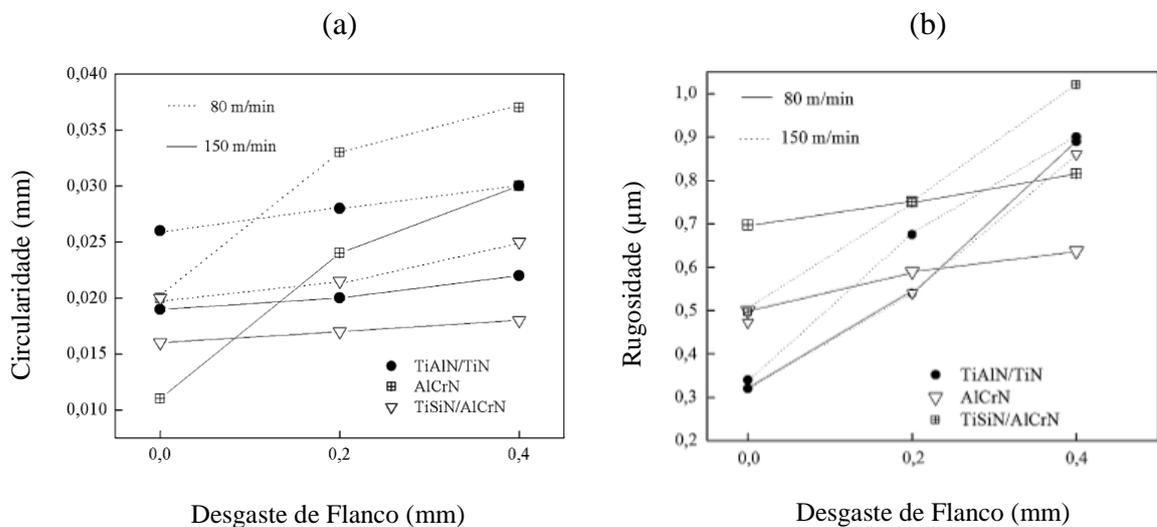


FIGURA 2. 17 - Desvios de circularidade e rugosidade dos furos em relação ao desgaste de flanco

FONTE - Paiva Jr. *et al.* (2013)

Marmentini *et al.* (2008) analisaram a influência da velocidade de corte e do avanço nos diâmetros dos furos usinados para o material ferro fundido cinzento e nodular, ferramenta aço rápido M2, diâmetro de 10 mm, ângulo de ponta 118°; velocidades de corte: 15, 20 e 25 m/min e avanços: 0,09, 0,135 e 0,18 mm/rot. Para as velocidades de corte de 15 e 20 m/min, os valores dos diâmetros apresentaram pouca variação; porém, para a velocidade de 25 m/min, ocorreu uma variação considerável dos valores de diâmetro entre os materiais, indicando uma mudança no comportamento dos ferros fundidos. Sabe-se que o acréscimo da velocidade de corte ocasiona um atrito maior entre a ferramenta e a peça, provocando elevação da temperatura na região de corte. Grande parte desse calor é dissipada por meio do cavaco, e o restante é absorvido pela ferramenta e pela peça. Sabe-se também que os coeficientes de condução térmica dos dois materiais são diferentes, sendo que o ferro fundido cinzento apresenta melhor condução térmica devido a sua microestrutura, apresentando grafita em flocos que facilitam a condução do calor. Quanto ao avanço, os materiais exibiram comportamentos similares, ou seja, uma redução do diâmetro para maiores avanços, conforme detalhado na FIG. 2.18 (a) e (b).

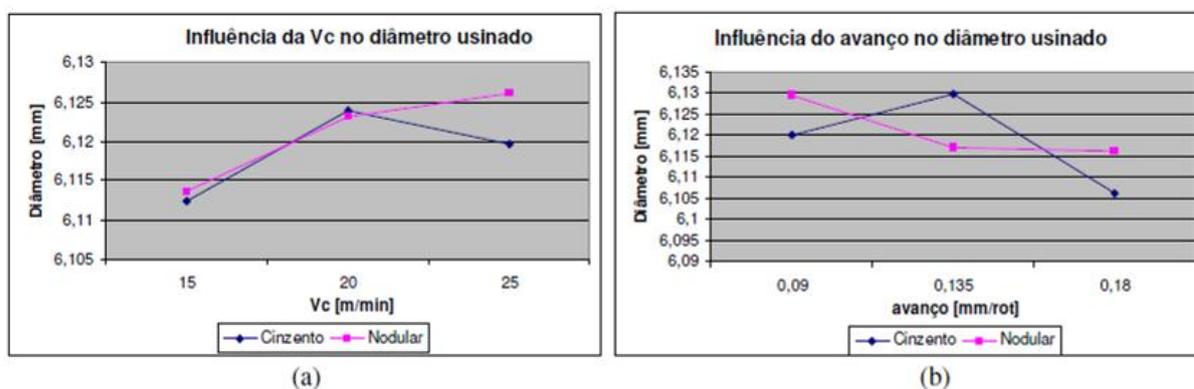


FIGURA 2. 18 - a) influência da velocidade de corte, b) influência do avanço no diâmetro dos furos

FONTE - Marmentini (2008)

2.10 Rebarbas na furação

As rebarbas formadas durante a usinagem são definidas como projeções de material além dos limites da peça de trabalho, sendo materiais de presença indesejável na maioria dos processos de usinagem (NIKNAM *et al.*, 2014). A operação de furação forma rebarbas na entrada e no final do furo. A rebarba na entrada é formada por escoamento plástico do material, e a rebarba da saída, pela conformação do material, devido às elevadas taxas de compressão no centro do

furo (KIM *et al.*, 2001). As rebarbas na saída são importantes por serem maiores e mais difíceis de serem removidas, causando problemas na rebarbação (NIKNAM *et al.*, 2014).

Min *et al.* (2001) apresentam os principais parâmetros que afetam a formação de rebarbas no processo de furação:

- **geometria da broca:** ângulo de ponta, ângulo de hélice, alívio da aresta transversal;
- **propriedades do material:** dureza, rigidez, ductilidade;
- **condições do processo:** velocidade de corte, avanço, uso de refrigeração, furação pica-pau;
- **outros:** desgaste da ferramenta, material da ferramenta, aresta postiça de corte.

Os tipos de rebarbas na furação foram detalhados por Aurich *et al.* (2009) e estão ilustrados na FIG. 2.19:

- **uniforme:** pode ser do tipo I (rebarbas uniformes pequenas); tipo II (rebarbas uniformes grandes) e uniforme com tampa. Esse tipo de rebarba tem pequenas dimensões e altura uniforme ao redor de toda a periferia do furo. Uma tampa é formada no passo final da furação e pode permanecer ligada à peça de trabalho ou separada na saída da broca. À medida que a broca se aproxima da saída da superfície, o material sob a borda começa a se deformar; ao passo que a broca avança, a zona de deformação plástica se expande do centro do furo para as arestas principais da broca. Na etapa final, a fratura inicial ocorre na extremidade final da aresta de corte, criando a tampa. O material remanescente é dobrado e empurrado para fora, à frente da broca, formando uma rebarba uniforme com a broca;
- **transição:** esse mecanismo de formação de rebarba situa-se entre o uniforme e a coroa. As fraturas ocorrem simultaneamente no centro do furo e na periferia. As rebarbas que se formam primeiro são do tipo coroa e, depois, do tipo uniforme;
- **coroa:** possui grande altura e superfície irregular na periferia do furo. Com o aumento do avanço, a força na furação se eleva, assim como a deformação plástica no centro do furo. A fratura ocorre no centro do furo, e a rebarba forma-se com a deformação do material restante nas periferias. De acordo com Kim *et al.* (2002), quando há um considerável desgaste da ferramenta de corte, não se pode esperar um corte eficiente, pois o material sob a broca é avançado em vez de ser cortado. Nessa situação, existe a possibilidade de ocorrência de fratura inicial na região central, criando rebarba do tipo coroa.

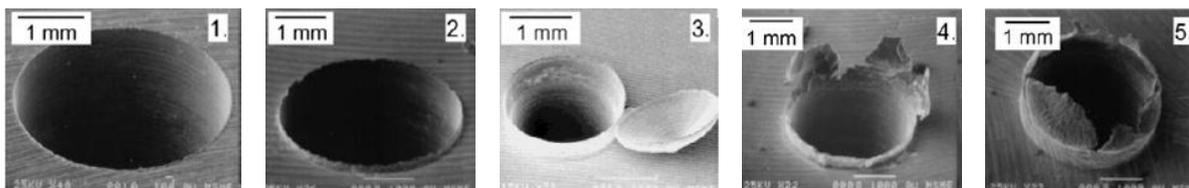


FIGURA 2. 19 - Rebarba: 1) uniforme tipo I; 2) uniforme tipo II, 3) uniforme com tampa, 4) transição; 5) coroa
 FONTE - Aurich *et al.*(2009)

De acordo com Kim *et al.* (2002) quando a velocidade de corte e avanço são baixas, as brocas tendem a formar rebarbas uniformes ao longo do furo para a maioria dos materiais. A propriedade do material da peça faz uma grande diferença quando a velocidade de corte e avanço aumenta. Quando o material tem ductilidade moderada, o material tende a alongar-se até a um certo ponto durante a formação de rebarbas, resultando em rebarbas maiores e mais volumosas devido a maiores deformações.

Feldshtein (2011) acompanhou a formação de rebarbas na furação do material aço inox austenítico X5CrNi18-10 e da liga de titânio Ti6Al4V ELI, com brocas de aço rápido sem revestimento e revestidas com TiAlN multicamadas, com fluido. As velocidades de corte e de avanço, para o aço inox, foram de 9 a 20 m/min e 0,05 a 0,13 mm/rev., brocas com 6 mm de diâmetro; e, para a liga de titânio, de 3 a 10 m/min e 0,04 a 0,08 mm/rev., brocas 5 mm de diâmetro. A furação do material aço inox para as brocas não revestidas apresentou rebarbas mais difíceis de remoção, rebarba uniforme de grande altura, rebarba coroa e rebarba uniforme com tampa. Para a ferramenta com revestimento, as rebarbas foram mais fáceis de serem removidas, pois eram do tipo uniforme e sem a tampa. O revestimento reduz o atrito entre o contato da broca, o cavaco e as paredes dos furos, além de abaixar a temperatura na zona de contato. Quanto aos parâmetros, baixa velocidade de corte e baixo avanço resultaram em rebarbas maiores, para as duas ferramentas avaliadas. Em relação à liga de titânio, as rebarbas apresentaram-se em forma de coroa, uniformes com tampa e altura pequena, além da rebarba de transição. Para esse material, a presença do revestimento não influenciou muito na forma da rebarba, pois o revestimento demonstrou afinidade química com a liga de titânio, apresentando pouco efeito na rebarba. Rebarbas menores foram atribuídas às boas propriedades plásticas dessa liga, e, quanto às configurações dos parâmetros, maiores velocidade de corte e menores avanços proporcionaram menores rebarbas para esse material.

2.11 Mecanismos de formação do cavaco

O processo de formação do cavaco pode ser considerado como um processo cíclico dividido nas seguintes etapas: recalque, deformação plástica, ruptura e movimento sobre a superfície de saída da ferramenta. Devido à ação mecânica da ferramenta de corte contra a peça, uma pequena quantidade de material é recalcada contra a ferramenta de corte. Esse material sofre deformação plástica e aumenta progressivamente até que as tensões de cisalhamento se tornem elevadas, de modo a iniciar um deslizamento, que é realizado no plano de cisalhamento, entre a porção de material recalcado e a peça. Define-se, nessa região, o ângulo de cisalhamento que é formado entre o plano de cisalhamento e a direção de corte. Continuando a penetração da ferramenta em relação à peça, ocorrerá uma ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, dependendo da ductilidade do material e das condições de usinagem. Devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção deformada e cisalhada (cavaco) do material sobre a face da ferramenta. Enquanto essa etapa ocorre, uma nova porção de material está se formando e cisalhando (FERRARESI, 1970).

O cavaco corresponde à porção de material da peça, e sua formação influencia diversos fatores na usinagem, como o calor gerado durante a usinagem, o desgaste da ferramenta, o esforço de corte, entre outros (TRENT E WRIGHT, 2000). Silva (2008) afirma que o desgaste da ferramenta de corte interfere na formação do cavaco, pois, além de alterar a geometria da ferramenta, altera as condições do contato com o cavaco.

As características do material a ser usinado, como a estrutura e a ductilidade, são decisivas na formação do cavaco, assim como a geometria da ferramenta e as condições de corte. Os cavacos podem ser identificados pelo tipo (contínuo, descontínuo e segmentado) e pela forma (BORK, 1995). Em geral, cavacos contínuos aparecem durante a usinagem de materiais dúcteis, enquanto os descontínuos surgem em consequência da formação de um fluxo de elementos de cavacos quebrados em pedaços durante a usinagem de materiais frágeis MACHADO *et al.* (2011).

Em relação às condições de corte, em geral, um aumento da velocidade de corte, uma redução no avanço ou um aumento no ângulo de saída tendem a produzir cavacos em fitas (ou contínuo, quanto ao tipo). O avanço é o parâmetro que mais influencia, e a profundidade de

corte, o menos influente na forma dos cavacos. A FIG. 2.20 detalha como as formas dos cavacos são afetadas pelo avanço e pela profundidade de corte.

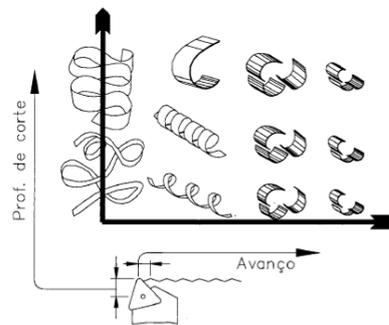


FIGURA 2. 20 - Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos

FONTE - Smith, 1989 *apud* Silva (2008)

Conforme citado por Boeira (2010) *apud* Risse (2006) e Nakayama (1978), são detalhadas as seis diferentes formas de cavacos encontrados na furação com brocas helicoidais, como mostrado na FIG. 2.21. Quando se furam materiais com ductilidade média, o cavaco tende a ter uma forma entre o tipo A e o tipo B, mas, em curto espaço de tempo, quebra-se, formando um cavaco de transição tipo D. Cavaco tipo C acontece quando a capacidade de deformação do material ultrapassa a largura total do cavaco teórico. Os cavacos em forma sanfonada do tipo E e do tipo F apresentam o mesmo mecanismo de formação, causado pelo atrito do cavaco com as paredes do furo, que restringem o seu deslizamento livre. Cavacos tipo F são típicos na furação de ligas de alumínio e ferro fundido.



Cavaco espiral cônico
(Tipo A)



Cavaco espiral cônico grande
(Tipo B)



Cavaco curto em forma de funil
(Tipo C)



Cavaco de transição
(Tipo D)



Cavaco sanfonado
(Tipo E)



Cavaco em forma de agulha
(Tipo F)

FIGURA 2. 21 - Tipos de cavacos produzidos na furação com brocas helicoidais

FONTE - Boeira (2010) *apud* Risse (2006) e Nakayama (1978)

2.11.1 Cavacos na usinagem do ferro fundido nodular

Trent e Wright (2000) apresentaram algumas particularidades do ferro fundido que interferem

nas características do cavaco desse material. Existe uma grande diferença no corte do ferro fundido e outros materiais em relação ao plano de cisalhamento. No ferro fundido, a fratura no plano de cisalhamento ocorre em intervalos muito frequentes iniciados pela grafita, ocasionando cavacos fragmentados e pequenos, característicos de cavaco descontínuo. No ferro fundido, o cavaco é arrancado, levando fragmentos que podem provocar danos na superfície da peça usinada. Em relação ao ferro fundido nodular, esses mesmos autores relatam que os cavacos desse material são longos e que a quebra deles não ocorre tão facilmente.

Werlang Filho (2015) *apud* Guessser (2009) detalha que os ferros fundidos nodulares, antes da quebra do cavaco, passam por um processo de deformação da matriz e alongamento nodulares tendem a serem maiores que os de ferros fundidos cinzentos e logo, o cavaco permanece maior tempo em contato com a ferramenta, acentuando-se os mecanismos de desgaste.

Silva (2008) realizou uma análise do cavaco no torneamento do ferro fundido nodular com dureza de 255 HV, nas velocidades de corte: 30, 100 e 200 m/min, avanços: 0,138; 0,149 e 0,204 mm/rot., e ferramentas de metal duro sem revestimento e revestidas com TiN. Para as ferramentas de metal duro sem revestimento e revestida com TiN, os cavacos se apresentaram mais curtos, na forma espiral, estando alguns na forma tubular, para todas as velocidades e avanços. Realizou-se o embutimento do cavaco para análise metalográfica, e observou-se grande quantidade de deformação plástica e alongamento das grafitas para as duas ferramentas avaliadas.

2.12 Desgaste e avarias em ferramentas de corte

De acordo com Ferraresi (1970), durante a usinagem ocorrem desgastes nas superfícies de saída e de folga da ferramenta. Consideram-se avarias das ferramentas as quebras, as trincas e os sulcos, distribuídos em forma de pente, e as deformações plásticas, que ocorrem na ferramenta cortante durante a usinagem. Hutchings (1992) define o desgaste como sendo a destruição de uma ou de ambas as superfícies que compõem um sistema tribológico, geralmente envolvendo perda progressiva de material.

Segundo Machado *et al.* (2011), mesmo a ferramenta de corte possuindo tenacidade suficiente para evitar uma avaria, estará sempre sujeita ao desgaste. Verifica-se assim desgaste progressivo, tanto na superfície de folga quanto na superfície de saída da ferramenta.

Conforme citado por Lau *et al.* (2000), o desgaste é sempre tratado como um fenômeno de danos na superfície, e o estudo do contorno da superfície danificada é uma das melhores formas de análise.

2.12.1 Mecanismos de desgaste

Para König e Klocke (1997), os mecanismos de desgaste da ferramenta constituem um importante estudo no desenvolvimento de novas tecnologias, representando uma forma de aumentar a vida da ferramenta à medida que se entende melhor o processo para otimizá-los. A FIG. 2.22 detalha os principais mecanismos de desgaste em função da temperatura de corte no processo de usinagem. De acordo com Machado *et al.* (2011), todas as formas de desgaste acontecem devido aos vários mecanismos associados a ele, embora uma delas deva prevalecer.

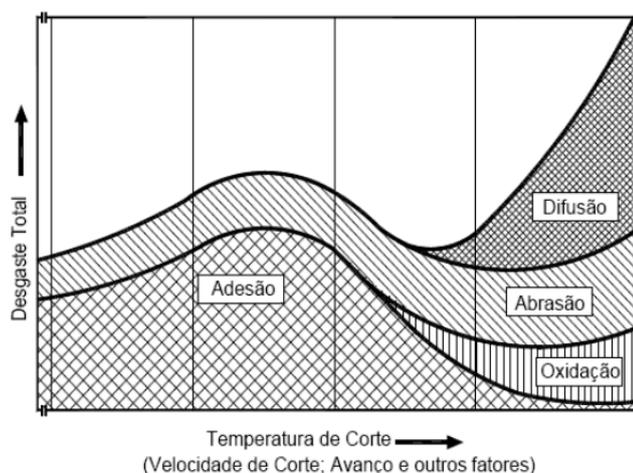


FIGURA 2. 22 - Mecanismos de desgaste predominantes em relação à temperatura de corte

FONTE - Vierege, 1970 *apud* König e Klocke, 1997

Em velocidades baixas, os desgastes das ferramentas de aço rápido ocorrem predominantemente devido à adesão, ou seja, por causa do cisalhamento da aresta postiça de corte. Na medida em que se eleva a velocidade de corte, aumenta-se a participação dos componentes que dependem da temperatura, tais como abrasão, difusão e oxidação. Os únicos componentes presentes em todas as faixas de velocidade de corte são a adesão e a abrasão (FERRARESI, 1970).

A seguir, são detalhados os mecanismos de desgaste das ferramentas de corte:

- abrasão: o desgaste abrasivo ocorre quando as asperezas de uma superfície áspera, dura ou de uma superfície macia danificam a interface por deformação plástica ou fratura, produzindo sulcos formados no sentido do movimento de corte. As asperezas dos metais deformam plasticamente mesmo em cargas mais leves. No caso de materiais dúcteis, asperezas ou partículas duras promovem escoamento plástico do material de menor dureza (BHUSHAN, 2013). Conforme explicado por Sahin *et al.* (2010) partículas produzidas dentro do próprio sistema tribológico durante o processo de desgaste podem ter contaminação de arredores.
- adesão: o fenômeno de adesão acontece, geralmente, em velocidades e temperatura de corte baixas, condições ideais para a formação de aresta postiça, mas ocorre desgaste por adesão mesmo sem formá-la (TRENT E WRIGHT, 2000);
- difusão: a difusão consiste na transferência de átomos de um material para outro, o que causa variações nas propriedades da camada superficial da ferramenta. As reações químicas provocam a formação de compostos químicos menos resistentes à abrasão. Para que ocorra o desgaste por difusão, são necessários três fatores combinados: elevadas temperaturas na região de contato, afinidade química entre a ferramenta e o material da peça e o tempo de contato (KÖNIG e KLOCKE, 1997);
- oxidação: a oxidação ocorre, na maioria dos metais, em temperaturas elevadas na presença de ar e água. O desgaste gerado pela oxidação se forma nas áreas adjacentes de contato cavaco-ferramenta ou na zona de escorregamento, em forma de pequenas bolhas de óxido (TRENT E WRIGHT, 2000);
- aderência e arrastamento: acontece geralmente em baixas velocidades de corte, nas quais o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta torna-se irregular. A aresta postiça de corte pode aparecer e, na sua presença, o processo tem natureza menos contínua, principalmente se ela for instável. Fragmentos microscópicos são arrancados na superfície da ferramenta e arrastados junto ao fluxo de material adjacente à interface (MACHADO *et al.*, 2011). A lubrificação e a presença dos revestimentos têm diminuído a incidência deste mecanismo de desgaste (MARQUES, 2012).

Nayyar *et al.* (2012) acompanhou o desgaste de três materiais: ferro fundido nodular ferrítico, ferro fundido vermicular e ferro fundido cinzento no torneamento, utilizando insertos de metal duro com revestimento de TiCN, Al₂O₃ e TiN, sem fluido de corte. A velocidade de corte foi de 300 m/min, avanço de 0,3 mm/rev. e profundidade de corte de 1,5 mm. Para o ferro

fundido cinzento, o mecanismo de desgaste predominante foi abrasivo, e, para o ferro fundido vermicular e o ferro fundido nodular ferrítico, o mecanismo de desgaste predominante foi o de adesão, principalmente de ferrita, na face de saída do inserto.

2.12.2 Desgaste em brocas helicoidais

O desgaste da ferramenta no processo de furação ocorre em diversas áreas, como nos flancos, superfícies de saída do cavaco, aresta transversal, nas pontas e guias laterais da broca. Schroeter e Weingaertner (1999) identificaram cinco tipos diferentes de desgastes em uma broca helicoidal, conforme demonstrado na FIG 2.23:

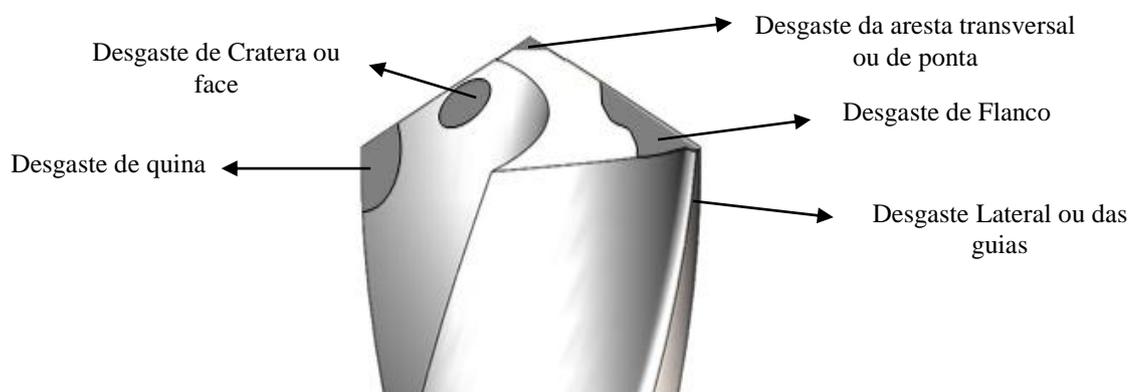


FIGURA 2. 23 - Regiões de desgaste em uma broca helicoidal

FONTE - Adaptado de Schroeter e Weingaertner (2001)

- desgaste de flanco (VB): ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pelo contato entre ferramenta e peça (DINIZ *et al.* 2013). O atrito da aresta de corte contra a superfície da peça é a origem para o desgaste de flanco, que pode ser classificado em desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de flanco máximo ($VB_{B_{máx}}$). O desgaste de flanco é representado por uma faixa de desgaste nos flancos da broca ao longo da aresta principal de corte com largura variável, geralmente maior na ponta de corte ($VB_{B_{máx}}$). O desgaste de flanco $VB_{B_{máx}}$ normalmente é empregado para comparar o desempenho da ferramenta em diferentes condições de trabalho, e o seu aumento amplia os esforços de corte, piora a qualidade da superfície do furo e aumenta os erros dimensionais e geométricos dos furos;
- desgaste das guias (H): o comprimento médio “ H ”, medido sobre todas as guias da ferramenta em relação à sua aresta de corte;
- desgaste de cratera (Kb): corresponde à dimensão “ Kb ”, que é a medida do ponto mais afastado do lado oposto da cratera em relação à aresta de corte. Tal desgaste também pode

- ser dado por “KT”, caso seja expresso pela profundidade da cratera;
- desgaste da aresta transversal: dimensionado por meio das medidas “Cm” (largura da faixa de desgaste) e “Ct” (ponto mais alto do desgaste). Conforme citado por Castilho (2005), uma das regiões mais críticas da broca é a da aresta transversal, onde ocorrem danos a partir do primeiro contato com o material a usinar.
 - desgaste de quina (W): nas quinas, predominam as solicitações térmicas, devido a uma maior velocidade de corte, ao corte das arestas principais e ao calor gerado pelo atrito dos cavacos contra a superfície de saída.

Na FIG. 2.24, estão representados os tipos de desgaste para as brocas helicoidais.

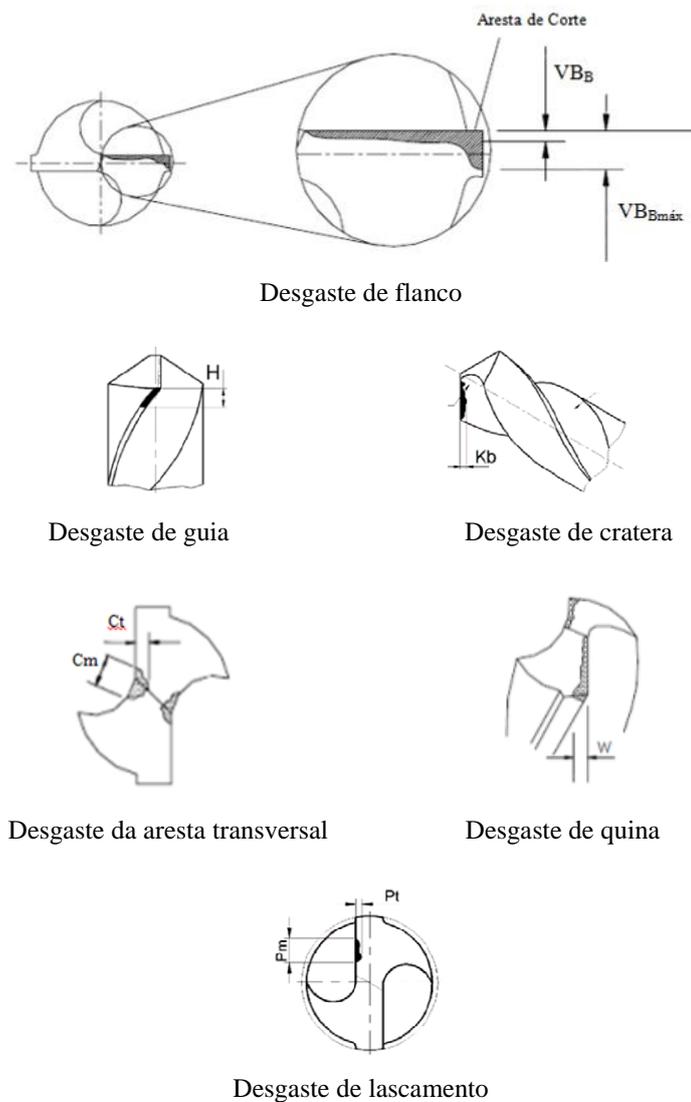


FIGURA 2. 24 - Representação dos tipos de desgaste

FONTE - Adaptado de Schroeter; Weingaertner (2001- b); Bork (1995); Cardoso (2014) e Kanal (1978)

De acordo com Diniz *et al.* (2013), além dos desgastes relacionados acima, outras ocorrências aparecem na ferramenta após o uso, denominadas de avarias, como:

- lascamento: os lascamentos nas arestas principais de corte da broca (medidas “Pm” para a largura, “Pt” para a profundidade), os quais também podem ocorrer na aresta transversal (BORK, 1995). É o tipo de avaria onde acontece a retirada de uma grande partícula de uma só vez (DINIZ *et al.*, 2013);
- trincas ou fissuras: avaria normalmente causada pela variação da temperatura ou de esforços mecânicos, que acontece em cortes interrompidos e com refrigeração irregular;
- colapso total: é definido como sendo simplesmente a destruição da broca. Esta definição também considera a inutilização da broca por danos que não necessariamente venham a destruí-la (BORK, 1995).

Segundo Barbosa (2009), inicialmente o desgaste das brocas é rápido, devido à adequação natural ao sistema tribológico envolvido, seguido por um período moderado, onde o desgaste é lento, e, finalmente, por uma aceleração, promovendo, em um curto espaço de tempo, elevados níveis de temperatura e tensões que eventualmente conduzem a ferramenta ao colapso. No caso de brocas helicoidais, o desgaste é um fenômeno progressivo e comparativamente lento, enquanto a avaria e a quebra da aresta principal de corte são normalmente catastróficas e repentinas.

Meena e Mansori (2016) realizaram a furação a seco do ADI utilizando ferramentas de metal duro - uma com múltiplas camadas de (Ti, Al, Cr) N, e a outra, revestida com única camada de TiAlN, ambas por processo PVD. A velocidade de corte foi de 60 m/min e o avanço de 0,15 mm/rev. A ferramenta revestida com múltiplas camadas apresentou melhor comportamento, obtendo 25% de redução da energia específica de corte, comparada à ferramenta com camada única, em relação ao número de furos. Quanto ao desgaste, a ferramenta revestida com (Ti, Al, Cr) N exibiu desgaste abrasivo e, pelo EDS, constatou-se a presença de titânio e cromo, elementos do revestimento, indicando uma melhor resistência ao desgaste em comparação com a ferramenta com única camada, conforme detalhado na FIG. 2.25. A ferramenta revestida com TiAlN mostrou desgaste de adesão e fratura próxima à aresta de corte da broca. Pelo EDS, observou-se, no material da ferramenta de trabalho, a presença de picos de tungstênio e cobalto, o que indica a remoção do revestimento, expondo o material do substrato, e elevado teor de O, revelando a possibilidade de oxidação do material

da peça de trabalho aderida na aresta de corte, apontando o aumento significativo da temperatura de corte. O comportamento do desgaste revela uma visão da sequência de eventos até a fratura da broca. As imagens da FIG. 2.26 detalham o desgaste para a ferramenta TiAlN.

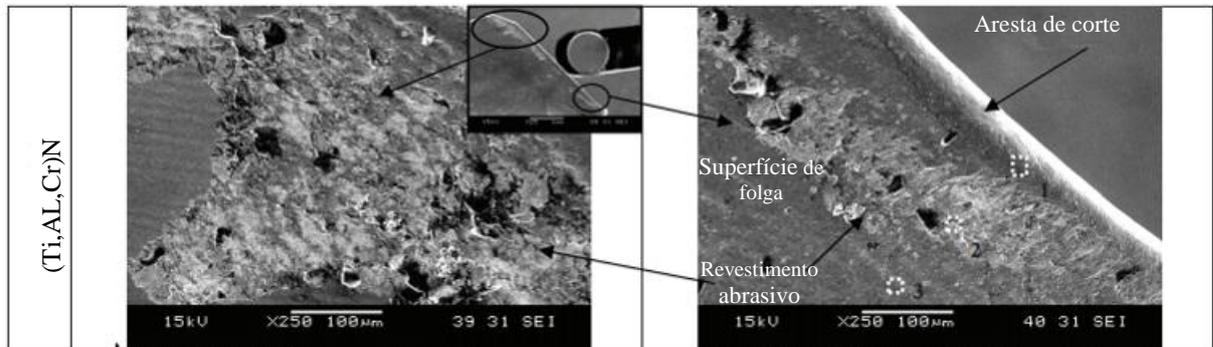


FIGURA 2. 25 - Imagens do desgaste da superfície para a ferramenta revestida com (Ti, Al, Cr) N

FONTE - Meena e Mansori (2016)

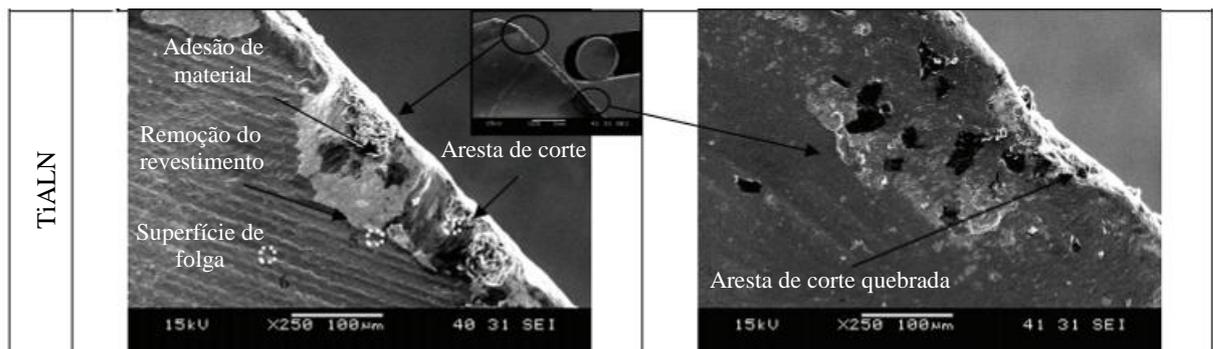


FIGURA 2. 26 - Imagens do desgaste da superfície para a ferramenta revestida com TiAlN

FONTE - Meena e Mansori (2016)

2.13 Planejamento fatorial completo

O planejamento fatorial completo corresponde o estudo de vários fatores, sendo dois ou mais níveis e suas interações. Para cada tentativa completa ou réplica do experimento, todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores são investigadas (MONTGOMERY E RUNGER, 2016).

No planejamento fatorial de experimentos (DOE), é necessário decidir quais são os fatores e as respostas de interesse. Os fatores são as variáveis que o experimentador tem condições de controlar, podendo ser qualitativos, como um tipo de catalisador, ou quantitativos, como a temperatura. Às vezes, existem fatores que podem afetar as respostas, mas que não possuem

condições ou interesse em controlar. É necessário tomar cuidado com fatores desse tipo, para que os efeitos não sejam confundidos com os de interesse. O planejamento de experimentos detalhada todas as operações experimentais que devem ser realizadas e irá depender do objetivo particular que quiser atingir. Objetivos diferentes precisarão de planejamentos diferentes (BARROS NETO *et al.*, 2010).

De acordo Barros Neto *et al.* (2010) as respostas são as variáveis de saída do sistema, nas quais tem interesse, e que serão ou não afetadas por modificações provocadas nos fatores. Dependendo do problema, existem várias respostas de interesse, que talvez precisem ser consideradas simultaneamente, conforme detalhado na FIG. 2.27.

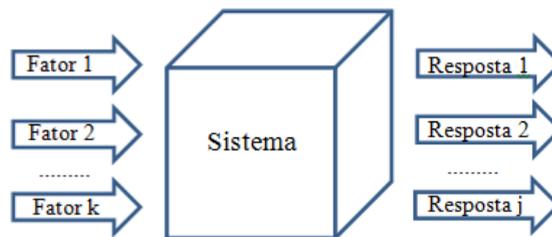


FIGURA 2. 27 - Sistema considerado como uma função ligando os fatores (variáveis de entrada) às respostas (variáveis de saída)

FONTE - Adaptado de Barros Neto *et al.* (2010)

Cada um desses experimentos, em que o sistema é submetido a um conjunto de níveis definido, é um ensaio experimental. Em geral, se houver n_1 níveis do fator 1, n_2 níveis do fator 2, ..., e n_k do fator k, o planejamento será um fatorial $n_1 \times n_2 \times \dots \times n_k$. Isso não significa, obrigatoriamente, que serão realizados apenas $n_1 \times n_2 \times \dots \times n_k$ experimentos; este é o número mínimo necessário para um planejamento fatorial completo (BARROS NETO *et al.*, 2010).

Neste trabalho, será adotado o planejamento fatorial de três fatores com três níveis, resultando em uma matriz 3^3 . Segundo Montgomery e Runger (2016), esse planejamento permite que três efeitos principais (A, B e C) sejam estimados, além das interações de segunda ordem (AB, AC e BC) e de terceira ordem (ABC).

Para o tratamento de dados de um experimento, é comumente utilizada a análise de variância (ANOVA). A ANOVA é utilizada para a verificação de quais fatores são estatisticamente significantes no processo (MONTGOMERY E RUNGUER, 2016). De acordo com Aguiar

(1996), esse é um método estatístico empregado para testar diferenças significativas entre duas ou mais médias das populações correspondentes. A TAB. 2.4 representa a saída para a análise de variância para um experimento de um fator.

TABELA 2. 4 - Análise de variância para um experimento de um fator

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F _o	p-valor
Tratamentos	SQ Tratamentos	$\alpha - 1$	MQ Tratamentos	MQ Tratamentos/ MQE	$p (F_{\alpha - 1, \alpha (m - 1)} > F_o)$
Erro	SQ _E	$\alpha (m - 1)$	MQ _E		
Total	SQ _T	$\alpha m - 1$			

FONTE - Montgomery e Runger (2016)

Onde:

SQ tratamentos = Soma dos quadrados dos tratamentos

SQ_E = Soma dos quadrados dos erros

SQ_T = Soma dos quadrados total

MQ tratamentos = Média quadrática dos tratamentos

MQ_E = Média quadrática dos erros

α = número de tratamentos

m = número de replicações dentro de cada tratamento

F_o = o valor é calculado pela divisão da MQ tratamentos sobre MQE

P-valor = nível descritivo ou probabilidade de significância

2.14 Considerações parciais

Os ferros fundidos nodulares têm ganhado popularidade desde sua descoberta, em meados de 1940. Devido às suas propriedades, como resistência mecânica, ductilidade e alongamento, têm substituído os ferros fundidos cinzentos e os aços de baixa resistência. A usinabilidade dos ferros fundidos nodulares é influenciada pela microestrutura e dureza. A presença da grafita, que atua como um lubrificante reduz o atrito entre a peça e a ferramenta, apresentando baixas taxas de desgaste das ferramentas, atribuindo a esse material uma boa usinabilidade. Porém, conforme citado pelos autores Yigit *et al.* (2008) e Trent e Wright (2000), a zona de fluxo dos ferros fundidos nodulares, principalmente dos ferríticos, pode ser extremamente dúctil, podendo aderir-se às ferramentas de corte e prejudicar o acabamento superficial.

Com a evolução dos materiais de ferramenta, como o aço rápido, que, na época, foi considerada uma inovação tecnológica, juntamente com a presença de revestimentos, houve grandes benefícios na operação de furação, como a redução das forças de corte e o aumento da resistência ao desgaste, que dificultam a aderência de material nas superfícies de contato e melhoram a qualidade da superfície. Porém, diante dos trabalhos citados na revisão bibliográfica, as considerações direcionam para a necessidade de um exame individualizado para cada situação.

Analisando-se a influência da força de avanço e da força de corte na operação de furação e no torneamento, os melhores resultados foram atribuídos para as ferramentas com revestimentos ou com múltiplas camadas, onde foram obtidas as menores forças. Em grande parte dos trabalhos analisados, os parâmetros velocidade de corte e avanço influenciaram significativamente nos valores da força, e, no caso dos ferros fundidos, a presença da grafita contribuiu para reduzir as forças de usinagem.

Ao se examinar o desempenho da rugosidade nos ferros fundidos nodulares, os parâmetros velocidade de corte e avanço tiveram contribuições, porém o avanço foi considerado o mais influente. Conforme citado anteriormente, o uso de revestimentos propicia a obtenção de valores menores de rugosidade. Nesse sentido, a rugosidade também é influenciada diretamente pelo desgaste e adesão. A redução do desgaste e da adesão de material na aresta de corte resulta em melhores valores de rugosidade.

Para o diâmetro dos furos e a circularidade, obteve-se redução do diâmetro para maiores valores de avanço e maiores velocidades de corte, de acordo com os trabalhos analisados. Quanto ao erro de circularidade, este é diretamente relacionado à velocidade de corte e ao uso do revestimento. O aumento da velocidade de corte e a presença do revestimento resultaram em menores variações para o erro de circularidade.

Em relação à vida e ao desgaste, os estudos abordados levam a inferir que as ferramentas revestidas melhoram consideravelmente a resistência ao desgaste, em comparação às ferramentas sem revestimentos. Contudo, acredita-se que os revestimentos depositados pelo método sol-gel podem ser promissores para as ferramentas de corte, melhorando a resistência ao desgaste, além de outros benefícios já relatados.

Por fim, sabe-se que o atrito entre o cavaco e a ferramenta interfere na operação de furação em relação à força, qualidade do furo, rebarbas, desgaste de ferramentas e formação do cavaco. Avaliar o comportamento do revestimento de SiO_2 , por meio análise tribológica, será importante para o conhecimento dos mecanismo de desgaste e para a comparação com os resultados apresentados após o ensaio na furação.

Todavia, nesta pesquisa, o objetivo é analisar a influência do revestimento de SiO_2 depositado pelo método sol-gel, quando comparado com as ferramentas sem revestimento e revestida com TiN , e analisar seu comportamento na furação do ferro fundido nodular, de acordo com os parâmetros de corte e variações dinâmicas que envolvem a operação de furação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos deste trabalho foram realizados em três etapas. A primeira etapa consistiu no ensaio no tribômetro para análise do coeficiente de atrito, da taxa de desgaste e do mecanismo de desgaste referente às pistas desgastadas e pinos. Na segunda etapa, realizou-se a furação do corpo de prova, avaliando as forças de avanço, rugosidade, diâmetro médio, erro de circularidade, análise de rebarba, análise dos cavacos e análise qualitativa do desgaste das ferramentas após ensaio. Na terceira etapa, procedeu-se à furação de um disco, com o objetivo de acompanhar o desgaste para cada broca testada. Os materiais avaliados foram pinos e brocas sem revestimento e revestidos com SiO_2 e TiN .

3.1 Materiais

Os materiais bem como a sua composição química serão retratados nos tópicos a seguir.

3.1.1 Características dos materiais utilizados

Para o ensaio no tribômetro, foram preparados três corpos de prova nas dimensões de 52x50x10 mm. Utilizou-se uma parte dos corpos de prova da furação, cortados e usinados na medida mencionada acima, portanto correspondem ao mesmo lote de fabricação. Os valores de rugosidade R_a encontrados para os corpos de prova estão conforme especificado pela norma ASTM G99-05 (2010), que não deve ser superior a $0,8 \mu\text{m}$. Verificou-se a planicidade dos corpos de prova para evitar vibração durante o ensaio e interferências no coeficiente de atrito. Os pinos utilizados para revestimento e sem revestimento foram os pinos de topo esférico, material aço rápido AISI M2, conforme a FIG. 3.1.

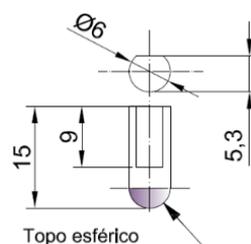


FIGURA 3. 1 - Pino de topo esférico

FONTE - O autor

A TAB. 3.1 apresenta a composição química do pino de topo esférico.

TABELA 3. 1 - Composição química do aço rápido AISI M2

C%	Si%	Mn%	Cr%	W%	Mo%	V%
0,90	0,30	0,30	4,2	6,20	5,00	1,90

FONTE - Villares Metals (2003) *apud* AISI M2

Os pinos sem revestimento e os pinos com revestimento de TiN não receberam tratamento térmico, somente os pinos de SiO₂ após revestimento. Foi realizado um estudo nas mesmas condições do pino revestido com SiO₂ e com o pino sem revestimento e tratamento térmico. Nos resultados, ao ser analisada a influência do tratamento térmico em relação ao coeficiente de atrito, concluiu-se que o tratamento térmico não teve influência significativa. O pino com TiN foi revestido pela empresa Platit, em São Paulo. Na FIG. 3.2, apresenta as imagens dos três pinos utilizados para o ensaio no tribômetro.



FIGURA 3. 2 - Pinos de topo esférico: a) pino sem revestimento; b) pino revestido com SiO₂; c) pino revestido com TiN

FONTE - O autor

Para a caracterização do revestimento, utilizou-se um pino de topo reto com o objetivo de verificar a espessura e o comportamento do revestimento, conforme representado na FIG. 3.3.

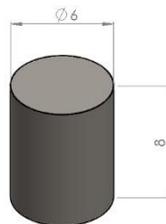


FIGURA 3. 3 - Pino de topo reto

FONTE - O autor

Para a realização dos experimentos referentes à segunda etapa, empregaram-se corpos de prova em ferro fundido nodular nas dimensões de 110x100x15 mm. A produção dos corpos de prova nessa geometria tem como finalidade evitar cortes, apresentando o tamanho ideal

para a realização do experimento. Os corpos de prova foram fundidos e vazados na mesma corrida, em condições iguais de temperatura e resfriados no molde, retardando a velocidade de resfriamento. A TAB. 3.2 apresenta a composição química, e a TAB. 3.3, as propriedades mecânicas do material, constatando a classificação do material na classe FE 42012. Para a realização dos testes de furação, utilizaram-se três corpos de prova, sendo um corpo de prova para cada ferramenta avaliada, e furação passante. Realizou-se o faceamento dos corpos de prova para eliminação de inclusões e óxidos da camada superficial inerente ao processo de fundição.

TABELA 3. 2 - Composição química do corpo de prova a ser furado

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Mg%
3,63	2,47	0,09	0,06	0,01	0,06

FONTE - Senai Cetef/ Itaúna- MG

TABELA 3. 3 - Ensaio de tração

Limite de Resistência (MPA)	Limite de Escoamento (MPA)	Alongamento %
554	376	14

FONTE - Universidade de Itaúna

A FIG. 3.4. ilustra as brocas utilizadas no experimento, tipo helicoidal, haste paralela série curta, no diâmetro de 10 mm, material aço rápido-AISI M2, conforme a norma DIN 338, tipo N, com ângulo de ponta de 118°, comprimento total 133 mm e comprimento do canal de 87 mm, tolerância h8, ângulo de hélice de 20°, conforme catálogo Dormer (2015).



(a) (b) (c)

FIGURA 3. 4 - Brocas HSS a) sem revestimento; b) revestida com TiN; c) revestida com SiO₂

FONTE - O autor

Para o ensaio de furação, as brocas passaram por um processo de afiação e facetamento antes de se realizar o revestimento, conforme indicado na FIG. 3.5.

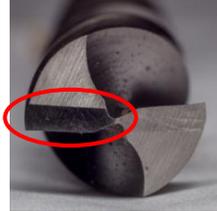


FIGURA 3. 5 - Região da broca com facetamento

FONTE - O autor

Para avaliação do desgaste das brocas, correspondente à terceira etapa do trabalho, utilizou-se um disco no diâmetro de 306,90 x 25 mm, o qual foi preparado mantendo-se a mesma espessura de 15 mm do corpo de prova utilizado na furação. A composição química é detalhada na TAB. 3.4.

TABELA 3. 4 - Composição química do ferro fundido do disco

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Mg%
3,55	2,65	0,18	0,07	0,01	0,05

FONTE - Açoliver

3.1.2 Deposição sol-gel de Dióxido de Silício

Após a afiação e o facetamento das brocas, efetuou-se a deposição do revestimento de SiO₂ pelo método sol-gel. Os reagentes utilizados foram o tetraethoxylisane (TEOS), água deionizada, ácido clorídrico (HCl) e álcool absoluto como solvente. Na solução, a concentração de átomos de silício correspondeu a 1,5mol/L, o pH a 3,5 e a razão de água/TEOS a 2,2. Antes da deposição, as brocas, pinos de topo esférico e reto passaram por uma limpeza ultrassônica com etanol.

No trabalho de Houmard (2007), a solução de SiO₂ foi preparada diluindo o TEOS em etanol absoluto, água deionizada e ácido clorídrico (HCl). A concentração de TEOS foi de 2,35 mol/L, e a solução foi envelhecida a 60 °C durante 2 dias. Em seguida, a solução foi diluída com etanol, para fixar a concentração de TEOS a 1,5 mol/L, com pH de 3,5 e razão de H₂O/TEOS de 2,2. Os filmes foram depositados por centrifugação em uma velocidade de

3000 rpm e, tratados termicamente durante 2 horas a 500°C. A espessura do revestimento de SiO₂, para a concentração de 1,5 mol/L, foi de 176 nm para uma camada revestida.

A preparação da solução do revestimento de SiO₂ foi realizado de acordo com Houmard (2007), na qual foi preparado adicionando-se, em um recipiente, água (H₂O), etanol (C₂H₅OH) e ácido clorídrico (HCl), sendo agitados por 15 min para homogeneização. Em seguida, adicionou-se o precursor Tetraetóxisilano (TEOS), agitando por mais 30 min. A solução foi envelhecida por 48 horas em temperatura ambiente e diluído para chegar a 1,5 mol/L. Após a preparação, realizou-se a deposição do revestimento por *dip-coating*, a cada camada revestida, encaminhava-se a broca para a estufa a 80°C. Cada broca foi coberta com três camadas de revestimento e, ao final, elas receberam um tratamento térmico a 400°C por um período de 2 horas. O objetivo do tratamento térmico é reduzir a porosidade, aumentar a densidade do filme de SiO₂ e assim auxiliar no endurecimento do revestimento. O mesmo procedimento foi realizado para os pinos de topo esférico com revestimento de SiO₂, utilizados para análise no tribômetro, e os pinos de topo reto que foram empregados para a caracterização do revestimento. Realizou-se esse procedimento no Laboratório de Materiais Metálicos da Escola de Engenharia da UFMG, e o fluxograma da preparação e deposição está resumido na FIG. 3.6.

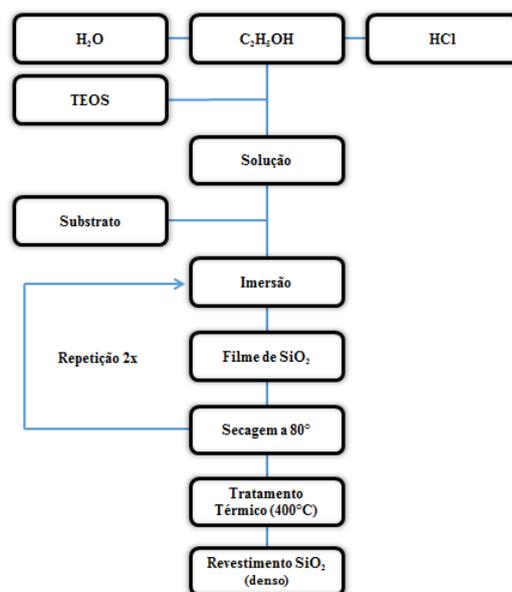


FIGURA 3. 6 - Fluxograma da preparação e aplicação do revestimento de SiO₂ por sol-gel

FONTE - O autor

As brocas e os pinos foram revestidos com três camadas de SiO_2 , por meio do método de deposição sol-gel por imersão *dip coating*, a uma velocidade de 0,5mm/s. Essa velocidade foi controlada por um voltímetro. A ddp (diferença de potencial) foi calculada para a velocidade 0,5 mm/s, sendo de 2,28 V. O Apêndice A apresenta a curva de calibração da velocidade do *dip-coating*. A FIG. 3.7 detalha o processo de revestimento das brocas e pinos.

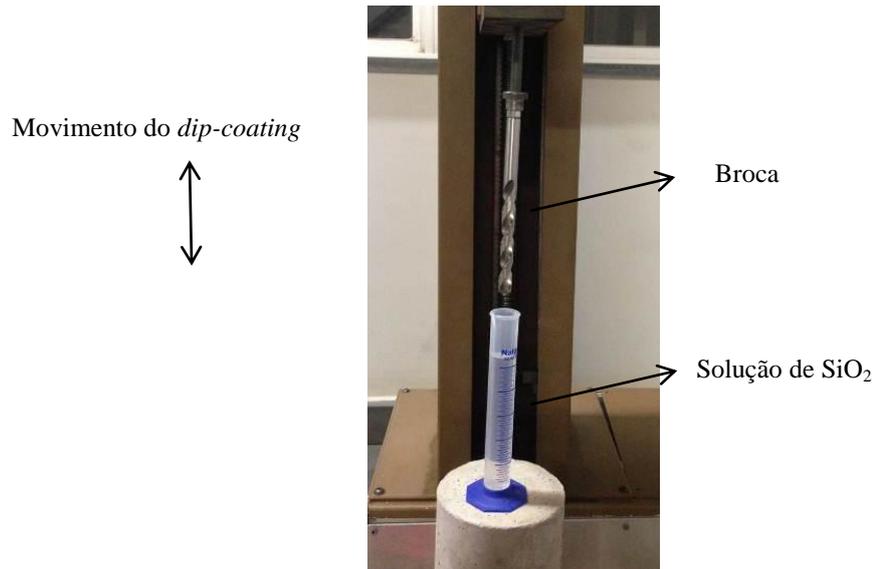


FIGURA 3. 7 - Broca revestida pelo método de sol-gel
 FONTE - Laboratório de Materiais Metálicos – UFMG

Após o revestimento, brocas e pinos receberam tratamento térmico a 400 °C por 2 horas, conforme indicado na FIG. 3.8 e foram resfriadas dentro do forno até a temperatura ambiente.

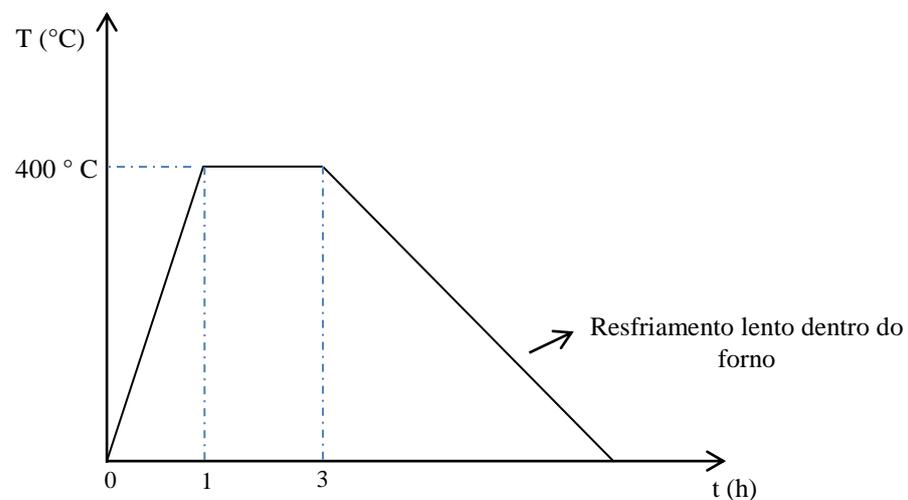


FIGURA 3. 8 - Curva de tratamento térmico realizado nas brocas e pinos revestidos de topo esférico e topo reto
 FONTE - O autor

3.2 Equipamentos e métodos

Os equipamentos e métodos empregados na realização dos experimentos serão descritos a seguir.

3.2.1 Tribômetro

Para a análise tribológica, utilizou-se um tribômetro da Microtest, modelo SMT-A/0100 – nº série B01100-19, para determinar o coeficiente de atrito dos materiais estudados. Os dados foram coletados por meio do programa Nanovea Tribometer Software. Aplicou-se uma carga normal constante de 10 N e velocidades de deslizamento de 40, 55 e 70 m/min, para todas as condições do pino. Em relação a carga, a área de contato do pino sobre disco gera uma mesma pressão durante o corte na furação, sendo assim, os resultados da análise tribológica podem ser comparáveis aos resultados obtidos na operação de furação. Concluía-se a duração dos testes quando a curva do coeficiente de atrito estava estabilizada. Não se utilizou lubrificante, a temperatura e a umidade relativa do ar foram ambiente. Os corpos de prova para avaliação da taxa de desgaste e pinos de topo esférico foram pesados na balança da marca Shimadzu, modelo AX200, carga máxima 200 g e resolução de 0,1 mg.

3.2.2 Análise metalográfica dos corpos de prova da furação

O equipamento utilizado para a análise metalográfica dos corpos de prova utilizados na operação de furação foi o microscópio óptico GX51 Olympus. Escolheu-se a região central, a qual possui o resfriamento mais lento, caracterizando melhor o número de nódulos, que apresentam influência quanto à região, pois, próximo à extremidade da peça e devido ao resfriamento mais rápido, o número de nódulos pode ser superior. A matriz predominante foi ferrítico-perlítica.

3.2.3 Durômetro

Utilizou-se um durômetro de bancada marca VEB, com diâmetro da esfera de 2,5 mm e carga de 62,5 kgf, do Instituto Politécnico da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (IPUC). A análise da dureza pela escala Brinell foi devido a maior área de contato, não

ocorrendo o risco de realizar a medição em uma determinada fase da microestrutura do ferro fundido e ocorrendo a possibilidade de variações nos valores. A medição da dureza dos corpos de prova do tribômetro e do ensaio de furação foi realizada em cinco regiões. A FIG. 3.9 (a) indica as regiões do ensaio de dureza do corpo de prova referentes ao ensaio de furação. O objetivo foi avaliar se a dureza do material é influenciada pela velocidade de resfriamento proveniente do processo de fundição, pois as regiões da extremidade do corpo de prova demonstram um resfriamento mais rápido e, conseqüentemente a dureza pode ser superior à da região central. A FIG. 3.9 (b) detalha a marca do indentador. A região com as cinco medições dos corpos de prova do tribômetro está indicada na FIG. 3.9 (c), não sendo necessário avaliar a influência da velocidade de resfriamento, devido ao seu tamanho, uma vez que eles foram cortados na região próxima à extremidade do corpo de prova da furação.

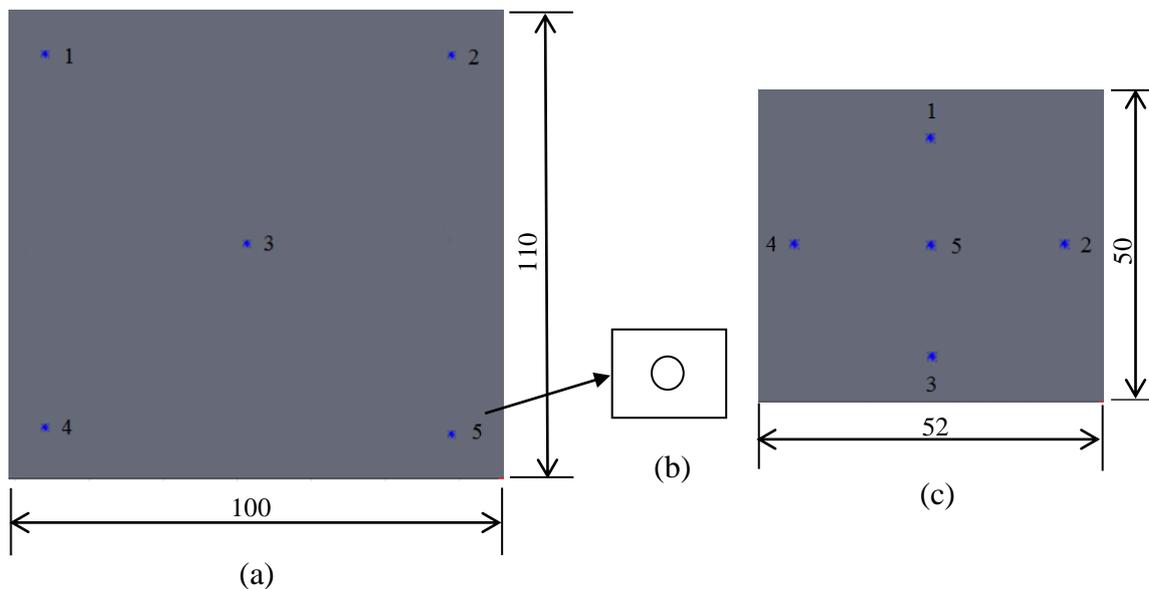


FIGURA 3.9 - Região do ensaio de dureza a) corpo de prova utilizado na furação; b) detalhe da marca do indentador; c) corpo de prova utilizado no tribômetro

FONTE - O autor

3.2.4 Montagem experimental

Os ensaios foram realizados utilizando o centro de usinagem ROMI modelo Discovery 560, com 9 kW de potência máxima e 7500 rpm de rotação máxima. Para monitorar a força de furação, desenvolveu-se um dinamômetro com capacidade máxima de 400 kgf equipado com uma célula de carga de 40 kgf. Para isso, o mecanismo construído foi baseado no princípio de funcionamento da alavanca, com o corpo de prova instalado na extremidade do braço de

força, de 50 mm de comprimento, e a célula de carga instalada na extremidade do braço de resistência, de 500 mm. A força aplicada no corpo de prova foi proporcional à relação do comprimento do braço de alavanca e capturada pela célula de carga. Portanto, pelo princípio da alavanca, a força medida na célula de carga foi dividida por dez. O dinamômetro desenvolvido estão ilustrados nas FIG. 3.10 e 3.11. Utilizou-se um espaçador de madeira para auxiliar a saída da broca na furação passante e evitar a danificação da aresta de corte.

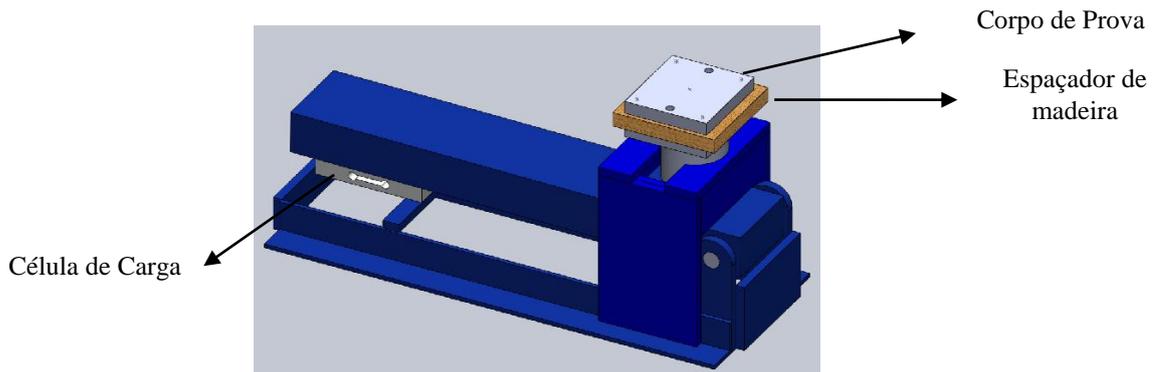


FIGURA 3. 10 - Imagem do dispositivo conforme projeto, detalhando o posicionamento da célula de carga, corpo de prova e o espaçador de madeira

FONTE - O autor



FIGURA 3. 11 - Imagem do dispositivo posicionado no CNC

FONTE - O autor

O sistema de aquisição de dados utilizado nos experimentos é composto pela célula de carga, pelo amplificador de sinal e pela placa de aquisição, como pode ser visto na FIG. 3.12. Para amplificar o sinal enviado pela célula de carga, empregou-se o amplificador instrumental AD595, com faixa de alimentação de +5 a +15 volts, sendo que, para a minimização do ruído, trabalhou-se com menor valor de tensão. Para realizar a interface com o computador, foi utilizada a placa de aquisição NI9215, com 4 canais de entrada analógica, resolução de 16 bits, entrada +/- 10 V. O software empregado foi o LabView versão 2013.



FIGURA 3. 12 - Sistema para aquisição de dados

FONTE - O autor

3.2.5 Calibração do sistema

A calibração do sistema foi realizada por meio de cargas conhecidas, avaliando-se a diferença de potencial em volts para cada carga. Com os dados coletados, foi possível estabelecer uma curva de regressão para a força de avanço e a voltagem, conforme indicado na EQUAÇÃO 4.1. A deformação ocorrida na célula de carga gerava uma diferença de potencial e, por meio da equação, calculava-se a força de avanço para cada ensaio. O valor da carga conhecida foi multiplicado pela aceleração da gravidade ($9,806 \text{ m/s}^2$). Os valores da carga e a calibração estão detalhados no Apêndice B.

$$Y = 1731,68x - 64,897 \quad (3.1)$$

Onde:

Y= força de avanço

x= diferença de potencial

Uma vez que a montagem experimental é constituída por amplificadores operacionais, é comum o surgimento de problemas de *offset* como o valor constante (64,897) da EQUAÇÃO 4.1. Como forma de compensação, o balanceamento da saída pode ser feito por meio de *Trimpot* externo (potenciômetro).

3.2.6 Rugosidade

Para avaliação da rugosidade da parede dos furos, utilizou-se um rugosímetro portátil Taylor Robson, modelo Surtronic 25, empregando um comprimento de amostragem de 2,5 mm e comprimento de avaliação de 12,5 mm (recomendado para os valores de R_a entre 2 e 10 μm). Para cada furo, realizaram-se 4 medições e a média da rugosidade final. Antes da medição,

calibrou-se o rugosímetro com o padrão. Foram avaliados os valores do desvio aritmético médio (R_a) e a altura máxima do perfil (R_z).

3.2.7 Erros geométricos

Para medição do diâmetro e do erro de circularidade dos furos, utilizou-se a máquina de medição por coordenadas da PUC Contagem-MG, marca Mitutoyo e modelo QM-Measure 353, com resolução de 0,5 μm . Para cada furo, efetuou-se a medição do diâmetro médio e do erro de circularidade em três planos, sendo uma medição a cada 4 mm de profundidade. Para o diâmetro médio, a medição foi realizada em três pontos e, para o erro de circularidade, a cada oito pontos.

3.2.8 Coleta dos cavacos

As amostras dos cavacos, coletadas no final de cada furo, foram fotografadas por uma câmera Canon modelo SX280HS. As imagens foram editadas no software Photoshop CS4, para recortes, alinhamento, ajustes de brilho e contraste.

3.2.9 Imagens

As fotografias dos pinos e das brocas foram realizadas por uma câmera Canon, modelo 6D, lente macro 28 mm.

O revestimento de SiO_2 foi caracterizado no microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo Quanta FEG 3D FEI, juntamente com a análise por espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Empregou-se esse mesmo equipamento para a análise das imagens e EDS dos pinos, referente ao ensaio no tribômetro, e análise do desgaste das brocas, relativa à terceira etapa do experimento.

Utilizou-se uma lupa microscópica, com ampliação de 25 ~ 500 X, para acompanhamento do desgaste das ferramentas durante o ensaio de furação referente à segunda etapa do trabalho.

As imagens das pistas desgastadas, pertinentes ao ensaio no tribômetro e à caracterização do

revestimento de TiN, foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura Jeol, modelo JSM-IT300, do IPUC, o qual possui um equipamento de microanálise acoplado e um detector para análise de EDS.

Durante a terceira etapa do experimento, acompanhou-se o desgaste das ferramentas no microscópio da marca Olympus, modelo SZ61, número de série 60349; e a captura das imagens foi efetuada no software Image-Pro Express, versão 5.1.0.12. Utilizou-se um dispositivo para garantir que a broca estivesse sempre na mesma posição e no ângulo de 31°, com o objetivo de manter a aresta principal de corte paralela, para a realização da medição do desgaste de flanco durante o ensaio e também para evitar qualquer distorção das imagens que interferisse nessa medição. As imagens da superfície da aresta secundária de corte foram acompanhadas pela câmera Canon SX280 HS.

3.3 Planejamento fatorial completo

Realizou-se o planejamento fatorial completo, sendo três fatores e três níveis juntamente com as interações. Dos três fatores escolhidos, dois eram variáveis quantitativas, a velocidade de corte (v_c) e o avanço (f) e a variável qualitativa era a ferramenta de corte. Os fatores velocidade de corte e avanço foram escolhidos porque influenciam a vida da ferramenta, além de terem relação com outras características do processo, como temperatura, qualidade da superfície, força de corte. Os valores recomendados de velocidade de corte e avanço, para ferro fundido, foram definidos conforme citado por Kalpakjian e Schmid (2010), em que a velocidade de corte varia entre 20 e 60 m/min, e o avanço, de 0,025 a 0,30 mm/rev.

Quanto às ferramentas, o objetivo foi correlacionar o tipo de revestimento, sendo o TiN conhecido no mercado, pois apresenta diversas aplicações, com o revestimento de SiO₂, que é pouco conhecido na aplicação de ferramentas de corte e comparar com a ferramenta sem revestimento, na furação do ferro fundido nodular.

O planejamento fatorial aplicado às condições experimentais deste trabalho é uma matriz tipo 3³, apresentando 27 combinações. Para avaliar a repetibilidade do sistema, realizou-se uma réplica, totalizando 54 ensaios. Analisaram-se os dados com o auxílio do *software* estatístico MINITAB versão 17, e a técnica estatística empregada foi a Análise de Variância (ANOVA),

para um nível de significância de 95%. Efetuou-se a análise dos resíduos, além dos efeitos principais e das interações para todas as combinações descritas na TAB. 3.5.

TABELA 3. 5 - Condições testadas

Fatores	Níveis		
A- Velocidade de Corte	40 m/min	55 m/min	70 m/min
B- Avanço	0,05 mm/ rev.	0,15 mm/ rev.	0,25 mm/rev.
C- Ferramenta	Sem revestimento e sem tratamento térmico	Revestimento de dióxido de silício	Revestimento de nitreto de titânio

FONTE - O autor

3.4 Ensaio na furação

Para cada broca avaliada, utilizou-se um corpo de prova de ferro fundido nodular, totalizando 18 furos em cada placa. A troca das brocas foi realizada quando apresentavam um nível de desgaste evidente. A cada três furos, avaliou-se o desgaste qualitativo, sendo coletadas as imagens por meio da lupa microscópica. Na FIG. 3.13, está a disposição dos furos em cada placa, e, no Apêndice C, o desenho do corpo de prova utilizado para programação no CNC.

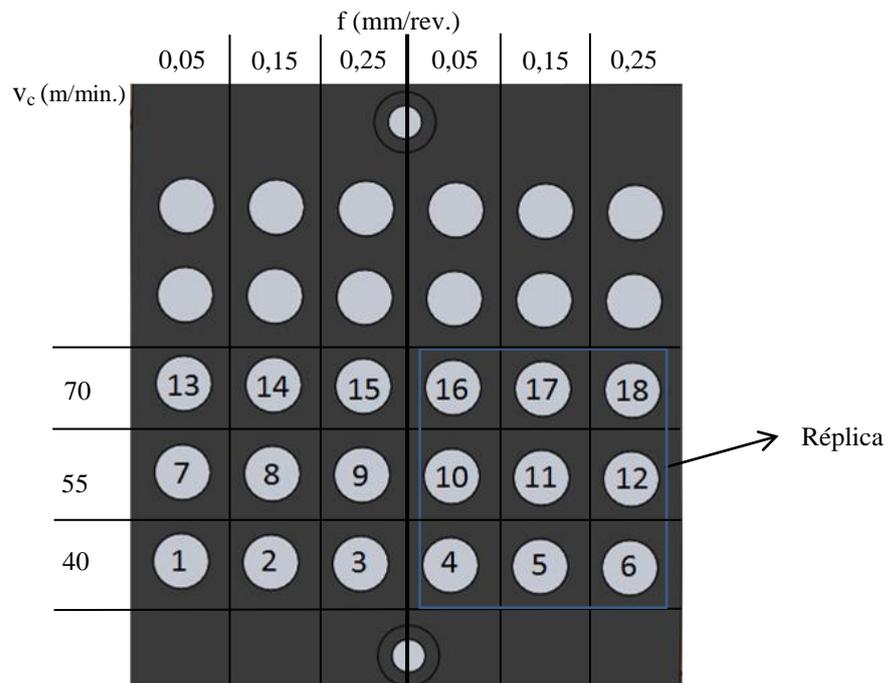


FIGURA 3. 13 - Disposição dos furos no corpo de prova

FONTE - O autor

Após o ensaio de desgaste, as brocas foram inseridas numa solução de Etanol PA para a limpeza ultrassônica. Utilizou-se o ultrassom Limp Sonic, modelo LS- 1,3 D- 3/x. 1800, por 8 horas, para a retirada de material aderido. O objetivo da limpeza foi a eliminação da aderência de material para melhor visualização do tipo de desgaste das brocas após ensaio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios realizados neste trabalho serão apresentados neste capítulo, na seguinte ordem: análise metalográfica e análise da dureza dos corpos de prova; caracterização dos revestimentos e a análise tribológica, correspondentes à primeira etapa do trabalho. Em seguida, as avaliações das análises qualitativas do desgaste das ferramentas, da força de avanço, da rugosidade, do diâmetro, do erro de circularidade, além da análise de rebarba e dos cavacos. E, por último, a avaliação do desgaste, correspondente à terceira etapa do experimento. Nos tratamentos estatísticos, consideraram-se o nível de significância de 0,05, tendo sido aplicada a análise de variância para a força de corte, rugosidade e diâmetro médio.

4.1 Análise metalográfica

As FIG. 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam as imagens metalográficas sem e com ataque de nital 4% para os três corpos de prova utilizados no ensaio de furação. Os constituintes da microestrutura estão indicados na FIG. 4.1.

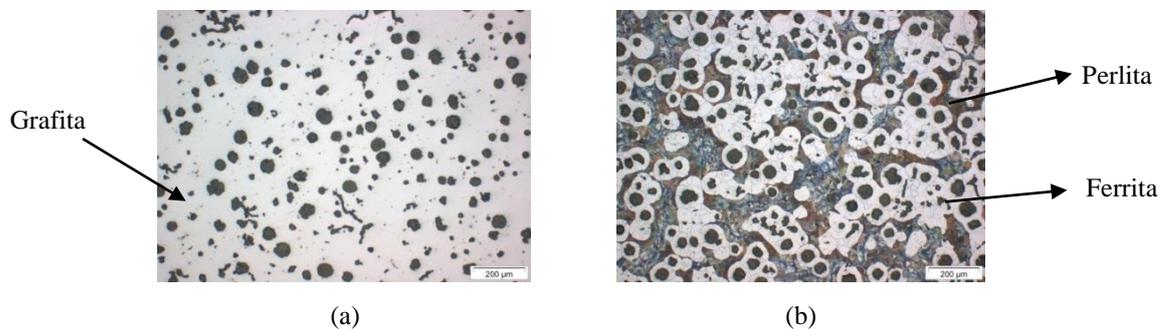


FIGURA 4. 1 - a) corpo de prova para a broca sem revestimento e sem ataque; b) com ataque

FONTE - O autor

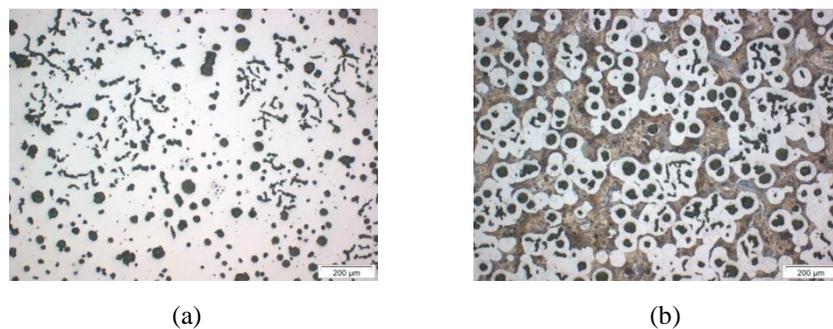


FIGURA 4. 2 - a) corpo de prova para a broca revestida com SiO_2 sem ataque; b) com ataque

FONTE - O autor

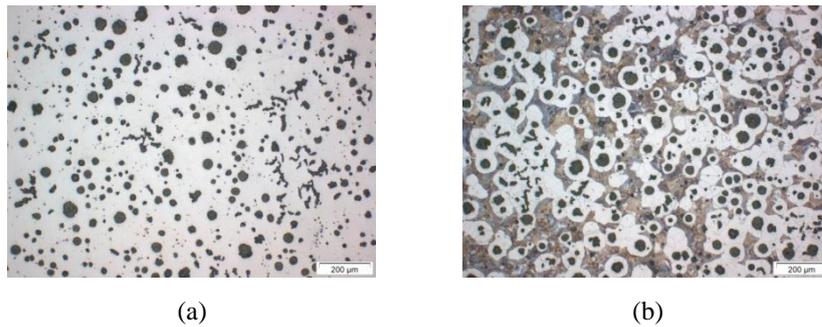


FIGURA 4. 3 - a) corpo de prova para a broca revestida com TiN sem ataque; b) com ataque
FONTE - O autor

A TAB. 4.1 apresenta as características metalográficas para os três corpos de prova empregados para o ensaio de furação, cuja matriz predominante foi é ferrítico-perlítica.

TABELA 4. 1 - Ensaio metalográfico

Amostra	Região	Matriz		Grafita			
		Ferrita (%)	Perlita (%)	Nodularização (%)	Nódulos (p/mm ²)	Forma	Tamanho
CP- Broca sem sevestimento	Central	58	42	81	187	I e II	8,7,6
CP- Broca revestida com SiO ₂	Central	51	49	73	193	II	8,7,6
CP- Broca revestida com TiN	Central	58	42	80	215	I e II	8,7,6

FONTE - O autor

4.2 Análise da dureza

Após a medição de dureza dos corpos de prova utilizados no ensaio de furação, observou-se que não houve grandes diferenças dos valores relativos à região central do corpo de prova em comparação com a região externa. Em média, os valores da dureza dos corpos de prova utilizados na furação foram $146 \text{ HV} \pm 6,0$; e os valores médios de dureza dos corpos de prova utilizados no tribômetro foram $170 \text{ HV} \pm 8,0$. Os valores para cada corpo de prova estão detalhados no Apêndice D.

4.3 Caracterização do revestimento de Dióxido de silício

As imagens da FIG. 4.4 detalham a espessura do revestimento visualizada na superfície de comprimento do pino de topo reto, apresentando valores entre 390 e 500 nm. Ao serem analisadas as imagens, observam-se regiões em que a superfície não foi uniforme e a adesão não foi completa, mostrando delaminação do revestimento. Conforme citado por Chen *et al.*

(2000), o revestimento pode ter apresentado problemas em relação à molhabilidade do sol durante a deposição. Ver também Apêndice J.

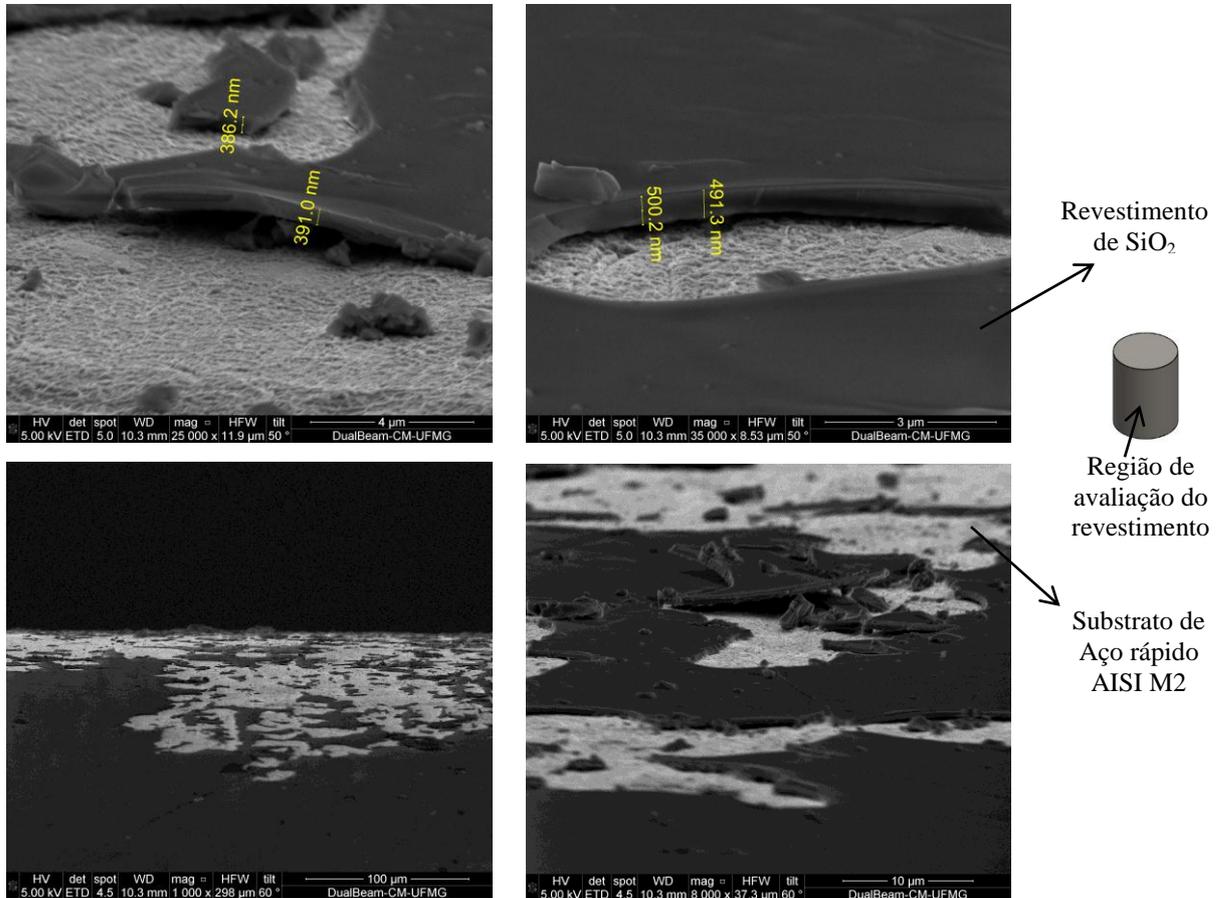


FIGURA 4. 4 - Espessura do revestimento de dióxido de silício e comportamento do revestimento no substrato
 FONTE - O autor

O revestimento de SiO₂ poderia também ter sido visualizado no pino de topo esférico que apresentou como vantagens o seu formato, pois há uma redução gradual da seção que facilita o escoamento da solução líquida sol-gel, proporciona um filme homogêneo e menores possibilidades de trinca após revestimento. Porém, já o pino de topo reto, devido a sua seção ser reta, não facilita o escoamento da fase líquida ou da solução sol-gel, levando a maior heterogeneidade do filme, podendo ocorrer trincas. Diante desse fato, optou-se por visualizar o revestimento no pino de topo reto, pois acreditava que seria mais fácil a preparação do pino para a visualização da espessura do revestimento, mesmo sabendo da possibilidade da heterogeneidade do filme.

As imagens da FIG. 4.5 detalham o EDS da região com revestimento e da região sem revestimento, juntamente com o mapeamento dos elementos químicos da amostra. Conforme o EDS da região do revestimento, observam-se maiores picos dos elementos Si e O correspondentes ao revestimento de SiO_2 . Os picos de Fe, Cr, Mo, V, observados no espectro, podem ter sido originados a partir do substrato, devido à maior profundidade de penetração dos raios X. A análise do EDS da região do substrato indica os elementos químicos do aço rápido; contudo, o teor de Si e O exibiram menores picos. Por meio do mapeamento, a região do filme revestido é destacada pela presença do Si; e nas demais regiões, onde não há revestimento, os elementos químicos em destaque são o Fe, Cr, Mo, V e W, correspondentes ao substrato do aço rápido.

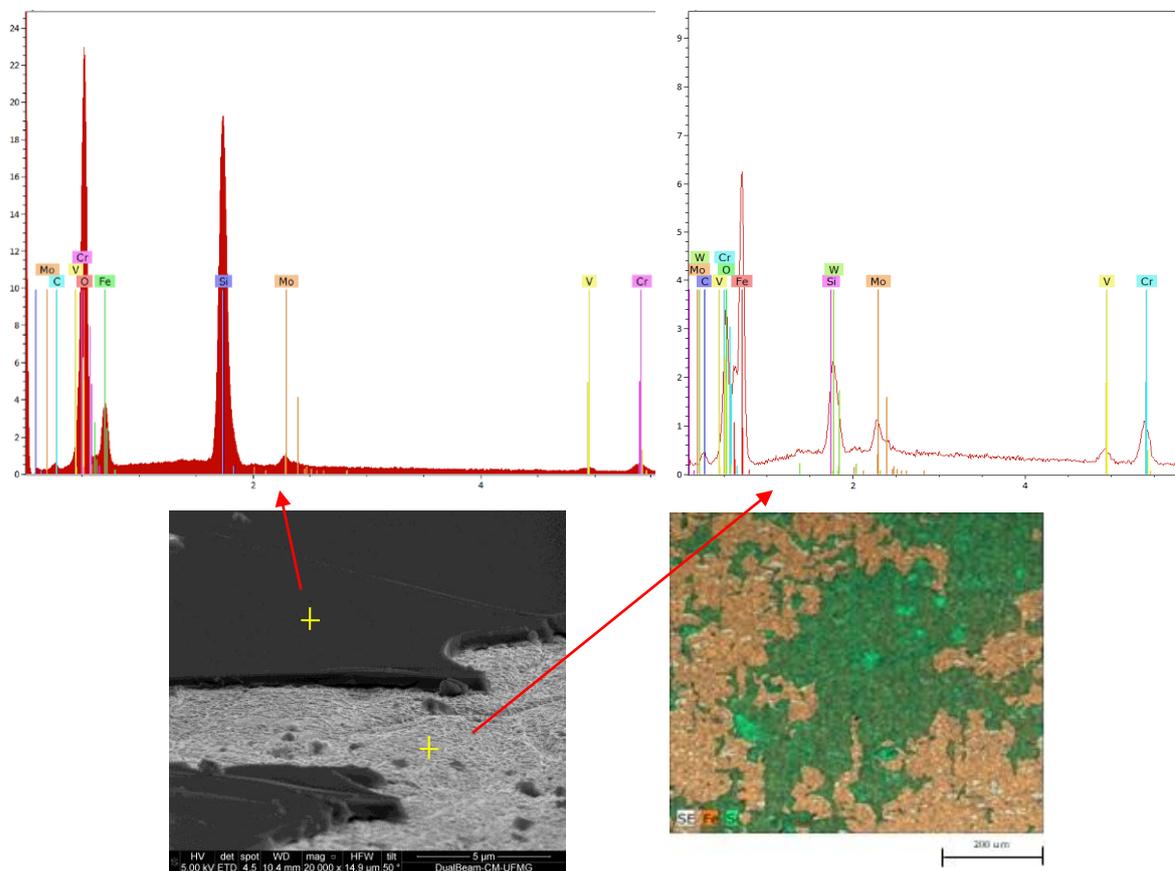


FIGURA 4. 5 - EDS do revestimento e do substrato e o mapeamento do revestimento

FONTE - O autor

4.4 Caracterização do revestimento de Nitreto de titânio

Nas imagens da FIG. 4.6 detalham a espessura do revestimento do TiN sob o substrato do aço rápido da broca AISI M2. A análise do EDS indica os elementos do revestimento, como Ti, N

e Fe, e os elementos do substrato, como Mo, Cr, V, W, C e Fe.

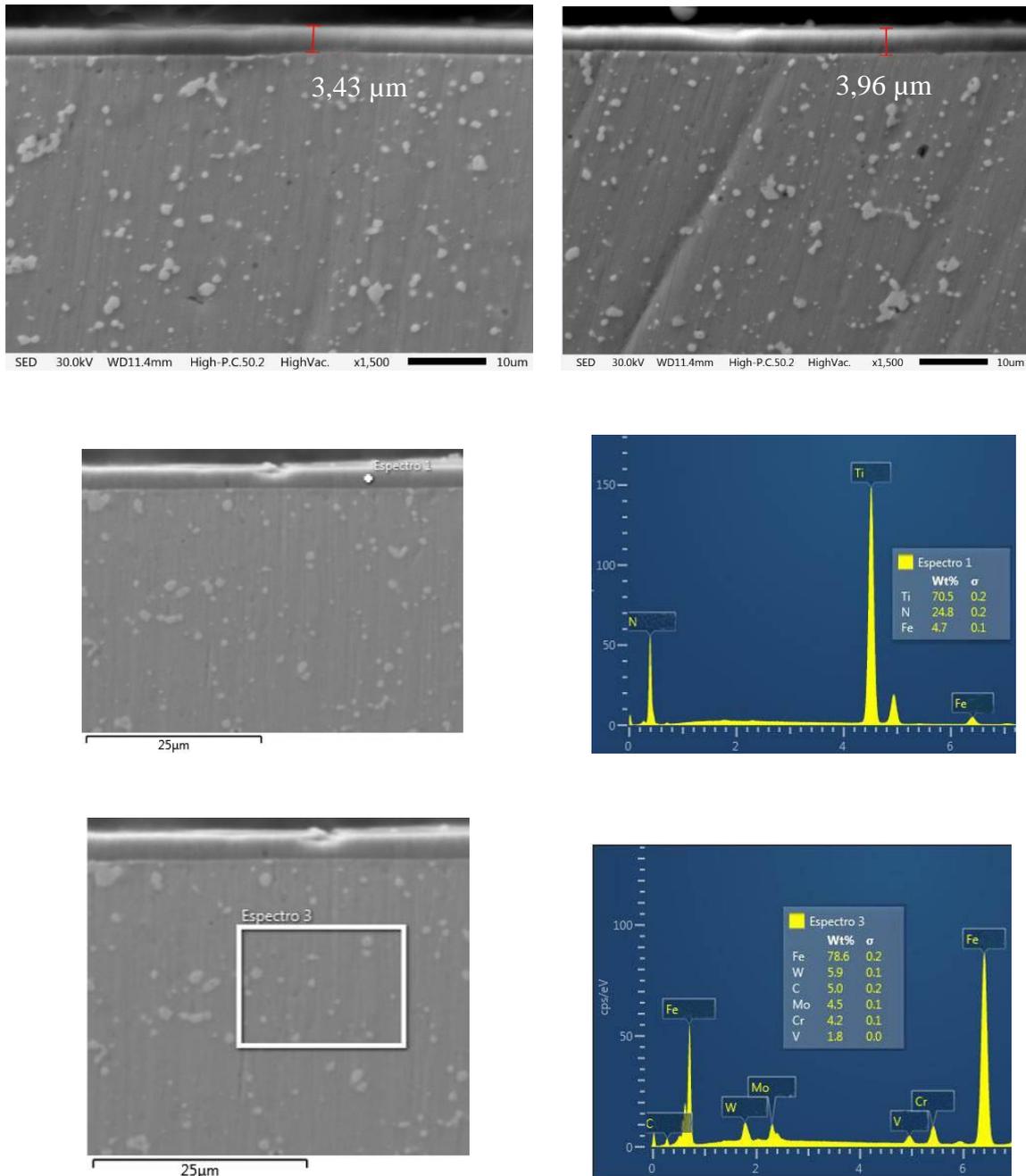


FIGURA 4. 6 - EDS e espessura do revestimento TiN

FONTE - O autor

4.5 Análise do coeficiente de atrito

O comportamento do coeficiente de atrito (μ) dos três pinos: sem revestimento, revestido com SiO_2 e TiN, deslizando contra o corpo de prova em ferro fundido nodular, está representado nas FIG. 4.7; 4.8 e 4.9.

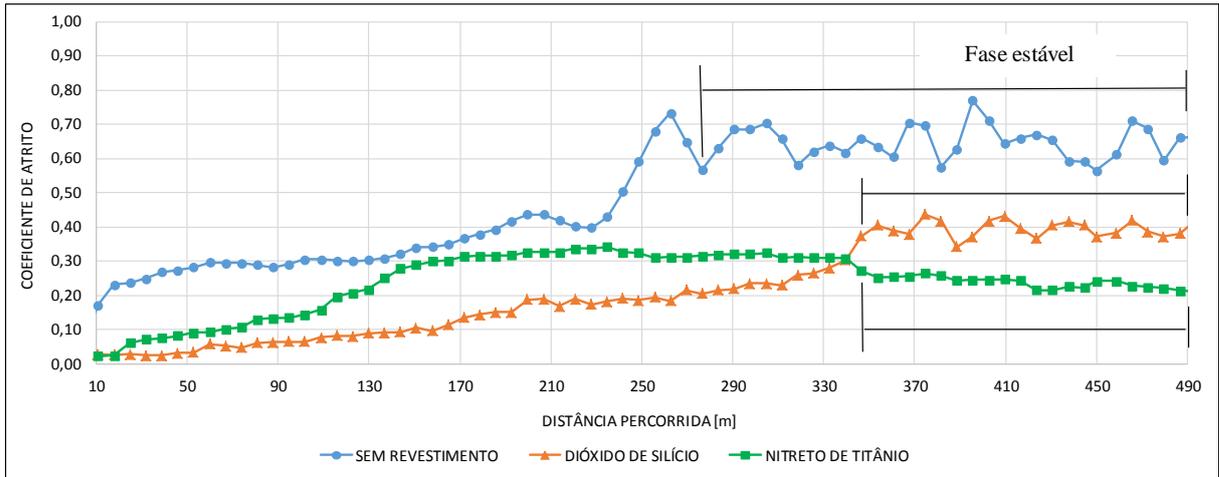


FIGURA 4. 7 - Coeficiente de atrito para a velocidade de deslizamento 40 m/min

FONTE - O autor

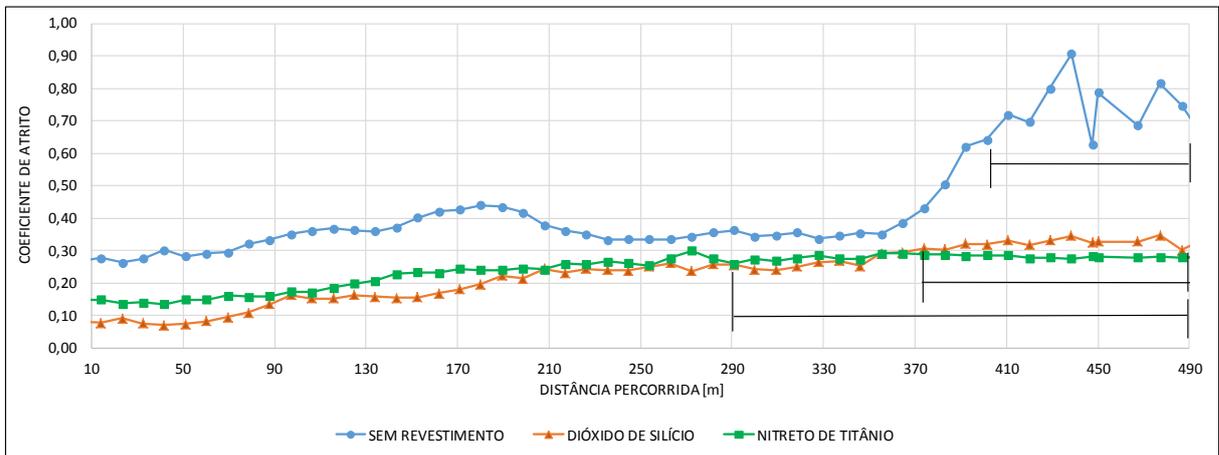


FIGURA 4. 8 - Coeficiente de atrito para a velocidade de deslizamento 55 m/min

FONTE - O autor

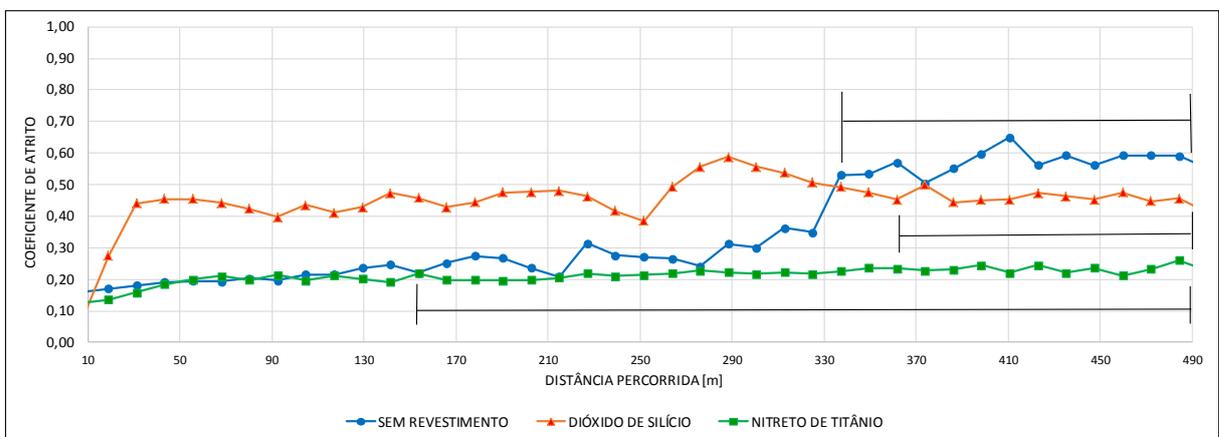


FIGURA 4. 9 - Coeficiente de atrito para a velocidade de deslizamento 70 m/min

FONTE - O autor

As velocidades de deslizamento utilizadas para todos os ensaios do pino sobre disco foram iguais à velocidade de corte programada para os testes na furação referente à segunda etapa do trabalho. Para as três velocidades, a distância percorrida analisada foi de 490 m, e os diâmetros das pistas dos corpos de prova para as velocidades 40 m/min, 55 m/min e 70 m/min foram, respectivamente 26,4 mm; 36,4 mm e 46,4 mm.

De acordo com Blau (2009), a curva de comportamento do atrito é dividida entre *run in* e estágio estacionário (fase estável). Quando duas superfícies estão em contato, sobre carga e movimento, mudanças nas superfícies podem ocorrer e são detectáveis pela mudança no atrito. Dessa forma, implicam em mudanças na forma e na rugosidade entre a condição inicial (*run in*) até a forma de estágio estacionário, onde atinge a conformidade geométrica, alcançam e mantém um nível de coeficiente de atrito médio relativamente constante. Sendo assim a coleta do coeficiente de atrito médio foi realizada na fase estável e os valores estão sintetizados na TAB.4.2.

TABELA 4. 2 - Coeficiente atrito para cada velocidade de deslizamento

	Velocidades	Coefficiente de atrito
Pino sem revestimento	40 m/min	0,65 ± 0,05
	55 m/min	0,73 ± 0,04
	70 m/min	0,59 ± 0,05
Pino dióxido de silício	40 m/min	0,40 ± 0,04
	55 m/min	0,33 ± 0,04
	70 m/min	0,47 ± 0,05
Pino nitreto de titânio	40 m/min	0,24 ± 0,02
	55 m/min	0,28 ± 0,03
	70 m/min	0,22 ± 0,02

FONTE - O autor

Em geral, os valores dos coeficientes de atrito foram influenciados pelo revestimento e a pela presença da grafita. Do ponto de vista tribológico, a grafita no ferro fundido melhora a resistência ao desgaste, pois atua como agente lubrificante formando um filme de baixa resistência ao cisalhamento, reduzindo o coeficiente de atrito. Este é influenciado também pela microestrutura do material do corpo de prova, pois a matriz ferrítica, conforme relatado por Pagano *et al.* (2016), possui alta ductilidade e baixa dureza, apresentando boa resistência

em condições onde ocorrem atrito e abrasão moderados. Os menores valores de coeficiente de atrito foram para os pinos revestidos de SiO₂ e TiN.

Observa-se que, para maiores velocidades de deslizamento, ocorre redução do coeficiente de atrito para o par tribológico pino sem revestimento e pino revestido de TiN sobre o corpo de prova em ferro fundido nodular. Conforme detalhado por Rabinowicz (1995), a redução do coeficiente de atrito pode ser via redução da tensão de cisalhamento da interface, devido o aumento da temperatura e ou a formação de óxidos. Porém, o pino revestido de SiO₂ não apresentou o mesmo comportamento que o pino revestido de TiN, sendo para velocidade de 70 m/min ocorreu aumento do coeficiente de atrito para essa velocidade.

A TAB. 4.3 detalha a taxa de desgaste do par tribológico no ensaio pino sobre disco. A taxa de desgaste (Q) corresponde ao volume de material removido por unidade de distância de deslizamento, representado pela equação: $(Q= V/D)$. Para efeito de cálculo, considerou-se a densidade do ferro fundido como sendo de 7,3 kg/m³. Nessa tabela também apresenta o desvio médio aritmético R_a para os corpos de prova utilizados no tribômetro e que conforme norma ASTM G99-05 (2010) devem apresentar valores menores que 0,8 µm.

TABELA 4. 3 - Taxa de desgaste do corpo de prova

Corpo de Prova	Rugosidade R _a (µm)	Dureza média do corpo de prova (HV)	Velocidades	Varição da massa do corpo de prova [g]	Volume Desgastado - (V) [mm ³]	Distância percorrida - (D) [mm]	Q (Taxa de Desgaste do corpo de prova [mm ³ /mm])
Pino sem Revestimento	0,30	171	40 m/min	0,1333	18000	513180	3,50 x 10 ⁻²
			55 m/min	0,1167	16000	642960	2,49 x 10 ⁻²
			70 m/min	0,1705	23000	494490	4,65 x 10 ⁻²
Pino revestido com Dióxido de silício	0,36	166	40 m/min	0,0041	560	1044770	5,36 x 10 ⁻⁴
			55 m/min	0,0005	68	712140	9,54 x 10 ⁻⁵
			70 m/min	0,1776	24000	494500	4,85 x 10 ⁻²
Pino revestido com Nitreto de titânio	0,42	176	40 m/min	0,0012	1600	741690	2,15 x 10 ⁻⁴
			55 m/min	0,0001	13	1039090	1,25 x 10 ⁻⁵
			70 m/min	0,0035	480	3257020	1,47 x 10 ⁻⁴

FONTE - O autor

Foi possível verificar que houve perda de massa para os três corpos de prova. Os pinos sem revestimento apresentaram as maiores taxas de desgaste para as três velocidades de deslizamento. Já os pinos com revestimento de SiO₂ exibiram baixas taxas de desgaste até a

velocidade de 55 m/min; porém, na velocidade de 70 m/min, a taxa de desgaste apresentou valores próximos aos do pino sem revestimento, comprovando uma baixa resistência ao desgaste do revestimento nas velocidades de deslizamento acima de 55 m/min. O melhor comportamento foi para o corpo de prova correspondente ao pino revestido com TiN, que resultaram em um baixo coeficiente de atrito e baixas taxas de desgaste para todas as velocidades de deslizamento. Esse fato corrobora as afirmações de Holmberg (2009) que a alta dureza do revestimento de TiN (2000 HV - 2500 HV) apresentou uma boa resistência ao desgaste abrasivo e boa estabilidade química resultando em uma alta resistência ao desgaste. A competição entre a dureza e a tensão de cisalhamento interfere tanto nos resultados de desgaste, quanto nos resultados do coeficiente de atrito, pois um desses fatores irá prevalecer para os pares tribológicos.

As variações de massa e da taxa de desgaste para a velocidade de deslizamento de 40 m/min foram maiores tanto para os pinos sem revestimento quanto para os revestidos com SiO₂ e TiN, em comparação com a velocidade de 55 m/min, podendo ter ocorrido influência do efeito da temperatura e da formação de óxidos na superfície. Na velocidade de 40 m/min, a condução do calor para fora da interface poderia ter sido rápida, mas a temperatura da interface permaneceu baixa e a formação de óxidos na superfície foi mais lenta, contribuindo para aumentar a taxa de desgaste, conforme discutido por Hutchings (1992) sobre o efeito da temperatura na velocidade de deslizamento. Para a velocidade de 55 m/min, um aumento da temperatura poderia ter contribuído para o crescimento de filmes de óxidos, reduzindo a taxa de desgaste. No caso da velocidade de 70 m/min, esta foi tão alta que nem deu tempo de formar os filmes de óxidos, contribuindo para o aumento da taxa de desgaste para os pinos sem revestimento e para o pino revestido de SiO₂. Nessa velocidade, o revestimento de SiO₂ não contribuiu para reduzir a taxa de desgaste, diferentemente do comportamento do pino revestido de TiN, no qual a presença do revestimento auxiliou na sua redução.

4.6 Análise das pistas

O QUADRO 4.1 contém as imagens da superfície das pistas, obtidas por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV), juntamente com as larguras correspondentes aos pinos sem revestimento. As maiores larguras das pistas foram registradas para os pinos sem revestimento em todas as velocidades de deslizamento, quando comparadas com as pistas desgastadas dos pinos com revestimento de SiO₂ e TiN. O QUADRO 4.2 apresenta as imagens do MEV e o

EDS para as pistas dos pinos sem revestimento, que indicam a presença de Fe, Si e O, sugerindo que houve desgaste somente do corpo de prova de ferro fundido nodular. Não se notou a presença de elementos químicos do substrato do aço rápido, fato que elucida que não houve desgaste de adesão proveniente do material do pino. As imagens das pistas sugerem uma deformação plástica de material, que, influenciada pela dureza do material do corpo de prova e pela presença de ranhuras paralelas na direção de deslizamento, indica um desgaste abrasivo para todas as velocidades. Conforme relatado na revisão bibliográfica, o aumento da velocidade de deslizamento colabora para o aumento da temperatura e da taxa de oxidação, pois reduz a tensão de cisalhamento da interface, levando ao mecanismo de desgaste suave. Porém, esse fato não ocorreu para o pino sem revestimento, para todas as velocidades foi evidenciado maiores larguras das pistas contribuindo para um severo desgaste abrasivo.

As imagens da superfície das pistas e as larguras correspondentes aos pinos revestidos de SiO_2 são retratadas no QUADRO 4.3. As larguras das pistas foram menores para as velocidades de 40 m/min e 55 m/min, comparadas com as pistas do pino sem revestimento, já que a presença dos revestimentos contribuíram para essa redução, conforme verificado os valores de coeficiente de atrito e taxa de desgaste. Porém, na velocidade de 70 m/min, houve um aumento da largura da pista, pois a presença de ranhuras paralelas à direção de deslizamento e a deformação plástica, influenciada pela dureza do ferro fundido, levaram a um severo desgaste abrasivo. Diante disso, sugere que com o aumento da velocidade de deslizamento, ocorreu elevação da temperatura, diminuindo a resistência das asperezas do material e aumentando a área de contato, o que ocasionou remoção rápida do revestimento e elevada deformação plástica, acelerando o desgaste. As imagens do MEV e o EDS das pistas estão representados no QUADRO 4.4. Os elementos químicos predominantes foram o Fe, Si e O, correspondente ao corpo de prova do ferro fundido nodular. Não se percebeu aumento do teor de Si, que poderia ser proveniente do pino revestido de SiO_2 , o que elucida que não houve desgaste de adesão nas pistas. Para as velocidades de 40 m/min e 55 m/min, observaram-se ranhuras paralelas na pista e suave desgaste abrasivo.

No QUADRO 4.5, detalha as pistas dos pinos revestidos com TiN, as imagens e as larguras. As pistas apresentaram largura inferior à do pino sem revestimento, o que pode ser atribuído ao fato de que a presença do revestimento aumentou a resistência ao desgaste nas três velocidades analisadas: 40, 55 e 70 m/min. As imagens do MEV e o EDS estão presentes no QUADRO 4.6. Os elementos predominantes foram o Fe, Si e O. Não houve presença do

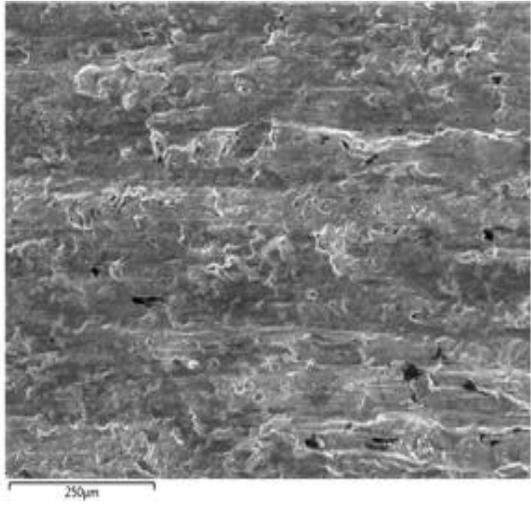
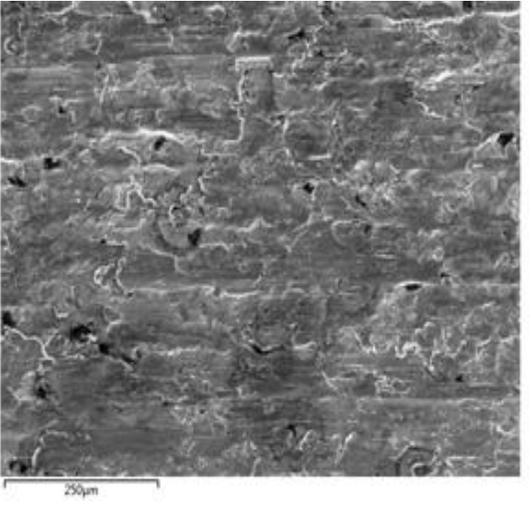
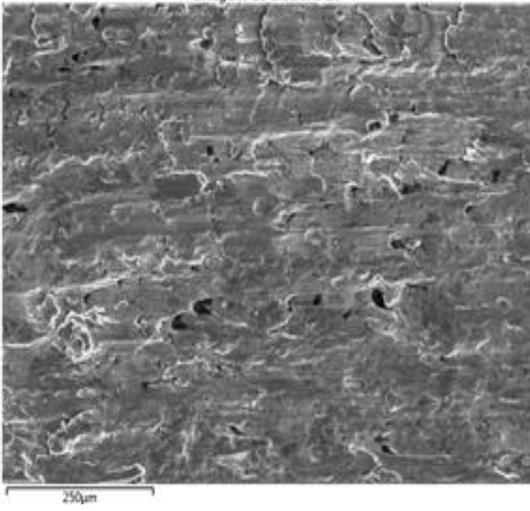
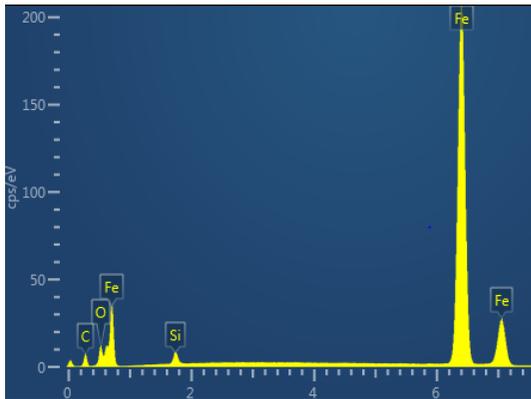
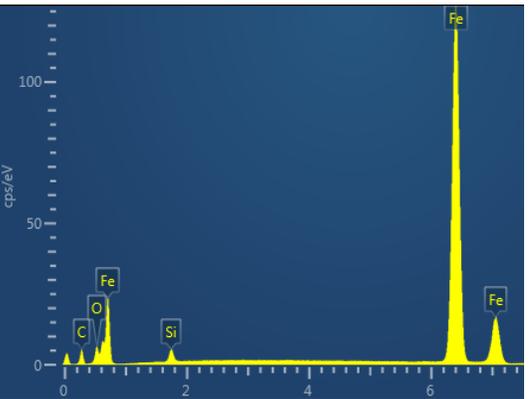
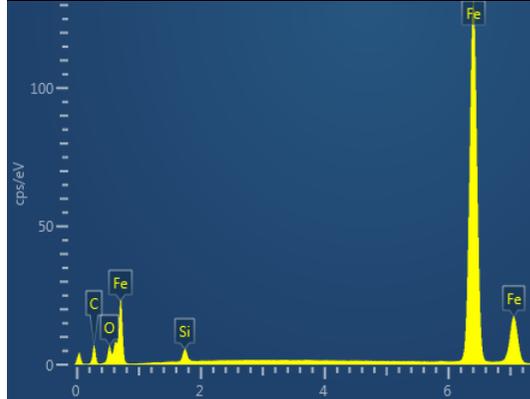
elemento químico Ti, o que torna claro que não ocorreu desgaste de adesão nas pistas, proveniente do pino revestido de TiN. Para as três velocidades, notou-se deformação plástica em decorrência do material do corpo de prova e de ranhuras paralelas à direção de deslizamento, indicando um suave desgaste abrasivo.

QUADRO 4. 1 - Imagens e largura das pistas para o pino sem revestimento

	Velocidade de deslizamento - 40 m/min	Velocidade de deslizamento - 55 m/min	Velocidade de deslizamento - 70 m/min
Pino sem revestimento			
Largura [mm]	1,413	1,840	1,874

FONTE - O autor

QUADRO 4. 2 - Imagens do MEV e EDS para as pistas do pino sem revestimento

	Velocidade de deslizamento - 40 m/min	Velocidade de deslizamento - 55 m/min	Velocidade de deslizamento - 70 m/min
Pino sem revestimento			
EDS			

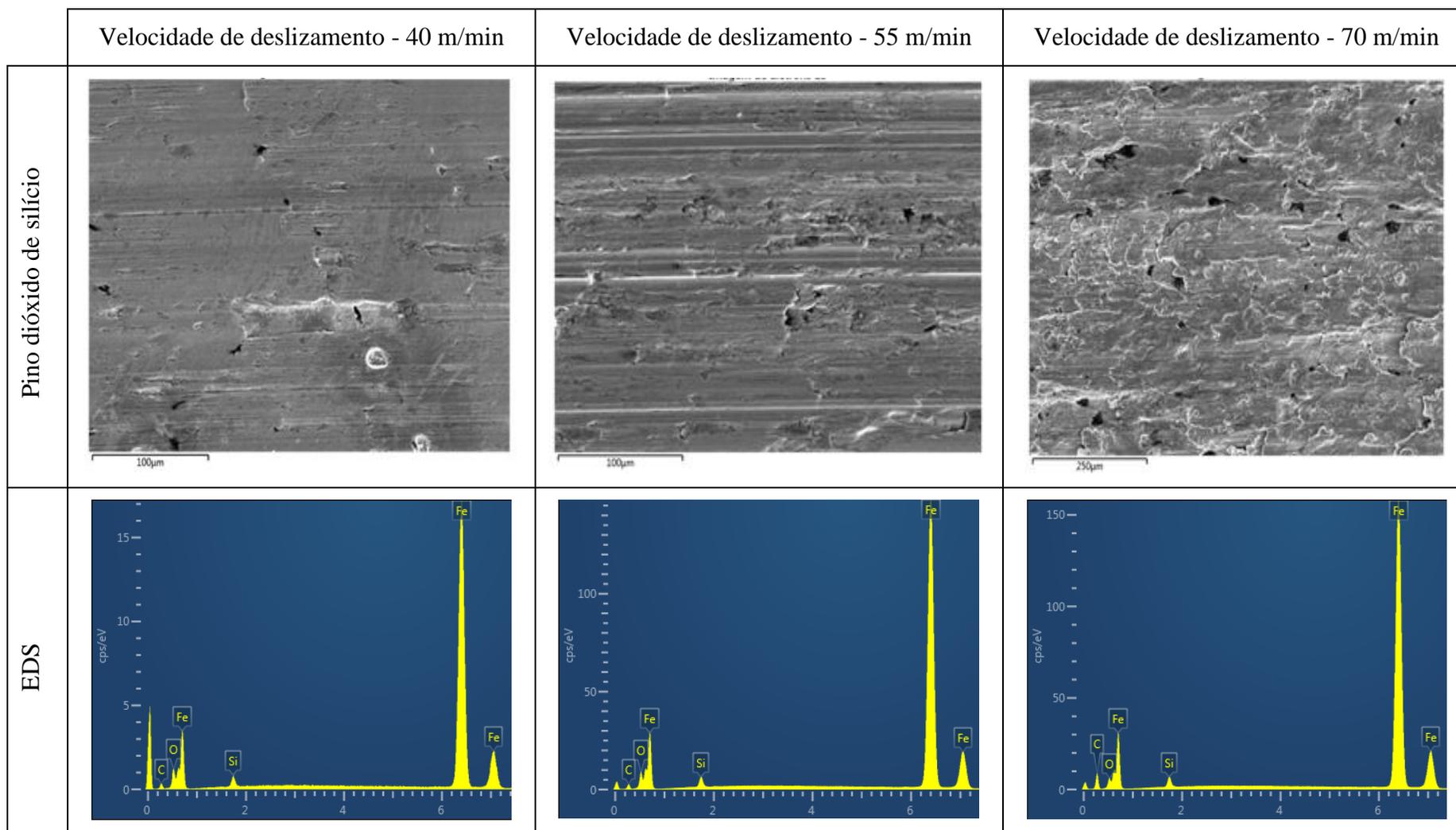
FONTE - O autor

QUADRO 4. 3 - Imagens e largura das pistas para o pino de dióxido de silício

	Velocidade de deslizamento - 40 m/min	Velocidade de deslizamento - 55 m/min	Velocidade de deslizamento - 70 m/min
Pino dióxido de silício			
Largura [mm]	0,478	0,538	1,6448

FONTE - O autor

QUADRO 4. 4 - Imagens do MEV e EDS para as pistas do pino dióxido de silício



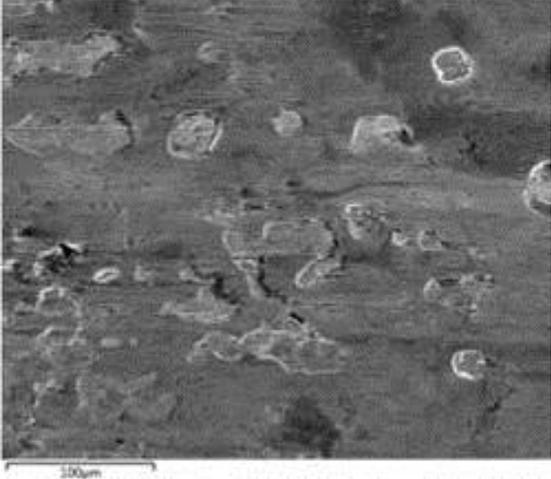
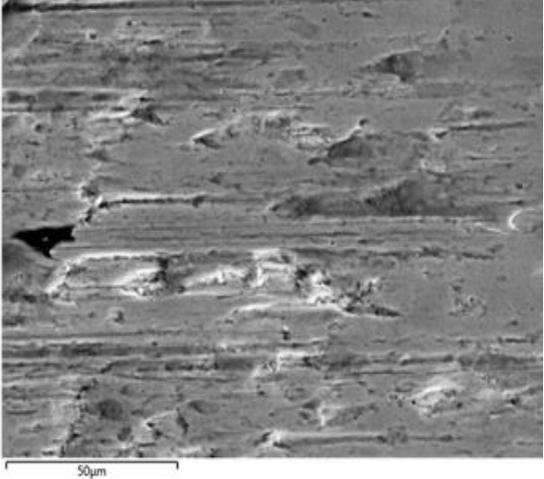
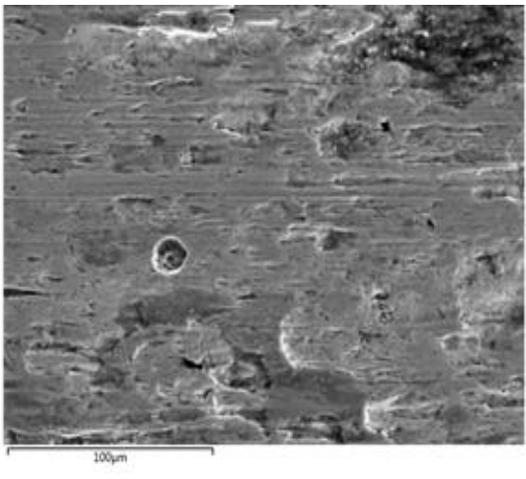
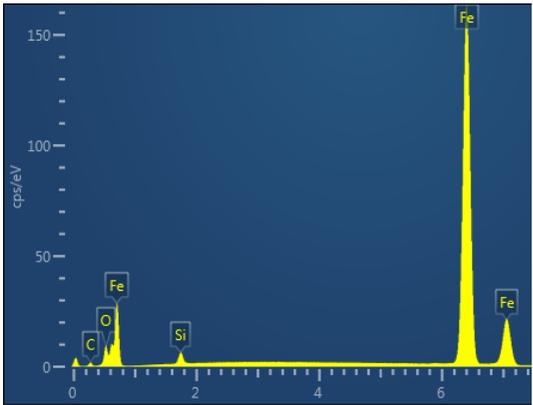
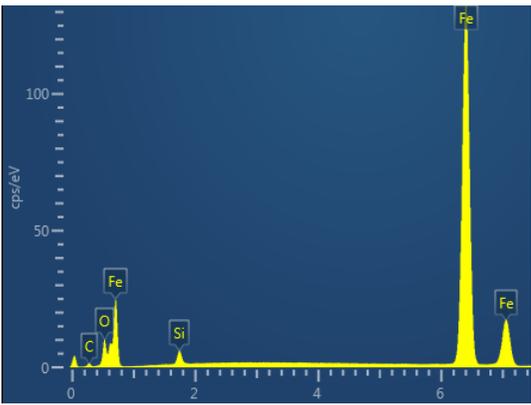
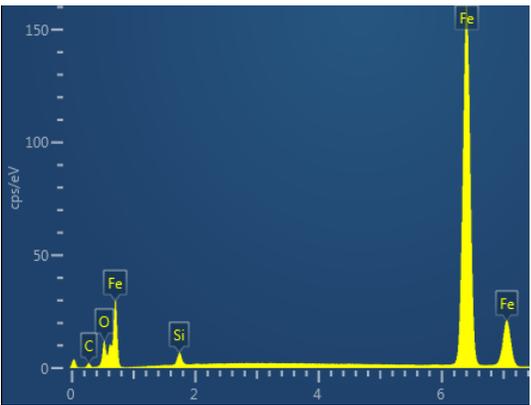
FONTE - O autor

QUADRO 4. 5 - Imagens e largura das pistas para o pino de nitreto de titânio

	Velocidade de deslizamento - 40 m/min	Velocidade de deslizamento - 55 m/min	Velocidade de deslizamento - 70 m/min
Pino nitreto de titânio			
Largura [mm]	0,265	0,327	0,412

FONTE - O autor

QUADRO 4. 6 - Imagens do MEV e EDS para a pista do pino nitreto de titânio

	Velocidade de deslizamento - 40 m/min	Velocidade de deslizamento - 55 m/min	Velocidade de deslizamento - 70 m/min
Pino nitreto de titânio			
EDS			

FONTE - O autor

Durante o ensaio no tribômetro, para todos os pinos foi observada a presença de debris, indicando ser flocos de grafita que podem contribuir para o desgaste abrasivo, conforme detalhado na FIG. 4.10. Durante a análise de EDS de todas as pistas desgastadas, perceberam-se pontos escuros, podendo ser a grafita do corpo de prova. Para confirmar essa informação, foi realizado o EDS nesse ponto escuro, que indicou a presença dos elementos C, Fe e O, conforme mostrado na FIG. 4.11. Nota-se um elevado pico do elemento C, confirmando a hipótese correspondente à grafita do ferro fundido. Esse fato confirma que os debris observados durante o ensaio pino sobre disco são provenientes da grafita do ferro fundido.

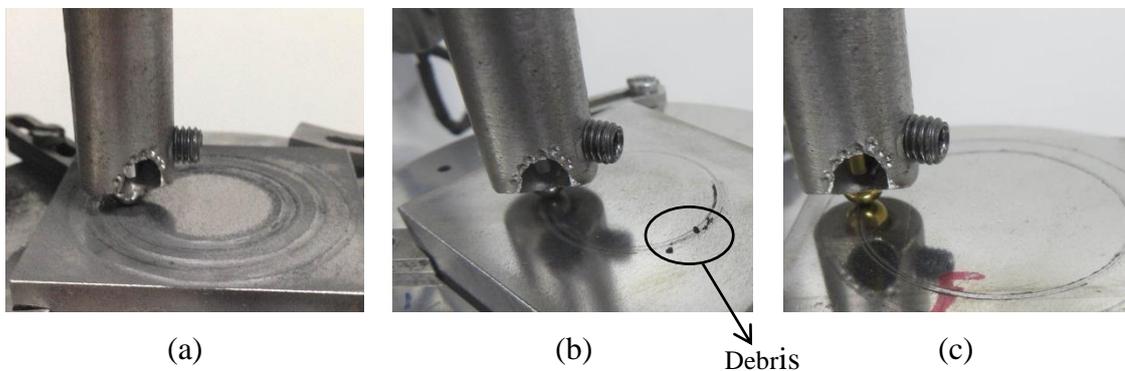


FIGURA 4. 10 - Ensaio pino sobre disco a) pino sem revestimento, b) pino revestido com SiO_2 , c) pino revestido com TiN

FONTE - O autor

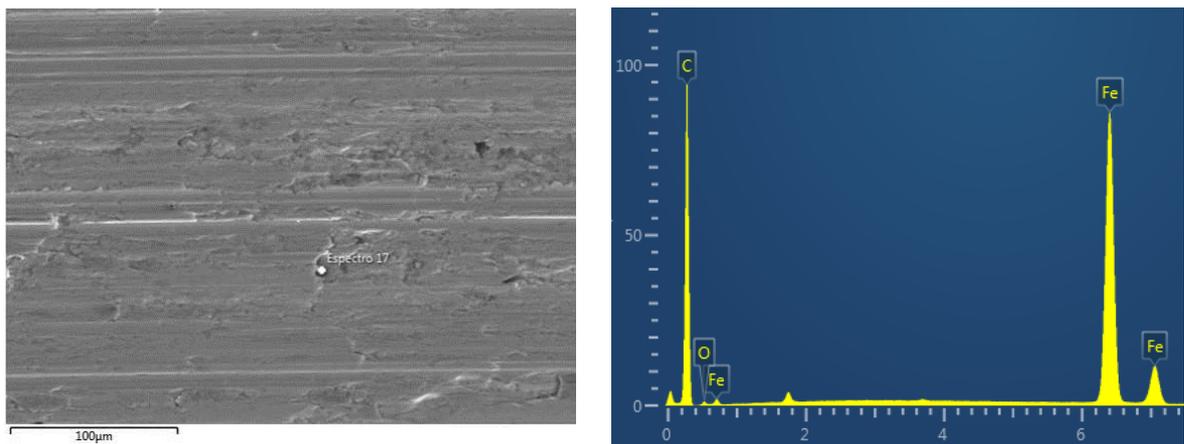


FIGURA 4. 11 - Imagens do MEV e EDS da região da pista desgastada

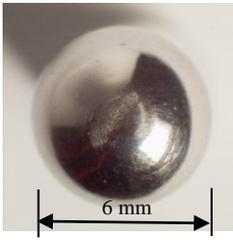
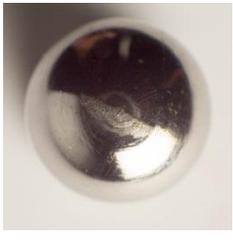
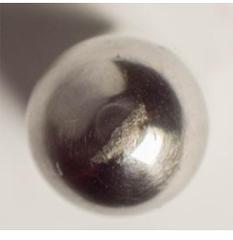
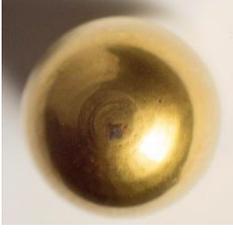
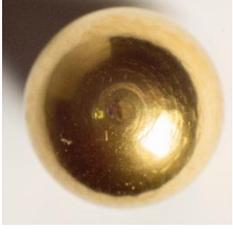
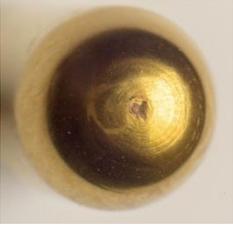
FONTE - O autor

4.7 Análise dos pinos

O QUADRO 4.7 detalha o topo dos pinos na região de contato do pino sobre o disco, após

ensaio no tribômetro. Comparando todos os todos os pinos, nota-se que os revestidos apresentaram um leve desgaste em comparação aos pinos sem revestimento. Porém, para o pino revestido de SiO_2 , na velocidade de 70 m/min, visivelmente o desgaste foi maior, fato já constatado pela maior largura da pista desgastada em comparação às larguras das pistas nas velocidades de 40 e 55 m/min. As superfícies dos pinos serão exibidas nos QUADROS 4.8, 4.9 e 4.10 por meio das imagens obtidas no MEV, do EDS e do mapeamento, para um melhor entendimento do comportamento do desgaste.

QUADRO 4.7 - Imagens dos pinos com desgaste em relação à velocidade de deslizamento

	40 m/min	55 m/min	70 m/min
Pino sem revestimento			
Pino dióxido de silício			
Pino nitreto de titânio			

FONTE - O autor

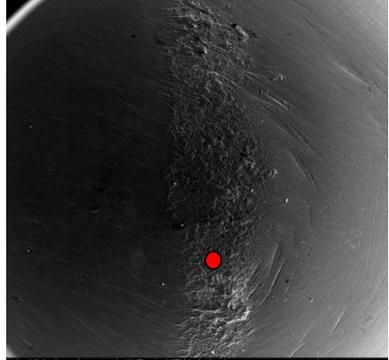
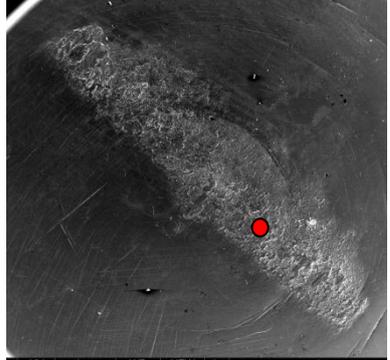
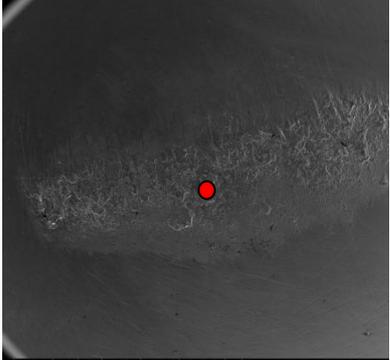
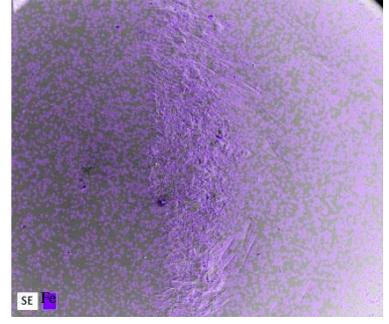
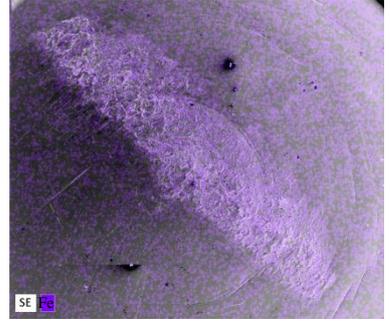
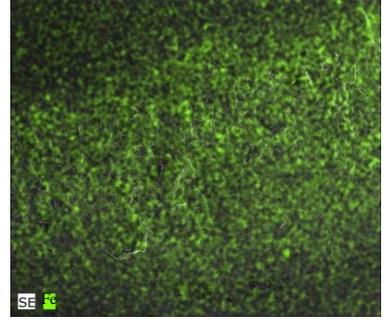
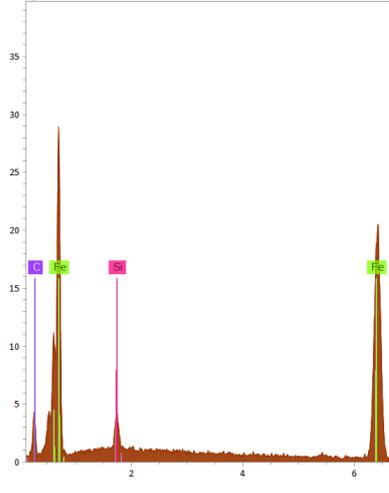
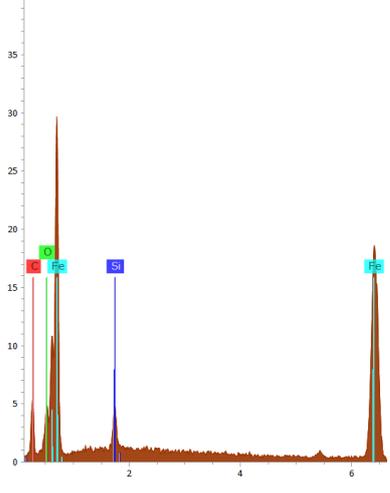
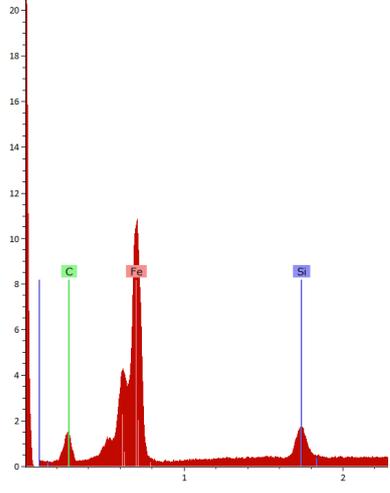
O QUADRO 4.8 apresenta as imagens obtidas no MEV, o EDS e o mapeamento da região do desgaste dos pinos sem revestimento. Percebe-se, pelo EDS, a presença dos elementos Fe, Si e C provenientes do ferro fundido. Por meio do mapeamento, observa-se a presença do elemento Fe na região de desgaste do pino, indicando adesão de material do corpo de prova na superfície do pino de aço rápido sem revestimento. A variação da massa dos pinos devido ao desgaste não foi significativa em relação à perda de massa do corpo de prova, conforme Apêndice E. Essa situação pode ser justificada pela dureza do aço rápido, sendo de 770-830

HV de acordo com Astakhov (2014), sendo superior em relação à dureza do ferro fundido nodular (171 HV). Pelas análises das imagens, o desgaste aconteceu somente no corpo de prova, e não no pino, somente adesão de material durante o percurso de deslizamento, para as três velocidades analisadas.

As imagens obtidas do MEV, o EDS e o mapeamento da região do desgaste dos pinos revestidos com SiO_2 estão demonstrados no QUADRO 4.9. Nas velocidades de 40 e 55 m/min, notam-se ranhuras paralelas na região de desgaste, sugerindo desgaste abrasivo na superfície do pino. A presença dos elementos Fe, C, Mo, V, W e um pico de baixa intensidade do elemento Si na velocidade de 40 m/min sugere uma remoção do revestimento e exposição do substrato do aço rápido. Nas imagens do mapeamento, é possível verificar baixa quantidade de Fe na região de desgaste, apresentando pouca adesão do material do corpo de prova. Na velocidade de 70 m/min, os elementos Fe, Si e C, presentes no EDS da região de desgaste, elucidam a adesão de material do corpo de prova na superfície do pino. As imagens do mapeamento também comprovam adesão de material na superfície do pino pela presença do Fe, o que confirma que não houve desgaste do pino, somente do corpo de prova, para a velocidade de 70 m/min. A presença de material aderido na superfície do pino não permitiu verificar se o revestimento realmente foi removido, conforme mencionado na análise das pistas. A variação da massa dos pinos revestidos com SiO_2 foi pequena em relação à perda de massa do corpo de prova. Estima-se que a dureza do revestimento de SiO_2 seja superior à dureza do corpo de prova (166 HV), apresentando baixa variação da massa do pino de SiO_2 .

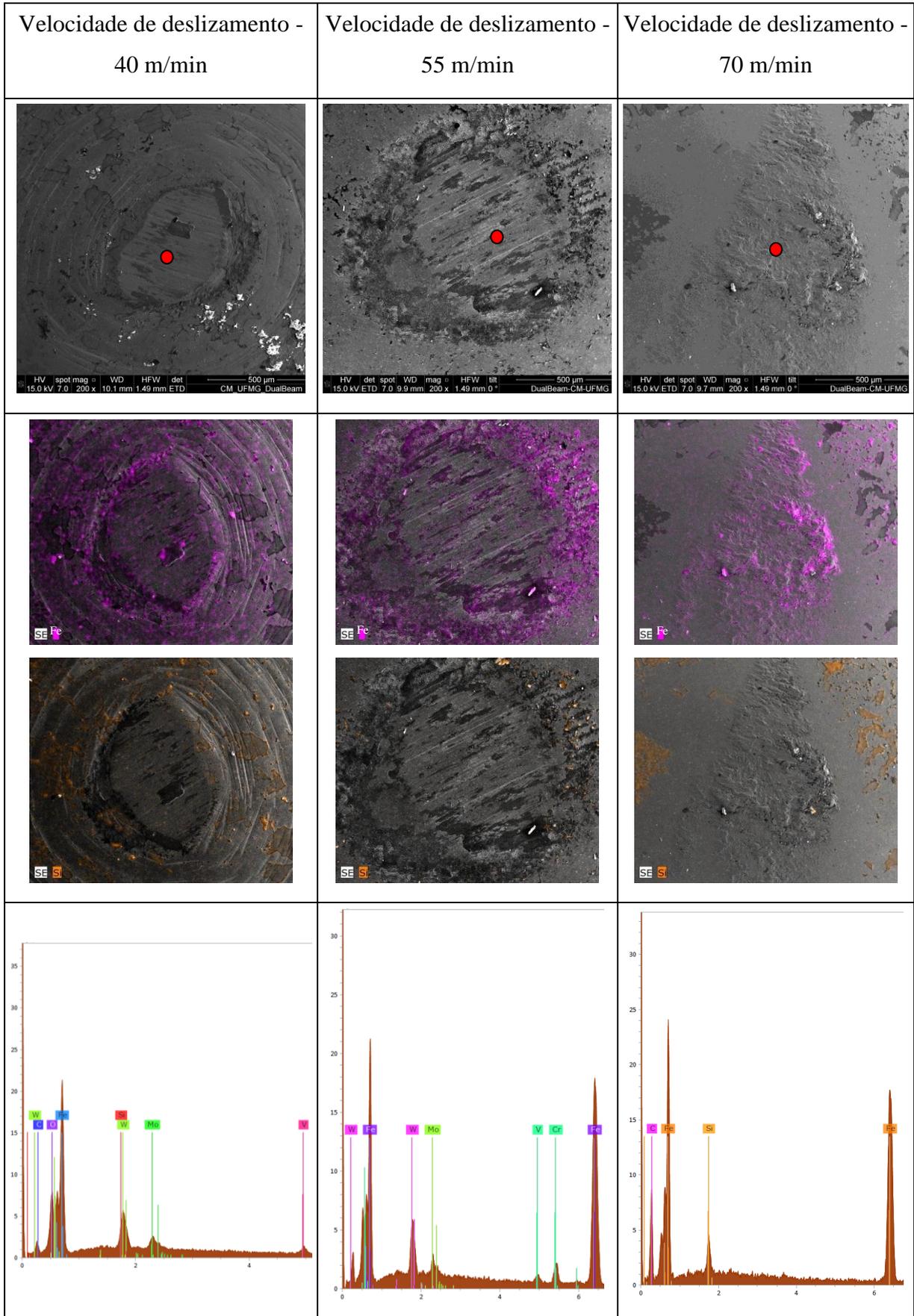
No QUADRO 4.10, visualizam-se as imagens obtidas do MEV, o EDS e o mapeamento da região de desgaste dos pinos revestidos com TiN. Na análise do EDS, verifica-se a presença dos elementos Fe, C, Si e Ti, que elucidam a adesão de material do corpo de prova para todas as velocidades, e a presença do elemento Ti nos EDS indica que não houve perda do revestimento. Pelas imagens do mapeamento, a presença do Fe confirma a adesão de material do corpo de prova na superfície do pino para as três velocidades, demonstrando que não houve desgaste do pino. A variação da massa dos pinos revestidos com TiN foi pequena em relação à perda de massa do corpo de prova, fato justificado pela dureza do revestimento de TiN (2000- 2500 HV), superior à dureza do corpo de prova (176 HV).

QUADRO 4. 8 - Imagens do MEV e EDS para o pino sem revestimento

Velocidade de deslizamento - 40 m/min	Velocidade de deslizamento - 55 m/min	Velocidade de deslizamento - 70 m/min
		
		
		

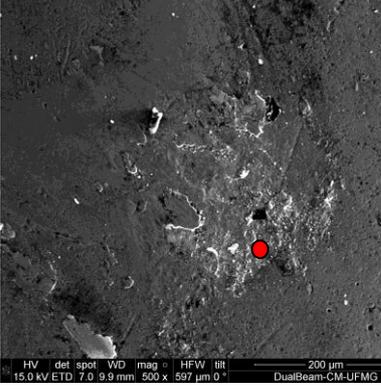
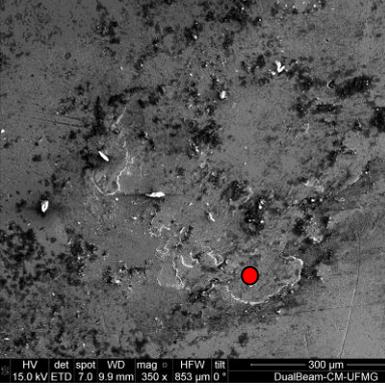
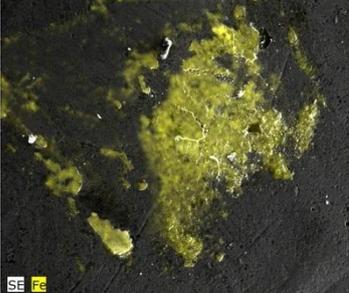
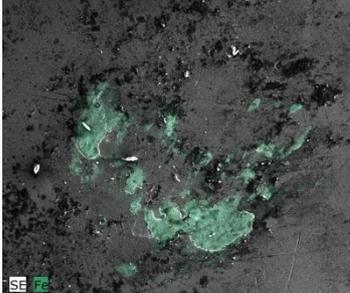
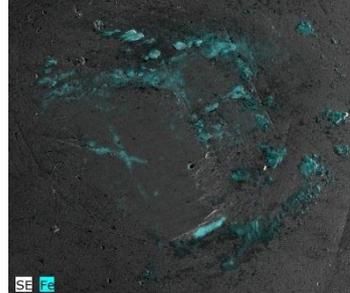
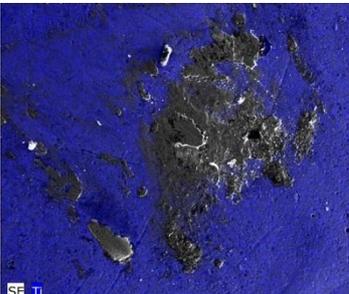
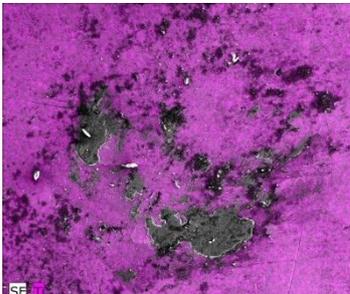
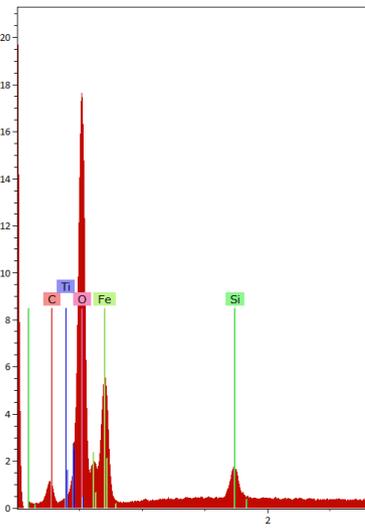
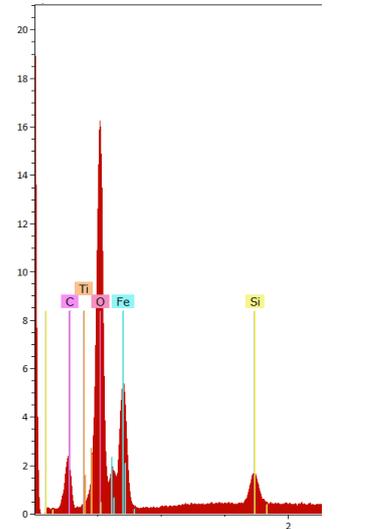
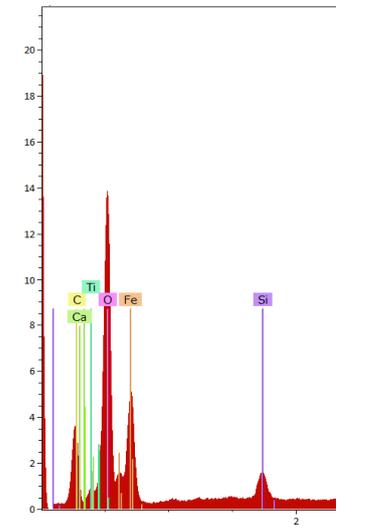
FONTE - O autor

QUADRO 4. 9 - Imagens do MEV e EDS para o pino de dióxido de silício



FONTE - O autor

QUADRO 4. 10 - Imagens do MEV e EDS para o pino nitreto de titânio

Velocidade de deslizamento - 40 m/min	Velocidade de deslizamento - 55 m/min	Velocidade de deslizamento - 70 m/min
		
		
		
		

FONTE - O autor

A análise tribológica possibilitou avaliar o comportamento do revestimento de SiO_2 , depositado pelo método sol-gel, deslizando sobre o corpo de prova em ferro fundido nodular e os possíveis mecanismos de desgaste. Porém, ainda existem poucos estudos na aplicação do revestimento de SiO_2 para ferramentas de corte; por isso, essa análise foi importante.

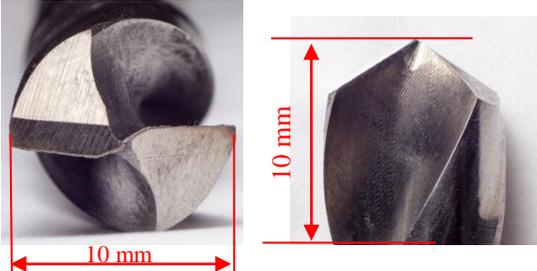
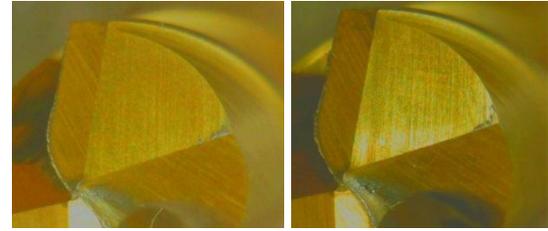
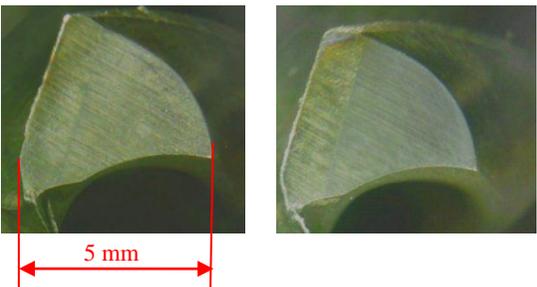
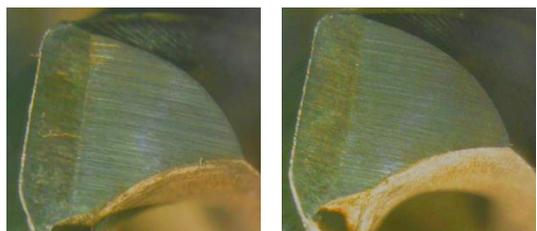
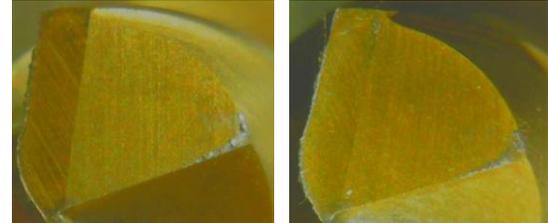
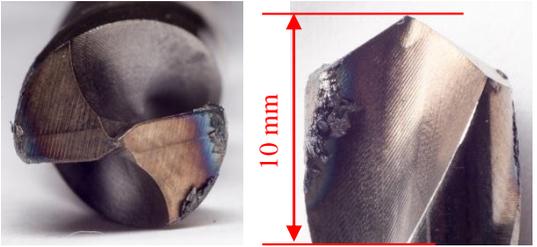
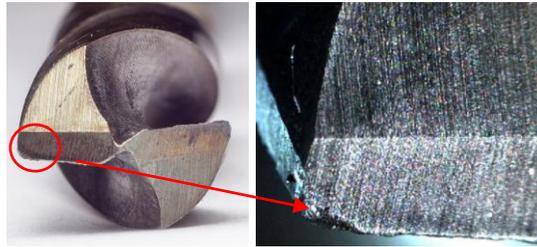
Do ponto de vista tribológico, a presença dos revestimentos contribuiu para propiciar menores coeficientes de atrito, menores taxas de desgaste e menores larguras das pistas desgastadas, levando a um predomínio suave de desgaste abrasivo quando comparados com os resultados do pino sem revestimento. Para o pino revestido de SiO_2 , o revestimento mostrou um melhor comportamento até a velocidade de deslizamento de 55 m/min, conduzindo a um suave desgaste abrasivo. No entanto, para a velocidade de 70 m/min, ocorreram elevadas taxas de desgaste, maior coeficiente de atrito e maior largura da pista desgastada, ocasionando um severo desgaste abrasivo.

O melhor resultado foram para o pino revestido de TiN, pois apresentou um desgaste abrasivo suave para todas as velocidades de deslizamento, sem perda do revestimento, o que foi comprovado pelas baixas taxas de desgaste e do coeficiente de atrito e pelas análises das larguras e superfícies das pistas desgastadas.

4.8 Análise qualitativa do desgaste das ferramentas

Durante o ensaio de furação, foi realizado o acompanhamento qualitativo do desgaste das brocas sem revestimento e revestidas com SiO_2 e TiN a cada três furos ou quando necessário. Notou-se que o nível do desgaste apresentado durante os ensaios não foi significativo ao ponto de influenciar nos resultados das análises de força, rugosidade, diâmetro e erro de circularidade, uma vez que o nível de desgaste elevado surgiu nos ensaios de maior velocidade de corte e maiores avanços, correspondente aos últimos furos. O QUADRO 4.11 apresenta as imagens das brocas avaliadas nas velocidades de corte 40, 55 e 70 mm/min e avanço de 0,25 mm/rev. Para a broca sem revestimento, observou-se aderência de material próximo à aresta de corte, na aresta secundária e na superfície principal de folga, na velocidade de corte de 70 mm/min. Na broca revestida com SiO_2 , também foram verificados aderência e um leve desgaste na aresta de corte, na velocidade de corte de 70 mm/min. Na broca revestida com TiN, não foi evidenciado nenhum desgaste ou aderência de material para as três velocidades, somente em alguns pontos, a perda do revestimento da ferramenta.

QUADRO 4. 11 - Imagens do desgaste das brocas sem revestimento e revestidas com SiO_2 e TiN nas velocidades de corte 40, 55 e 70 m/min e avanço = 0,25 mm/rev.

	Sem revestimento	SiO_2	TiN
$V_c = 40$ m/min			
$V_c = 55$ m/min			
$V_c = 70$ m/min			

FONTE - O autor

4.9 Forças de avanço

Para a análise dos valores das forças de avanço, foi realizado um planejamento de experimento. A fim de atestar os dados da força de avanço e validar a análise de variância - ANOVA - foi necessário verificar se a distribuição de probabilidade poderia ser aproximada pela distribuição normal, e, para isso, aplicou-se o teste de Anderson-Darling. De acordo com o MINITAB, este teste compara a função de distribuição acumulada empírica dos dados amostrais com a distribuição esperada se os dados fossem normais. Portanto, o teste foi realizado considerando-se as seguintes hipóteses:

- hipótese nula: se os dados seguem uma distribuição específica;
- hipótese alternativa: se os dados não seguem uma distribuição específica.

Para atestar os resultados, verifica-se o p-valor, sendo necessário apresentar um valor superior ao nível de significância para um teste com intervalo de confiança escolhido. Se o p-valor for menor que o nível de significância, rejeita-se a hipótese nula de que os dados seguem uma distribuição específica. Sendo assim, a FIG. 4.12 apresenta o gráfico de probabilidade normal dos resíduos para os dados da força de avanço.

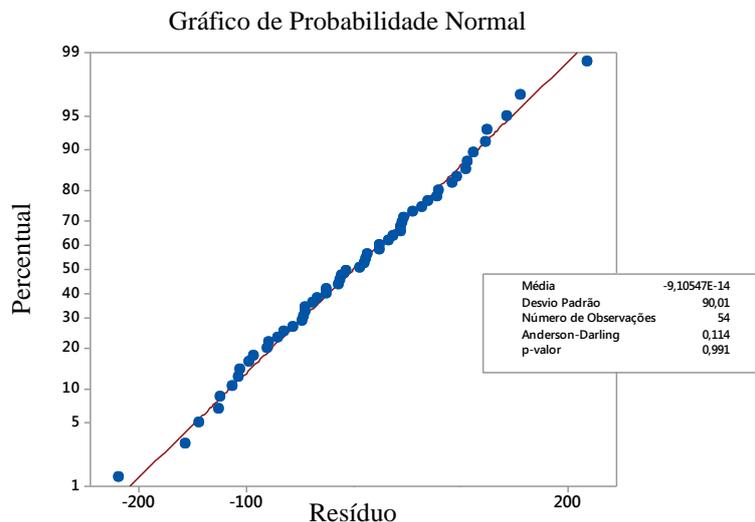


FIGURA 4. 12 - Gráfico de probabilidade para a força de avanço

FONTE - O autor

Na FIG. 4. 12 é possível observar que os valores dos resíduos estão distribuídos ao redor da linha reta de distribuição normal, e o p-valor, de 0,991, é acima do nível de significância, de

0,05, aceitando-se a hipótese nula, de que os dados seguiram uma distribuição normal. Para a validação do modelo, realizou-se a análise de resíduos padronizados para os dados da força de avanço. De acordo com Barros *et al.* (2010), a análise dos resíduos é fundamental para avaliar o grau de ajuste do modelo às observações. Nesse sentido, a estimação dos parâmetros do modelo requer a suposição de que os erros sejam variáveis aleatórias, independentes entre si e não correlacionados, tais suposições são demonstradas por meio da FIG. 4.13 (a) que apresenta o gráfico de resíduos versus ordem, onde foi possível observar que os resíduos estão distribuídos aleatoriamente em relação ao tempo. Outras condições da análise residual, de acordo Montgomery e Runger (2016), relacionam-se à necessidade da média ser zero e variância constante. Esses mesmos autores afirmam que os erros seguem a distribuição normal com média zero e variância constante, quando cerca de 68% dos resíduos padronizados estejam entre os limites ± 1 e 95% entre os limites ± 2 . Nesse sentido, a FIG. 4.13 (b) comprova que entre os 54 pontos, 36 estão compreendidos no intervalo entre -1 e 1 e os restantes entre -2 e 2 o que corrobora a condição normal de distribuição normal com média zero e variância constante.

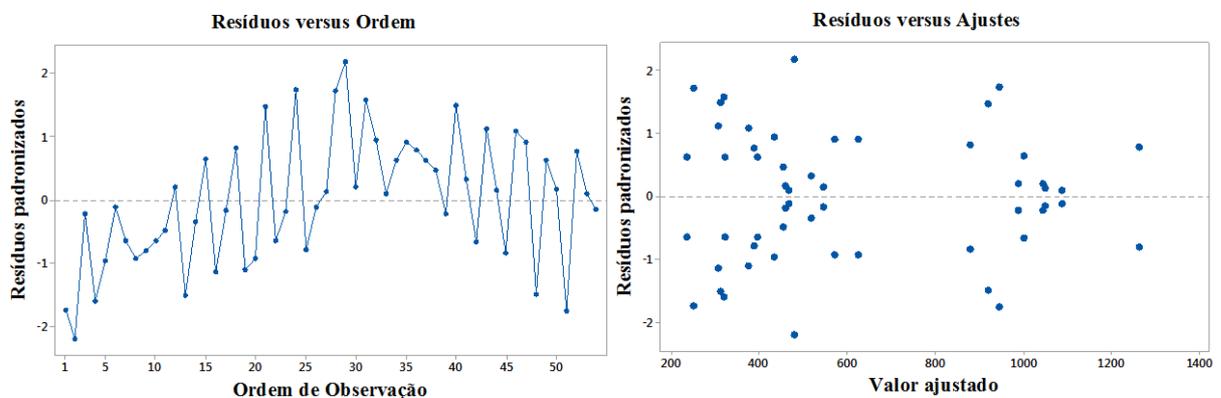


FIGURA 4. 13 - a) análise dos resíduos versus ordem, b) análise dos resíduos versus ajustes

FONTE - O autor

Observa-se que os resíduos da FIG. 4.13 (b) apresentou uma simetria. Para justificar esse comportamento, foi avaliado os valores previstos por meio dos resíduos padronizados. Tal comportamento foi justificado pelo modelo de regressão que retomou valores simétricos (iguais em módulo) quando se utilizava teste e réplica, comportamento esperado dado que os valores das variáveis de entrada (vc, f e ferramenta) eram iguais.

A TAB. 4.4 apresenta os dados da ANOVA para a força de avanço. O nível de explicação do modelo para a variação da força de avanço foi de 94,79%. Com base nas discussões acima, pode-se afirmar que os erros decorrentes do modelo foram aleatórios e que a regressão gerada pela ANOVA pode ser confirmada.

Entre o efeito principal, somente o avanço mostrou-se significativo ao nível de significância considerado. Quanto às interações de segunda ordem, a ferramenta e o avanço foram significativos, pois apresentaram o p-valor inferior a 0,05. Já a interação de terceira ordem, por outro lado, apresentou-se não significativa dentro do intervalo de confiança estudado. É possível constatar que existe uma correlação estatisticamente significativa, ao nível de confiança considerado, entre a mudança no avanço e a ferramenta de corte em relação à variável de saída força de avanço. No Apêndice F, apresentam-se os valores da força de avanço (N).

TABELA 4. 4 - Análise de variância para os dados da força de avanço

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	p-valor
Modelo	26	5008367	192629	18,89	0,000
Linear	6	4744607	790768	77,56	0,000
Ferramenta	2	33417	16709	1,64	0,213
Vc	2	213378	10689	1,05	0,364
f	2	4689812	2344906	230	0,001
Interações de 2 fatores	12	186549	15546	1,52	0,176
Ferramenta x Vc	4	46632	11658	1,14	0,357
Ferramenta x f	4	118483	29621	2,91	0,04
Vc x f	4	21434	5358	0,53	0,718
Interações de 3 fatores	8	77211	9651	0,95	0,496
Ferramenta x Vc x f	8	77211	9651	0,95	0,496
Erro	27	275268	10195		
Total	53	5283634			
Sumário Modelo	S	R2	R2 (aj)	R2 (pred)	
	100,971	94,79%	89,77%	79,16%	

FONTE - O autor

A FIG. 4.14 apresenta o gráfico do efeito principal, destacando a influência do parâmetro avanço na força. Nota-se que, para o intervalo de avanço de 0,15-0,25 mm/rev., o aumento da força de avanço mostrou-se mais acentuado em comparação ao intervalo de 0,05-0,15 mm/rev. Conforme observado por Grzesik (2009), as forças se elevam com o crescimento da taxa de avanço, pois esta aumenta diretamente as áreas de cisalhamento primário e secundário. Quanto maior o avanço, maior a espessura de corte (h), maior a deformação

plástica e maior o encruamento do cavaco, levando a uma maior resistência à penetração da broca, dificultando o corte e ocasionando maiores forças.

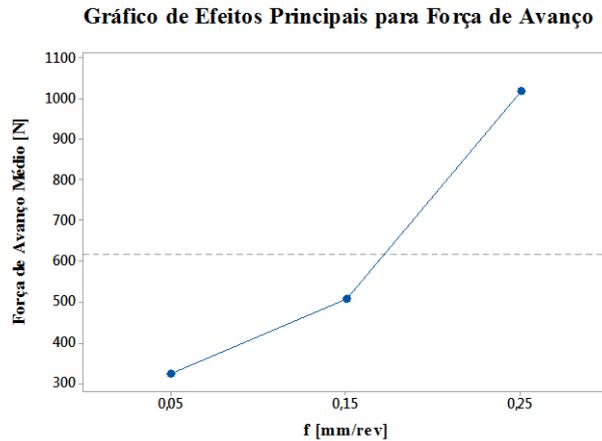


FIGURA 4. 14 - Gráfico de efeito principal para a força de avanço

FONTE - O autor

A FIG. 4.15 apresenta o efeito de interação de segunda ordem entre a ferramenta e o avanço em relação à variável resposta força de avanço.

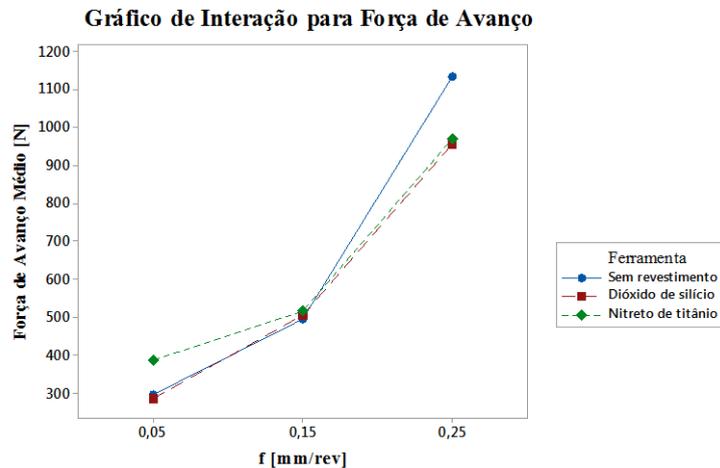


FIGURA 4. 15 - Gráfico de interação para a força de avanço

FONTE - O autor

Percebeu-se que tanto a ferramenta quanto o avanço apresentaram influências significativas na força de avanço, e o aumento do avanço propiciou a elevação da força. Um resultado análogo a este foi encontrado por Barbosa *et al.* (2009) na furação do ferro fundido nodular perlítico com ferramentas de aço rápido M2 revestidas com TiN. Ao se aumentar o avanço de 0,15 para 0,25 mm/rev., os valores da força de avanço aumentaram, sendo que as ferramentas

sem revestimento apresentaram maiores valores que aquelas com revestimento. Esse fato confirma o que foi citado por Trent e Wright (2000): que as forças de corte, ao se utilizar ferramentas revestidas, são mais baixas que para as ferramentas não revestidas. A ferramenta revestida com SiO₂ apresentou ligeiramente menores forças em comparação com a ferramenta de TiN. Observa-se que a presença do revestimento contribuiu para a redução das forças de avanço quando aumentou o avanço. Similar resultado foi encontrado por meio da análise tribológica referente ao coeficiente de atrito, que apresentou os menores valores para as ferramentas revestidas. A presença do revestimento reduziu o atrito nas interfaces ferramenta/cavaco e ferramenta/peça, que propiciou menores forças de avanço.

4.10 Rugosidade dos furos

Os parâmetros de rugosidade (R_a) e (R_z) foram medidos, mas somente os resultados relativos ao R_a serão apresentados, visto que foram semelhantes aos resultados e análises realizados para o R_z . Analogamente à força de avanço, a análise estatística dos efeitos foi realizada para o parâmetro R_a . Para atestar o modelo e validar a ANOVA, verificou-se a distribuição de probabilidade aplicando o teste de Anderson-Darling. A FIG. 4.16 mostra o gráfico de probabilidade normal dos resíduos com o seu respectivo p-valor.

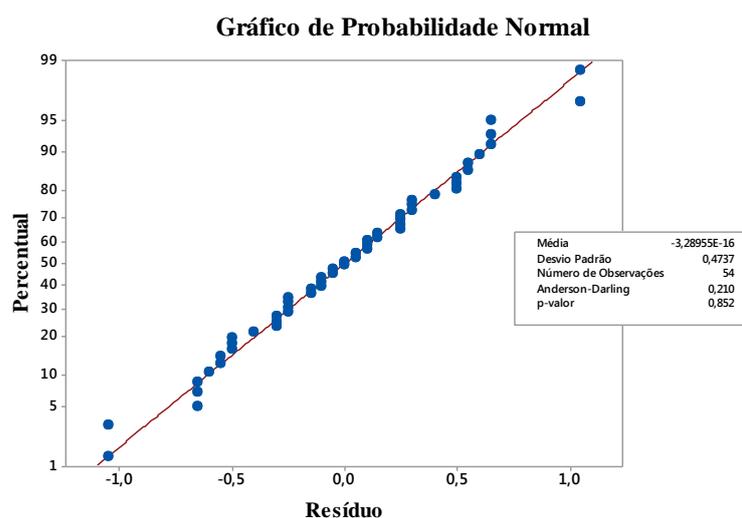


FIGURA 4. 16 - Gráfico de probabilidade para a rugosidade média

FONTE - O autor

O teste de Anderson-Darling apresentou um p-valor de 0,852, atestando a normalidade dos dados, que foi superior ao nível de significância de 0,05. Os valores dos resíduos estão

distribuídos ao redor da linha reta, comprovando que os dados amostrais apresentaram uma distribuição normal. Para a validação do modelo, realizou-se a análise de resíduos padronizados para os dados da rugosidade. A FIG. 4.17 (a) detalha o gráfico de resíduos versus ordem. Em relação ao tempo, mostra-se que os resíduos são independentes e não correlacionados, que comprova que a variância é constante. A FIG. 4.17 (b) detalha os resíduos padronizados versus ajustes. Nesse sentido, observa-se que dos 54 pontos avaliados, 68% dos resíduos estão compreendidos entre os limites ± 1 e os demais entre os intervalos ± 2 , afirmando que os resíduos dos dados de rugosidade média atendem a condição de distribuição normal com média zero e variância constante, sendo que a regressão gerada pela ANOVA pode ser confirmada. Análogo aos resíduos versus ajustes da força de avanço nota-se uma simetria para esse mesmo gráfico e nessas condições, os valores dos resíduos previstos do modelo de regressão retomaram valores simétricos (iguais em módulo), quando utilizava teste e réplica, fato esse que justifica o comportamento do gráfico da FIG. 4.17 (b).

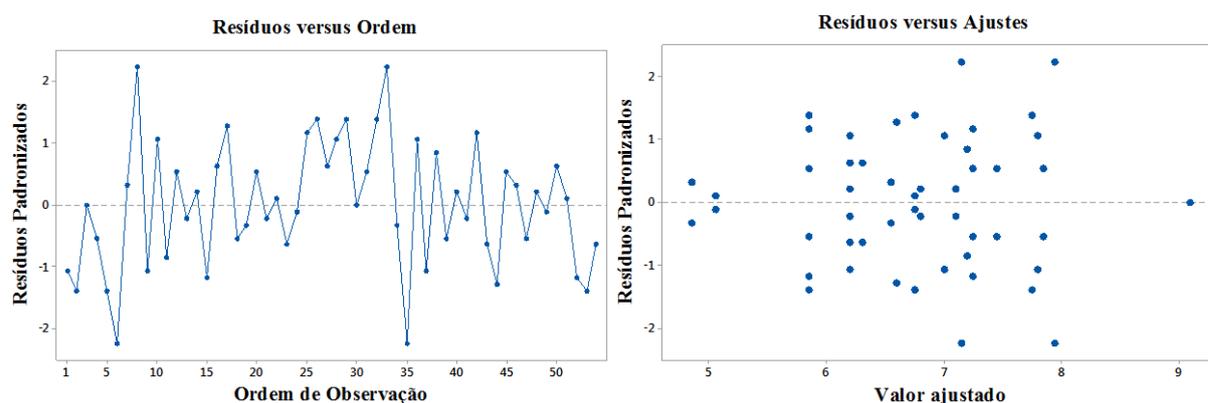


FIGURA 4. 17 - a) análise dos resíduos versus ordem, b) análise dos resíduos versus ajustes dos furos

FONTE - O autor

A TAB. 4.5 mostra os dados da ANOVA para a variável resposta rugosidade média. Contudo, ao analisar o valor de R^2 e R^2 ajustado, verificou-se uma diferença de cerca de 20%, evidenciando que os fatores utilizados para explicar a variação do parâmetro de rugosidade R_a foram insuficientes e que possivelmente a introdução de novos fatores permitirá um maior grau de adequação do modelo ao nível de significância de 5%. Todavia, o nível de explicação do modelo para a variação da rugosidade foi de 78,8 %, o que não implica necessariamente que o modelo seja ruim, mas, sim, que ele possa ser melhorado.

TABELA 4. 5 - Análise de variância para os dados da rugosidade

Fonte	GL	SQ (Aj)	QM (Aj)	Valor F ₀	p-valor
Modelo	26	44,2037	1,7001	3,86	0,000
Linear	6	36,9489	6,1581	13,98	0,000
Ferramenta	2	22,1137	11,0569	25,1	0,001
Vc	2	0,9137	0,4569	1,04	0,368
f	2	13,9215	6,9607	15,8	0,002
Interações de 2 fatores	12	4,0933	0,3411	0,77	0,671
Ferramenta x Vc	4	1,1433	0,2857	0,65	0,633
Ferramenta x f	4	1,0219	0,2555	0,58	0,680
Vc x f	4	1,9285	0,4821	1,09	0,379
Interações de 3 fatores	8	3,1615	0,3952	0,90	0,533
Ferramenta x Vc x f	8	3,1615	0,3952	0,90	0,533
Erro	27	11,895	0,4406		
Total	53	56,0987			
Sumário Modelo	S	R2	R2 (aj)	R2 (pred)	
	0,6637	78,80%	58,38%	15,19%	

FONTE - O autor

Ao se analisar os efeitos principais, o avanço e a ferramenta mostraram-se significativos, apresentando um p-valor inferior a 0,05. Entretanto, ao serem verificadas as interações de segunda e terceira ordem, estas se mostraram não significativas dentro do intervalo de confiança estudado. A mudança no avanço e na ferramenta de corte apresentou uma correlação estatisticamente significativa em relação à resposta de saída R_a . O Apêndice G detalha os valores de rugosidade para cada ferramenta avaliada, e a FIG. 4.18 apresenta o gráfico com os respectivos efeitos principais.

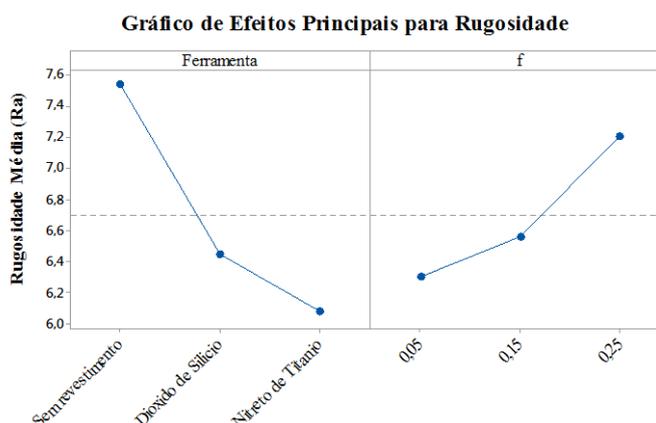


FIGURA 4. 18 - Gráfico de efeito principal para a rugosidade

FONTE - O autor

Em relação ao parâmetro avanço, notou-se que a mudança de nível afeta consideravelmente a média R_a , principalmente para maiores avanços. O aumento do avanço proporcionou elevação na rugosidade média da superfície, o que corrobora a afirmação de Machado *et al.* (2011) de

que, dentre as condições de corte, o avanço mostra-se como o parâmetro mais influente, uma vez que a altura média dos vales das marcas de avanço tende a aumentar em proporção quadrática ao avanço.

No que diz respeito à ferramenta, os maiores valores de rugosidade foram para a broca sem revestimento, pois os revestimentos melhoram consideravelmente a qualidade do furo, apresentando menores valores de R_a . Esse fato pode ser associado às condições tribológicas, nas quais os menores valores de coeficiente de atrito foram para as ferramentas revestidas, resultando em melhor acabamento dos furos usinados. Similar resultado foi encontrado por Marques (2012), que constatou que a presença dos revestimentos se mostrou mais efetiva quanto aos valores de R_a . A condição não revestida obteve resultados inferiores de rugosidade.

4.11 Diâmetro médio dos furos

Para atestar os dados do diâmetro médio e da ANOVA, aplicou-se o teste de Anderson-Darling, sendo possível verificar que a distribuição de probabilidade pode ser aproximada pela distribuição normal. A FIG.4.19 apresenta o gráfico de probabilidade normal dos resíduos com o seu respectivo p-valor.

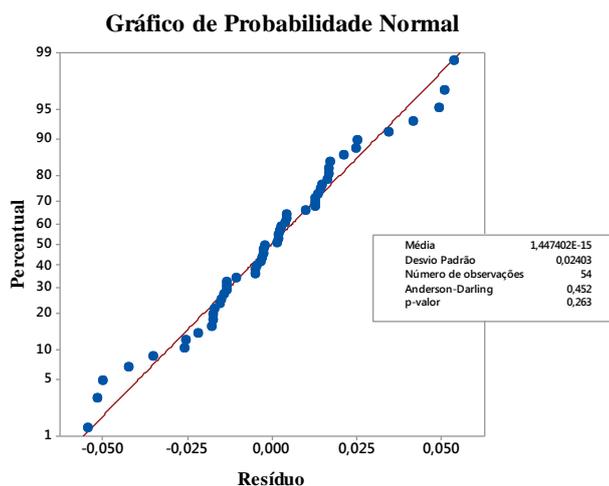


FIGURA 4. 19 - Gráfico de probabilidade para o diâmetro médio dos furos

FONTE - O autor

Por meio dos dados apresentados, nota-se que o p-valor de 0,263 apresenta-se superior ao nível de significância de 0,05, para um teste de confiança de 95%, e que os dados amostrais

correspondentes aos valores dos resíduos estão distribuídos ao redor da linha reta, aceitando-se a hipótese nula de que os dados seguiram uma distribuição normal. Para a validação do modelo, realizou-se a análise de resíduos padronizados para os dados do diâmetro médio. A FIG.4.20 (a) exibe o gráfico de resíduos versus ordem para o modelo de regressão gerado. Percebe-se que não existe um padrão específico para a variação dos dados ao longo do tempo, logo é possível inferir que os erros do modelo são aleatórios e independentes, que comprova que a variância é constante. Na FIG.4.20 (b) detalha-se os resíduos padronizados versus ajustes. Nesse sentido, observa-se que dos 54 pontos avaliados, 68% dos resíduos estão compreendidos entre os limites ± 1 e os demais entre os intervalos ± 2 , afirmando que os resíduos dos dados do diâmetro médio atendem a condição de distribuição normal com média zero e variância constante validando o modelo. Análogo aos resíduos versus ajustes da força de avanço nota-se uma simetria para esse mesmo gráfico e nessas condições, os valores dos resíduos previstos do modelo de regressão retomaram valores simétricos (iguais em módulo), quando utilizava teste e réplica, fato esse que justifica o comportamento desse gráfico.

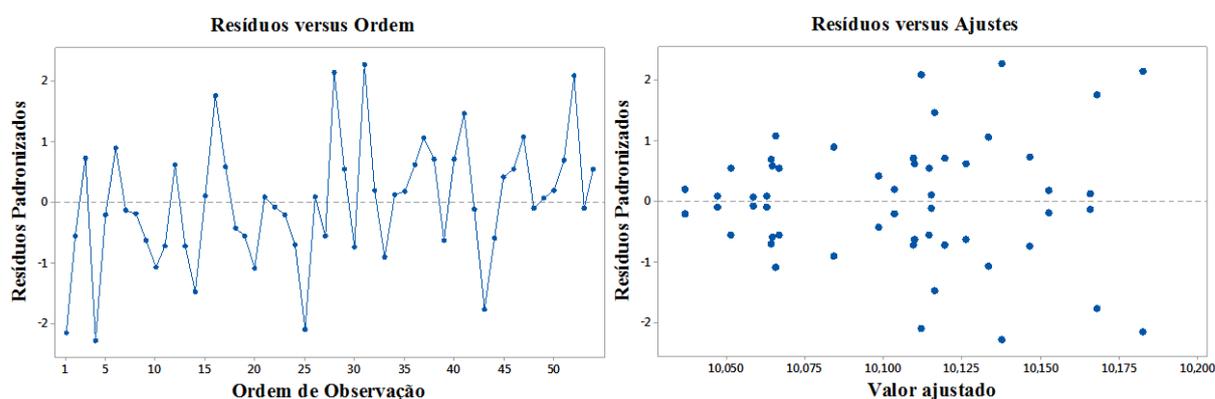


FIGURA 4. 20 - a) análise dos resíduos versus ordem, b) análise dos resíduos versus ajustes

FONTE - O autor

Na TAB. 4.6, visualizam-se os dados da ANOVA para o diâmetro médio. O nível de explicação do modelo para a variação do diâmetro foi de 73,36 %. Com base nas discussões acima, pode-se afirmar que os erros decorrentes do modelo foram aleatórios e que a regressão gerada pela ANOVA pode ser confirmada. Entretanto, ao se verificar o valor de R^2 e R^2 ajustado, percebe-se uma diferença de cerca de 30%, evidenciando que os fatores utilizados para explicar a variação do diâmetro médio são insuficientes e que possivelmente a introdução de novos fatores permitirá um maior grau de adequação do modelo ao nível de significância de 5%. Conforme detalhado na análise de variância para os dados da rugosidade média, isso

não significa necessariamente que o modelo seja ruim, mas que ele pode ser melhorado quando forem introduzidos novos fatores para a variável resposta.

TABELA 4. 6 - Análise de variância para os dados do diâmetro médio

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F ₀	p-valor
Modelo	26	0,0842	0,0032	2,86	0,004
Linear	6	0,0677	0,0112	9,94	0,000
Ferramenta	2	0,0497	0,0248	21,95	0,000
Vc	2	0,0034	0,0017	1,53	0,236
f	2	0,0144	0,0072	6,35	0,005
Interações de 2 fatores	12	0,0086	0,0007	0,64	0,792
Ferramenta x Vc	4	0,0039	0,0009	0,86	0,499
Ferramenta x f	4	0,0010	0,0002	0,23	0,918
Vc x f	4	0,0037	0,0009	0,82	0,525
Interações de 3 fatores	8	0,0079	0,0009	0,88	0,546
Ferramenta x Vc x f	8	0,0079	0,0009	0,88	0,546
Erro	27	0,0306	0,0011		
Total	53	0,1149			
Sumário Modelo	S	R2	R2 (aj)	R2 (pred)	
	0,0336	73,36%	47,71%	0,00%	

FONTE - O autor

Entre os efeitos principais, somente o avanço e a ferramenta mostraram-se significativos, já que apresentaram o p-valor inferior a 0,05. Quanto às interações de segunda e terceira ordem, estas não foram significativas dentro do intervalo de confiança estudado. Pela análise dos efeitos principais, é possível afirmar que existe uma correlação estatisticamente significativa entre a mudança no avanço e a ferramenta de corte em relação à variável resposta diâmetro médio. No Apêndice H, estão os valores do diâmetro para cada ferramenta avaliada, e a FIG.4.21 detalha os efeitos principais.

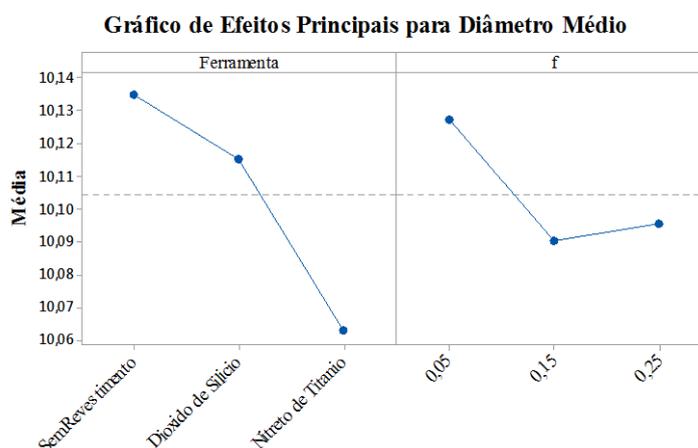


FIGURA 4. 21 - Efeitos principais para o diâmetro médio

FONTE - O autor

Em relação ao efeito principal avanço, este demonstrou uma redução no diâmetro para os maiores avanços avaliados, porém para o avanço 0,05 mm/rev. a variação dimensional foi maior. Essa situação confirma os estudos de Marmentini, Pintaúde e Beltrão (2008) na furação de ferro fundido cinzento e nodular com brocas de aço rápido M2, diâmetro de 10 mm e avanços de 0,09, 0,135 e 0,18 mm/rot. Para ambos os materiais, observou-se uma redução do diâmetro à medida que se aumentava o avanço.

No que concerne à ferramenta, a que apresentou melhor desempenho, com maior precisão dimensional, foi a revestida com TiN, cuja explicação está associada à presença de revestimento, que diminui o atrito e facilita o escoamento do cavaco pela interface cavaco/ferramenta e auxilia para minimizar os esforços de corte assegurando menores variações dimensionais. Resultado similar foi obtido por Marques (2012), na qual os diâmetros dos furos ficaram mais próximos ao nominal quando utilizou brocas revestidas. Para as ferramentas sem revestimentos, a variação dimensional, pode ser atribuída à tendência de aderência de material na superfície da broca, influenciada também pela ductilidade do ferro fundido nodular ferrítico. As ferramentas sem revestimentos apresentaram maiores esforços de corte que podem contribuir por aumentar as variações dimensionais. Em relação à ferramenta de SiO₂, a variação dimensional do diâmetro dos furos apresentaram-se valores intermediários à ferramenta sem revestimento e a revestida de TiN. Apesar dos valores de forças terem sido menores que a ferramenta sem revestimento, acredita-se que essa variação pode ter sido influenciada pela aderência de material na superfície na broca.

4.12 Erro de circularidade

Os resultados para o erro de circularidade foi apresentado em forma gráfica, correlacionando-os com o parâmetro velocidade de corte, conforme apresentado na FIG. 4.22. De acordo com o estudo de Paiva Jr. *et al.* (2013), a velocidade de corte foi um parâmetro que influenciou no erro de circularidade. O Apêndice I detalha o erro de circularidade médio dos furos correspondente às brocas sem revestimento e revestidas.

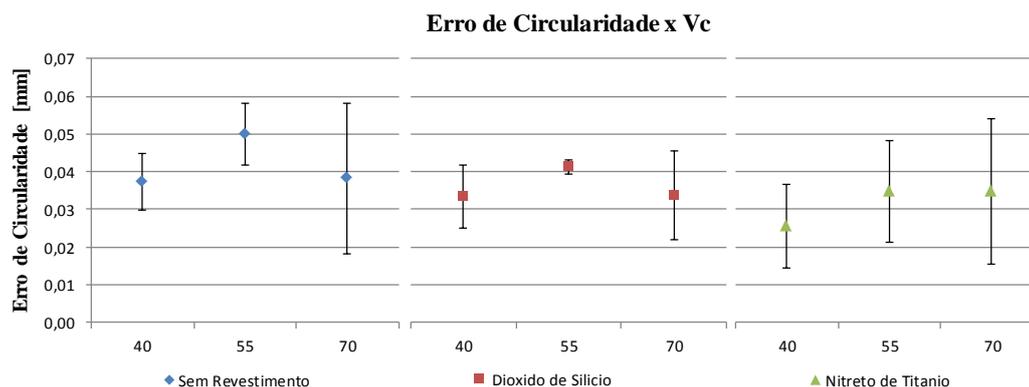


FIGURA 4. 22 - Erro de circularidade em relação à velocidade de corte e a ferramenta de corte

FONTE - O autor

De acordo com a FIG. 4.22, os valores dos erros de circularidade estão relativamente próximos em relação aos maiores e menores valores de velocidade de corte para cada ferramenta de corte avaliada, mas não foi possível afirmar o efeito desse parâmetro no erro de circularidade. Entretanto, ao avaliar o desvio-padrão das amostras para cada ferramenta, observou-se que, na velocidade de corte de 70 m/min a variação dos desvios foram maiores, indicando que, maiores velocidades de corte podem aumentar o nível de vibração na operação de furação e influenciar na variação do erro de circularidade dos furos avaliados.

Em relação à ferramenta de corte, foi criado um boxplot para avaliar a variabilidade da ferramenta sobre o erro de circularidade, conforme apresentado na FIG. 4.23. O diagrama de caixas conhecido como boxplot é uma apresentação gráfica que descreve simultaneamente várias características importantes de um conjunto de dados, tais como centro, dispersão, desvio da simetria e identificação das observações não usuais ou *outliers* (MONTGOMERY E RUNGER, 2016).

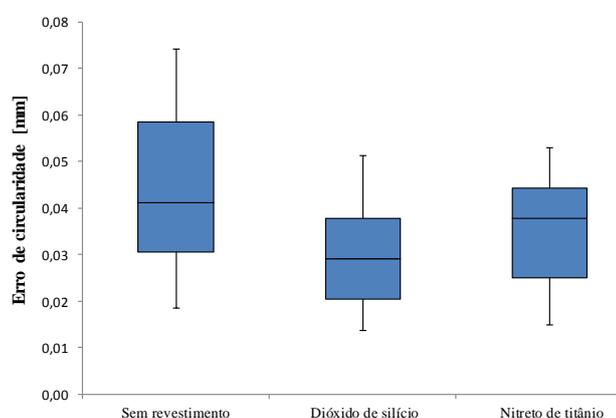


FIGURA 4. 23 - Erro de circularidade em relação à ferramentas sem revestimento e revestidas

FONTE - O autor

A FIG. 4.23 indica que a variação do tipo de ferramenta tem um efeito sobre o erro de circularidade. Especificamente, a ferramenta sem revestimento apresentou uma maior variabilidade nos dados, visivelmente pode ser visto pelo maior tamanho da caixa (box), em comparação às ferramentas revestidas, comprovando que a presença dos revestimentos reduz o erro de circularidade. Esse fato corrobora os estudos apresentados por Paiva Jr. *et al.* (2013), em que as ferramentas revestidas apresentaram menor variação do erro de circularidade. Além disso, a distribuição do erro de circularidade em relação ao tipo de ferramenta é razoavelmente simétrica e não foram observados *outliers*, que indica que não há nenhum dado que necessite de atenção.

4.13 Análise da rebarba

As rebarbas de saída correspondentes aos três corpos de prova utilizados na furação do ferro fundido nodular com brocas sem revestimento e revestida com SiO₂ e TiN foram analisadas qualitativamente. De acordo com Aurich *et al.* (2009), as rebarbas podem ser classificadas como: do tipo uniforme, de transição e de coroa. As rebarbas maiores ocorreram nos furos de maior velocidade de corte, e os maiores avanços, para as ferramentas sem revestimento e revestida com SiO₂.

Na furação do corpo de prova com a broca sem revestimento, perceberam-se rebarbas do tipo coroa para o último furo, na velocidade de corte 70 m/min. e avanço 0,25 mm/rev., e rebarbas do tipo transição para alguns furos, nas velocidades 70, 55 e 40 m/min. Para os furos correspondentes às velocidades de corte 40 e 55 m/min e avanço 0,25 mm/rev., foram observadas rebarbas uniformes tipo I, mais fáceis de serem removidas. A formação de rebarbas dos tipos coroa e transição, para a furação com a broca sem revestimento, pode estar ligada ao que foi citado por Niknam (2014), ou seja, as velocidades de corte e avanço mais altas durante o corte de certos materiais podem aumentar a temperatura de corte e a taxa de deformação e crescimento de rebarba, influenciadas também pela ductilidade do material. Além disso, ocorrendo deformação nas periferias das brocas, o material deformado é empurrado, formando a rebarba. Conforme citado por Aurich *et al.* (2009), a presença do desgaste altera a forma da rebarba, aumentando seu tamanho. Essa afirmação condiz com as rebarbas apresentadas nos furos para a velocidade de corte 70 m/min, pois a ferramenta sem

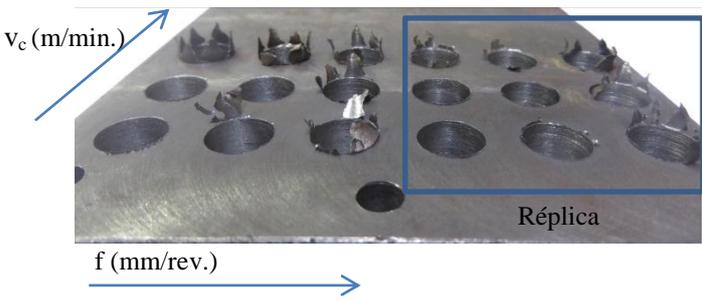
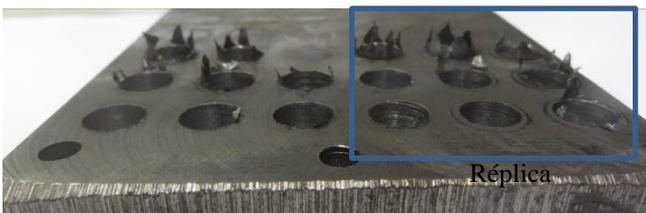
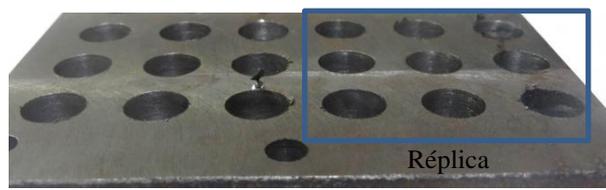
revestimento apresentou aderência de material próximo à aresta de corte, podendo contribuir para o aumento da rebarba, conforme demonstrado no QUADRO 4.11.

As rebarbas do corpo de prova da broca revestida de SiO_2 são uniformes tipo I, para os furos nas velocidades de corte 40 e 55 m/min. e avanço 0,25 mm/rev., sendo esse tipo mais fácil de ser removida. Observou-se, também, nessas mesmas velocidades e nos avanços 0,05 e 0,15 mm/rev., furos com rebarba de transição. Porém, para os furos na velocidade de 70 m/min. e avanços 0,05; 0,15 e 0,25 mm/rev., notou-se a presença de rebarbas do tipo coroa, e, para alguns furos, rebarbas de transição. Constatou-se que o revestimento na velocidade de 70 m/min não foi tão eficiente ao ponto de evitar a formação de rebarbas, ou rebarbas uniformes. Para essa velocidade de corte, sugere-se que ocorreu um aumento da temperatura, ocasionando maiores deformações do material, dificultando o cisalhamento e contribuindo para a formação de rebarbas de transição e coroa, com influência, ainda, da ductilidade do material.

Na furação do corpo de prova com a broca revestida de TiN, notaram-se rebarbas uniformes tipo I, e, para alguns furos, rebarbas de transição. A presença do revestimento contribuiu para que ocorressem rebarbas uniformes, associado a um baixo coeficiente de atrito para essa ferramenta, que reduz o contato da broca com o cavaco e as paredes do furo, além de proporcionar menor temperatura, o que facilita o cisalhamento do material e evita a formação de rebarbas maiores. Um resultado similar a este foi encontrado no trabalho de Feldshtein (2011), em que a presença do revestimento colaborou para a apresentação de rebarbas mais fáceis de remoção, sendo rebarbas uniformes e sem a tampa.

As rebarbas correspondentes aos três corpos de prova utilizados na furação do ferro fundido nodular com brocas sem revestimento e revestida estão detalhadas no QUADRO 4.12.

QUADRO 4. 12 - Imagens das rebarbas para os três corpos de prova

Broca sem revestimento	
Broca com revestimento dióxido de sílico	
Broca com revestimento de nitreto de titânio	

FONTE - O autor

4.14 Análise dos cavacos

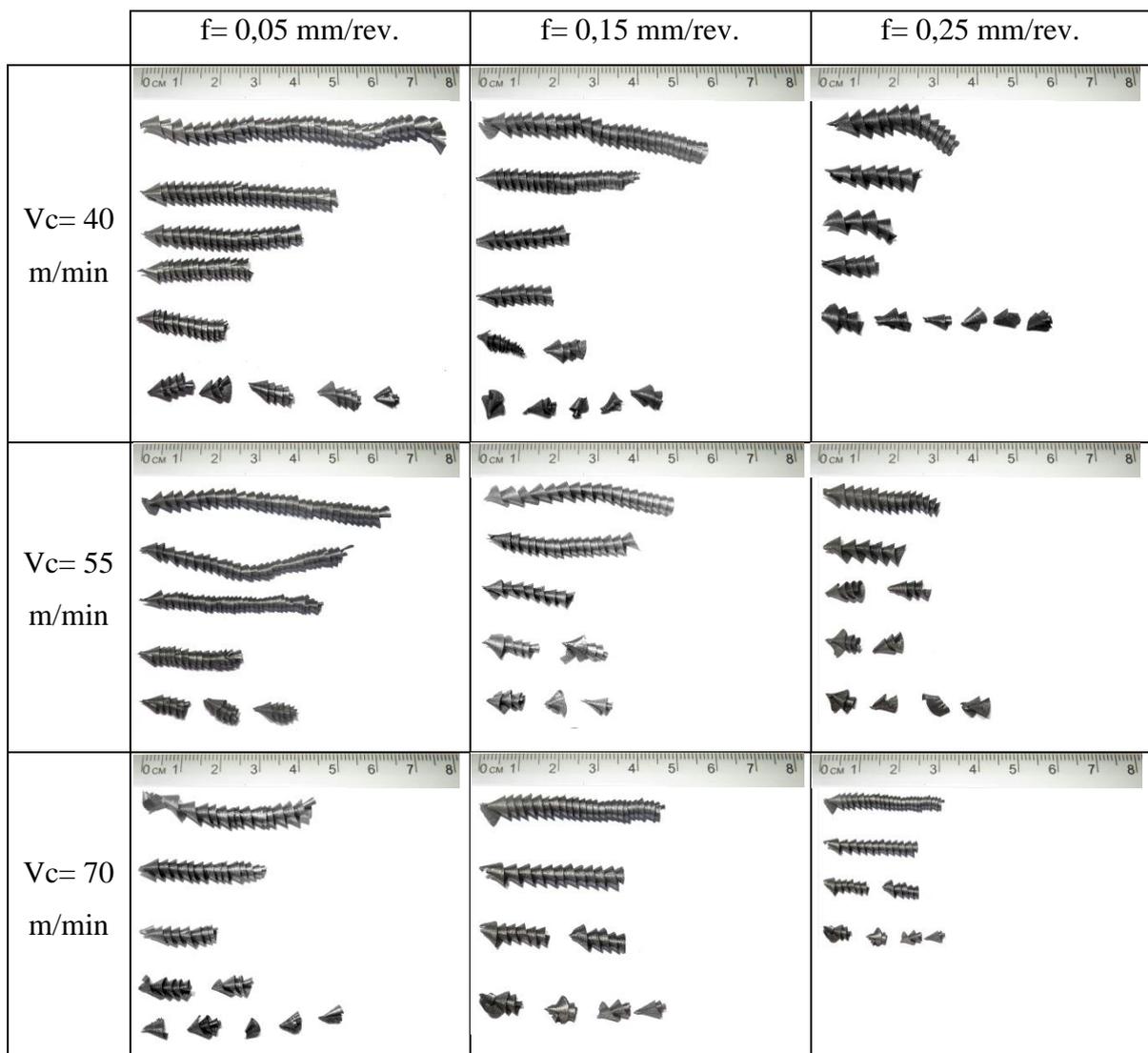
Os cavacos gerados na furação para as diferentes velocidades de corte, avanço e tipo de ferramenta empregada estão detalhados nos QUADROS 4.13, 4.14 e 4.15. Ao analisar as imagens para as três brocas sem revestimento e revestidas com SiO_2 e TiN , observa-se que o aumento do avanço contribuiu para a redução do tamanho do cavaco. Da mesma forma, nota-se que, para maiores velocidade de corte, houve uma leve redução no tamanho do cavaco. Isto pode ser atribuído ao fato de que a elevação da velocidade de corte pode aumentar o nível de vibração na operação de furação, facilitando o seccionamento do cavaco. Fato esse verificado para os dados do erro de circularidade, cujo valores apresentaram maior desvio-padrão para as maiores velocidades de corte, podendo ter sido influenciados pela vibração. Contudo, pode-se dizer que os parâmetros de corte influenciam na forma do cavaco.

De acordo com Rise (2006) *apud* Boeira (2010) as formas dos cavacos podem ser caracterizadas como do tipo espiral cônico e cavaco de transição, para as três ferramentas avaliadas. Não se observou alteração do tipo de cavaco conforme a variação dos parâmetros

de corte e ferramentas sem revestimento e revestidas, podendo ser classificados como cavacos descontínuos.

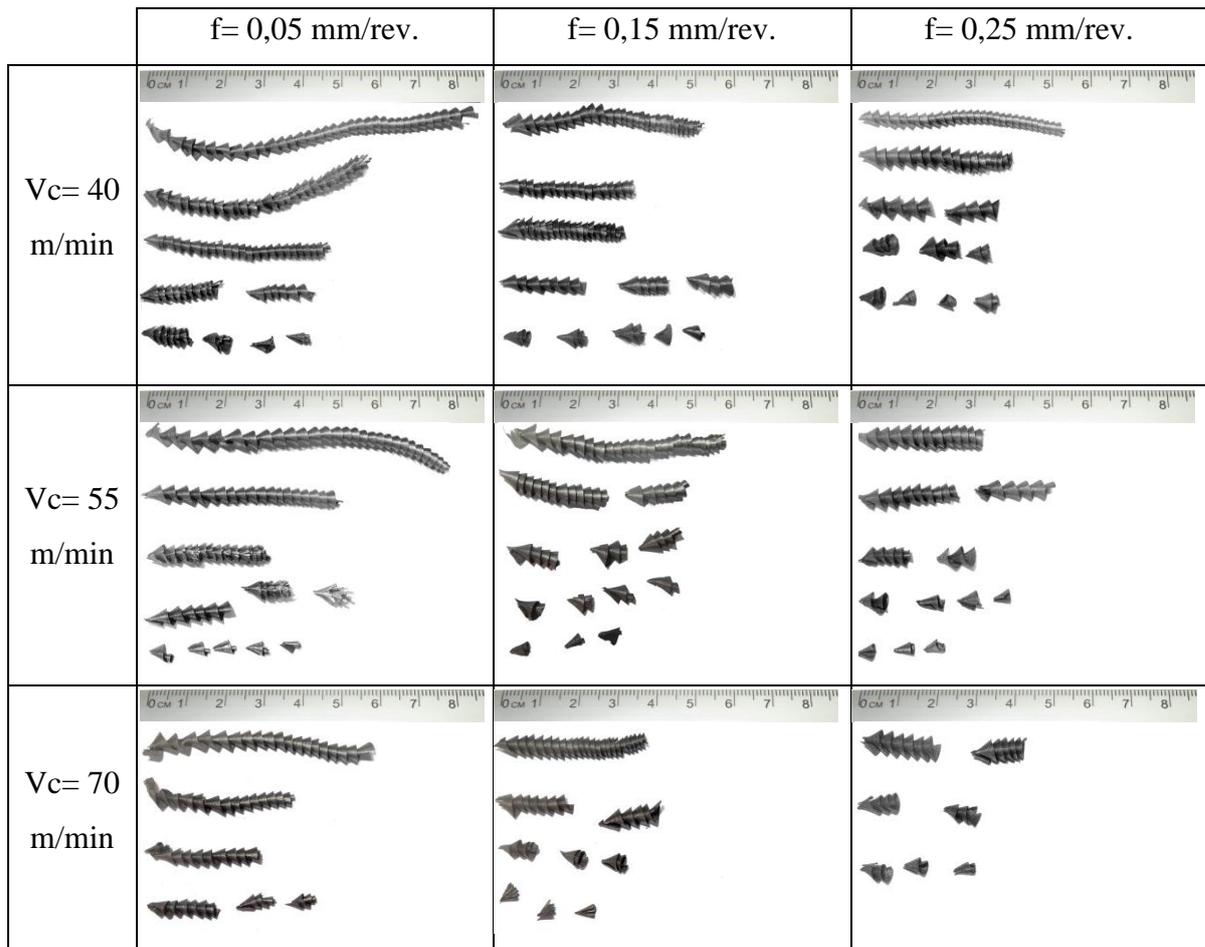
O ferro fundido nodular, por ser um material com elevada ductilidade, apresenta cavacos longos, em comparação com os cavacos do ferro fundido cinzento, que ocorrem em forma de fragmentos. A característica da matriz do ferro fundido nodular ferrítico contribuiu para a forma do cavaco, pois é um material em que acontece deformação plástica acentuada, ocorrendo alongamento dos nódulos de grafita, não permitindo que a quebra do cavaco realize-se tão facilmente. Outra questão associada aos cavacos longos é que estes podem acentuar os mecanismos de desgaste, pois o cavaco fica mais tempo em contato com a ferramenta, podendo prejudicar o acabamento.

QUADRO 4. 13 - Imagens dos cavacos coletados para ferramenta sem revestimento



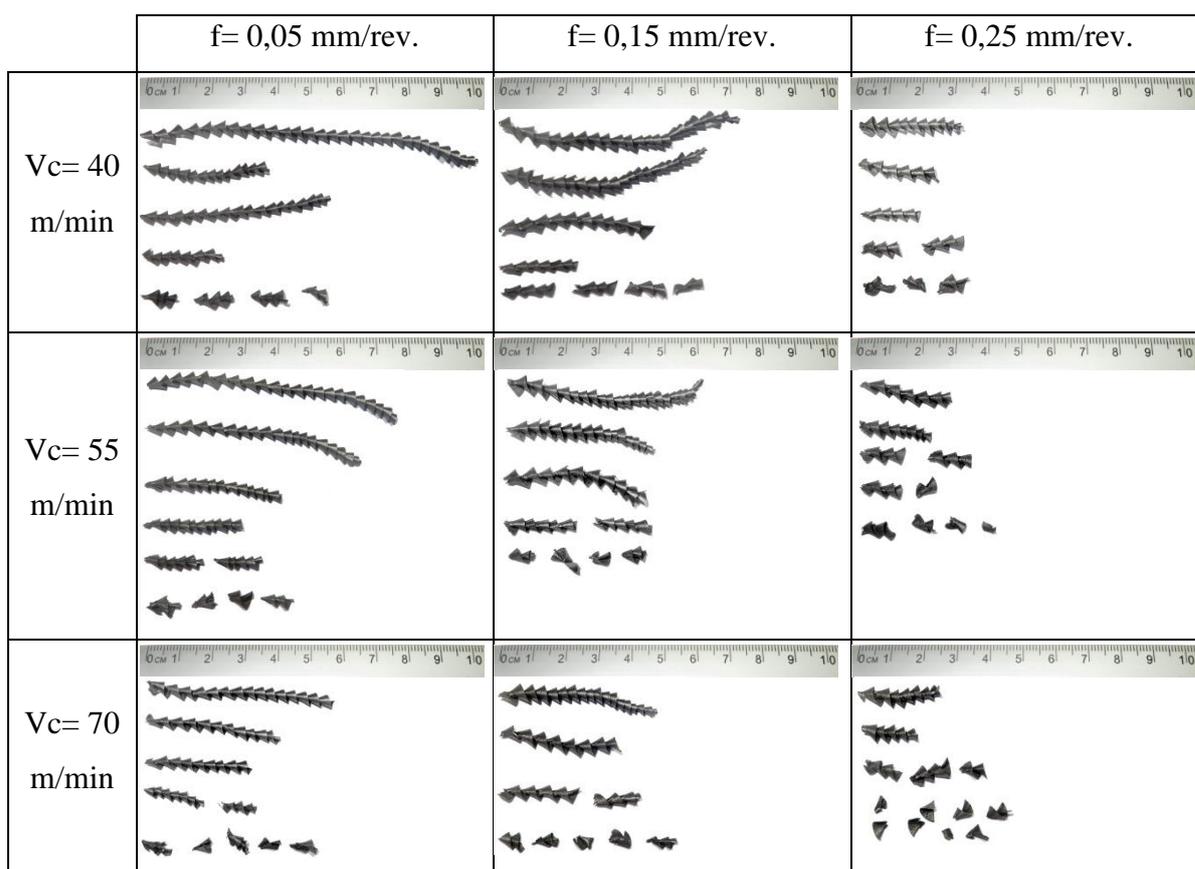
FONTE - O autor

QUADRO 4. 14 - Imagens dos cavacos coletados para ferramenta revestida com dióxido de silício



FONTE - O autor

QUADRO 4. 15 - Imagens dos cavacos coletados para ferramenta revestida com nitreto de titânio



FONTE - O autor

4.15 Análise do desgaste das ferramentas

Os parâmetros escolhidos para avaliação do desgaste das brocas revestidas e sem revestimento foram: velocidade de corte de 40 m/min e avanço de 0,25 mm/rev. Esses valores foram definidos analisando-se os resultados de força, rugosidade, diâmetro, circularidade e rebarba, sendo apresentadas rebarbas uniformes para a configuração dos parâmetros mencionados acima. Inicialmente, a velocidade de corte definida seria de 55 m/min; porém, quando se iniciou o ensaio de desgaste com a broca sem revestimento, a quantidade de furos realizados foi somente 10, e, devido a um elevado desgaste, não foi possível a continuação do ensaio. A espessura do disco foi semelhante à do corpo de prova utilizado na furação - 15 mm e furação passante.

Inicialmente, seria acompanhada a evolução do desgaste de flanco durante o ensaio; porém, nos primeiros furos, viu-se a dificuldade em realizar as medições devido à aderência de material visto visivelmente na região de flanco. Portanto, a medição do desgaste de flanco foi

realizada no final do teste, depois da limpeza das brocas. Observou-se a evolução do desgaste de flanco visualmente, no microscópio, a cada 5 furos ou quando necessário. Na câmera fotográfica, acompanhou-se o desgaste da superfície secundária de folga.

Considerou-se como término do ensaio o momento em que as brocas apresentassem desgaste, não sendo possível realizar mais furos. Para a broca revestida de TiN, realizou-se a furação até o término do disco. A broca sem revestimento furou 81 furos e apresentou um comprimento de furação de 1215 mm. A broca revestida com SiO_2 apresentou um comprimento de furação de 4020 mm, correspondente a 268 furos, e a broca com TiN exibiu comprimento de furação de 7065 mm, equivalente a 471 furos. Foram utilizados dois discos para avaliação do desgaste, conforme demonstrado na FIG. 4.24.

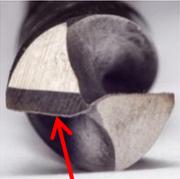
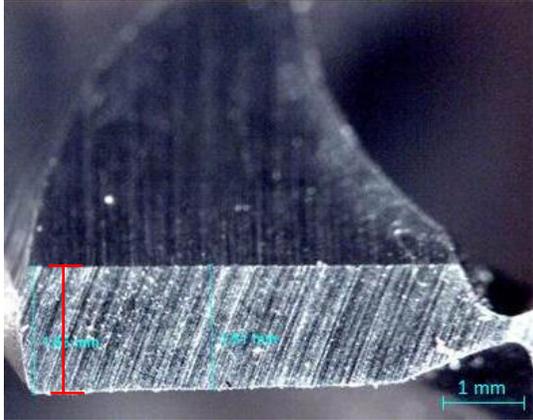
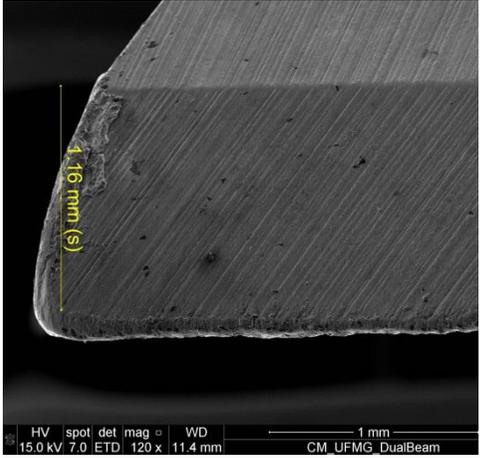
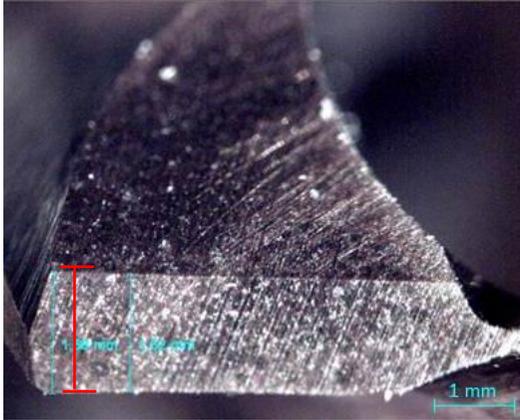
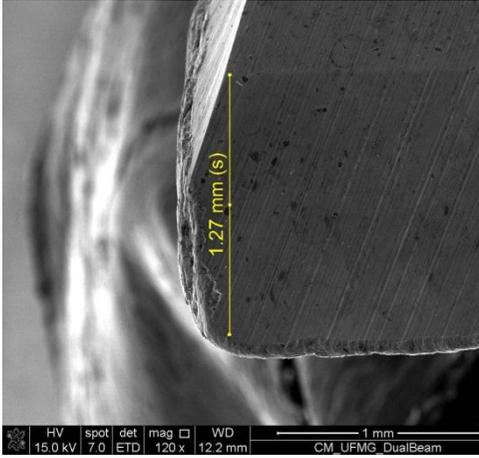
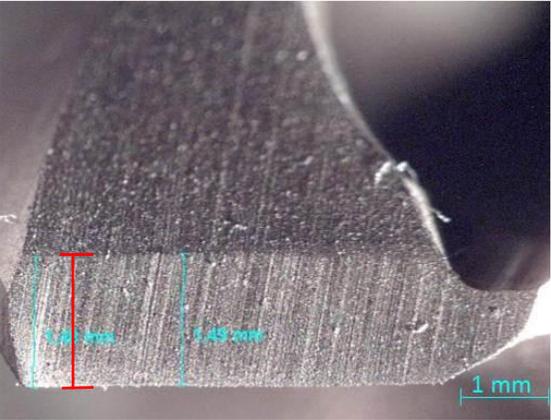
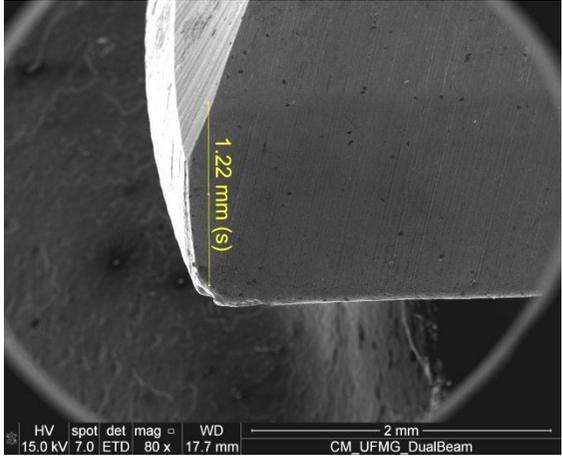


FIGURA 4. 24 - a) avaliação do desgaste com a broca sem revestimento e revestida com SiO_2 ; b) avaliação do desgaste com a broca revestida com TiN

FONTE - O autor

As imagens com a medição inicial e final para avaliação do desgaste de flanco estão representadas no QUADRO 4.16. Utilizou-se a região de facetamento para referência e, posteriormente, para calcular a diferença na região do desgaste de flanco e determinar o VB_{Bmax} .

QUADRO 4. 16 - Imagens iniciais das brocas e após teste de desgaste

	Broca sem revestimento	Broca revestida com SiO ₂	Broca revestida com TiN
 <p data-bbox="237 951 394 1054">Aresta principal de corte</p>	 <p data-bbox="461 794 931 871">Medição inicial na quina da aresta de corte: 1,55 mm</p> 	 <p data-bbox="1010 794 1480 871">Medição inicial na quina da aresta de corte: 1,58 mm</p> 	 <p data-bbox="1570 794 2040 871">Medição inicial na quina da aresta de corte: 1,48 mm</p> 

FONTE - O autor

A FIG. 4.25 apresenta os valores de desgaste de flanco máximo para as ferramentas sem revestimento e revestidas. Os maiores valores de desgaste foram para a ferramenta sem revestimento, seguida da ferramenta de SiO_2 e TiN. A presença do revestimento contribuiu para a redução do desgaste.

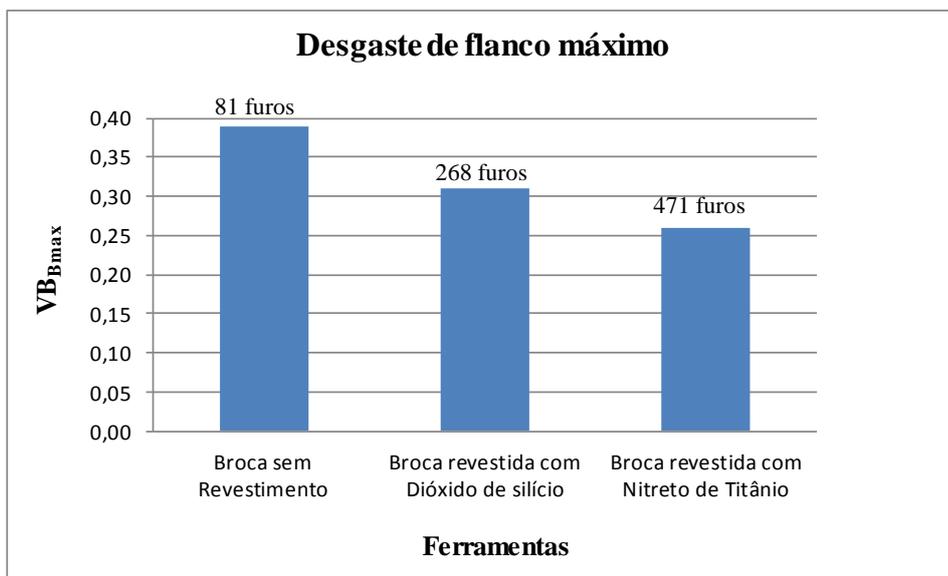
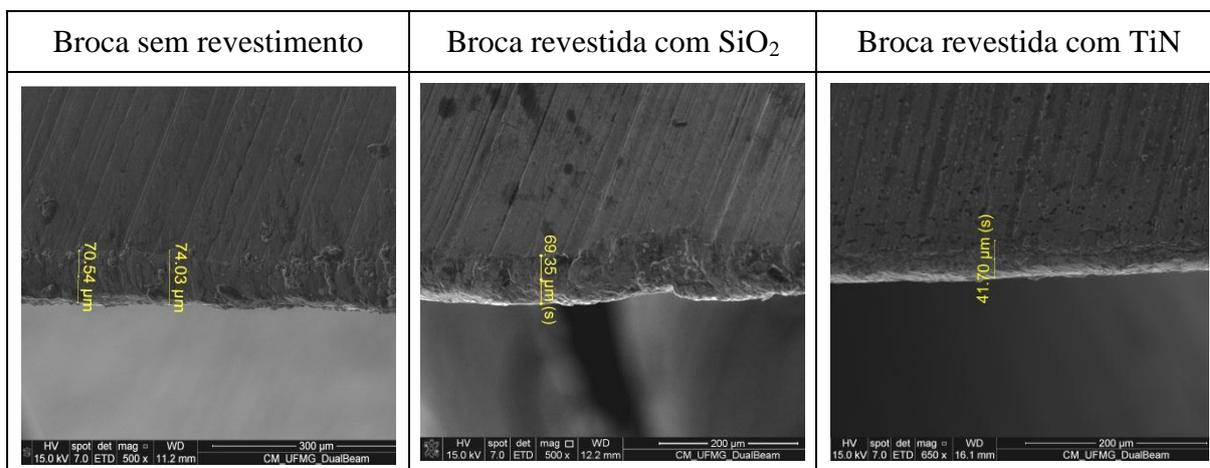


FIGURA 4. 25 - Desgaste de flanco máximo para as ferramentas sem revestimento e revestidas

FONTE - O autor

As imagens do QUADRO 4.17 retratam as medições do VB_B das brocas avaliadas. Os menores valores de desgaste de flanco médio foram para as brocas revestidas com TiN.

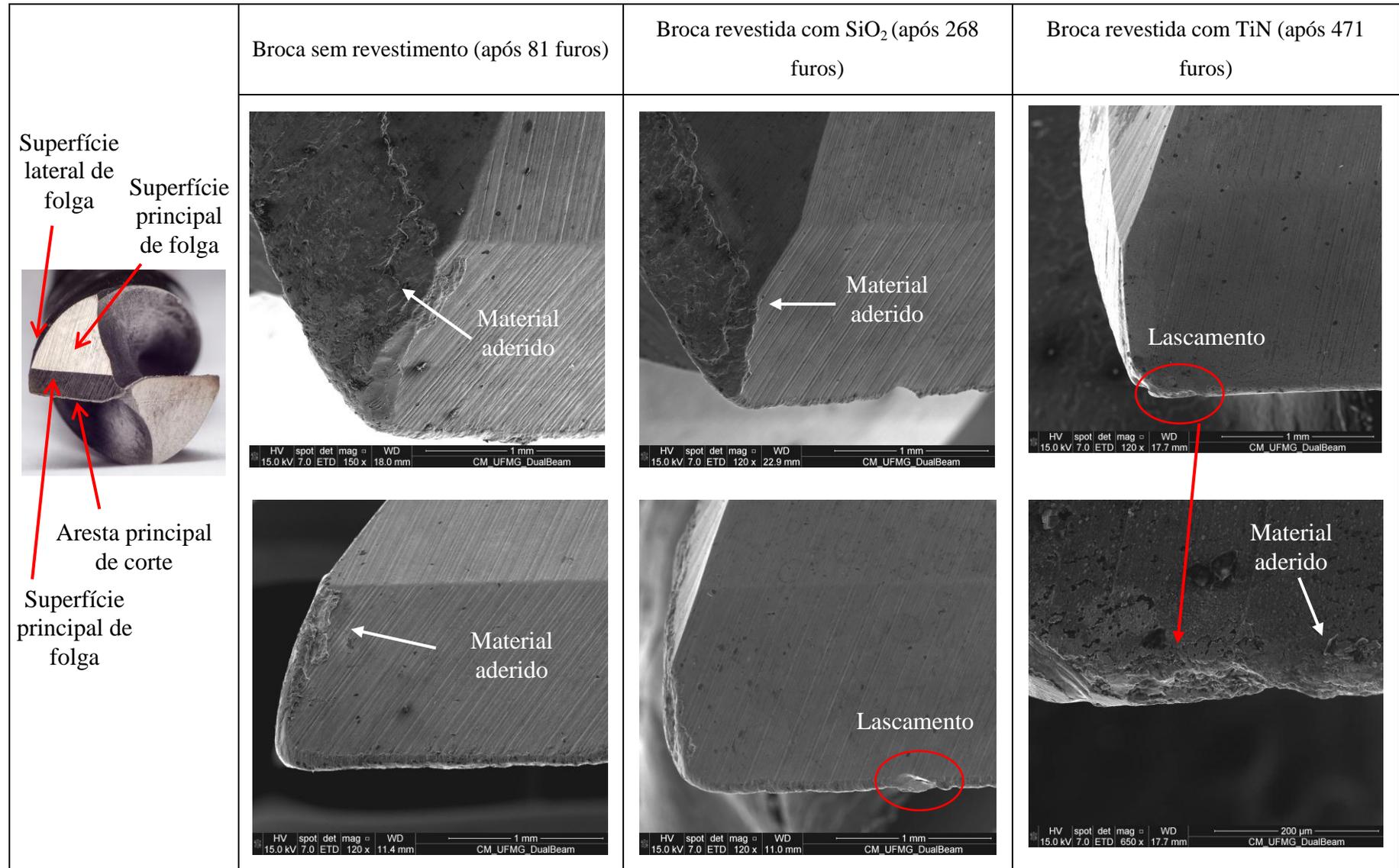
QUADRO 4. 17 - Valores do desgaste de flanco médio das brocas avaliadas



FONTE - O autor

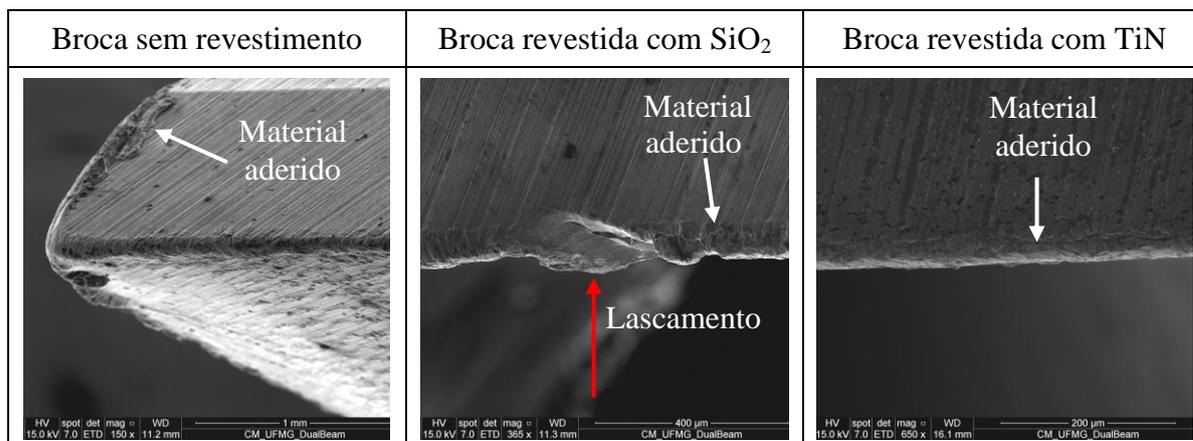
As imagens com os desgastes das brocas estão representadas nos QUADROS 4.18 e 4.19.

QUADRO 4. 18 - Imagens do desgaste das brocas sem revestimento e revestidas



FONTE - O autor

QUADRO 4. 19 - Região ampliada indicando o lascamento e material aderido para as ferramentas sem revestimento e revestidas



FONTE - O autor

As imagens demonstraram que o desgaste aconteceu em maior intensidade próximo à ponta da ferramenta, onde a velocidade de corte atingiu seu valor máximo. A aderência de material, visível próximo a aresta principal de corte, na aresta secundária de corte e na superfície lateral de folga das brocas impediu o detalhamento do mecanismo de desgaste presente após ensaio, para as brocas sem revestimento e revestida com SiO₂. A broca de TiN apresentou aderência de material somente na região do desgaste de flanco, como pode ser visto no QUADRO 4.18. O ferro fundido nodular ferrítico, devido à sua alta ductilidade, propicia grande adesão de material, conforme citado por Yigit *et al.* (2008) e Trent e Wright (2000), pois, por ter uma zona de fluxo extremamente dúctil, pode ocorrer adesão de material. É importante mencionar também que, mesmo com a limpeza ultrassônica, não foi possível remover todo o material aderido da broca.

Em relação ao desgaste, este será especificado para cada ferramenta. A ferramenta sem revestimento apresentou desgaste de flanco, desgaste de quina e arredondamento da aresta e ponta da broca. Para a ferramenta revestida de SiO₂, observou-se lascamento na aresta principal de corte, desgaste de flanco e arredondamento da aresta e na ponta da broca. A ferramenta TiN apresentou desgaste de flanco e lascamento na quina da broca, com arredondamento da aresta de corte. O revestimento de TiN foi o mais eficiente em relação à resistência ao desgaste, pois apresentou menores valores de desgaste de flanco médio, sendo 41,70 μm e VB_{Bmax} de 0,26 mm para os parâmetros velocidade de corte de 40 m/min e avanço de 0,25 mm/rev. O revestimento de SiO₂ também contribuiu por apresentar menores valores de desgaste de flanco médio, sendo 69,35 μm e VB_{Bmax} de 0,31 mm, possibilitando realizar

300% a mais de furos em comparação à ferramenta sem revestimento, apesar de a ferramenta, no final do desgaste, apresentar lascamento. A ferramenta sem revestimento exibiu um desgaste de flanco médio de 72 μm e $VB_{B_{\text{max}}}$ de 0,36 mm.

A análise tribológica da ferramenta sem revestimento apresentou elevadas taxas de desgaste e maiores coeficientes de atrito, e o resultado de maior desgaste de flanco para a ferramenta sem revestimento é justificado. Para as ferramentas sem revestimento, ocorreu aumento do atrito na região de corte do material e na interface cavaco-ferramenta, ocasionando maiores desgastes. O revestimento reduz a área de contato na face de saída da ferramenta, facilitando a saída do cavaco, dificultando a aderência de material e aumentando a resistência ao desgaste.

Marques (2012) também evidenciou adesão de material na região da superfície principal de folga e na aresta transversal de corte na furação de ferro fundido nodular ferrítico, com broca helicoidal de aço rápido AISI M2, revestida com AlCrN, na velocidade de corte de 35 m/min e avanço de 0,15 mm/rot. O material aderido é caracterizado pelo encruamento do cavaco durante a usinagem. Na aresta transversal de corte, o fato de a velocidade de corte no centro ser mais baixa e a existência de ângulo de saída muito negativo dificultaram a saída dos cavacos, causando aderência de material. A matriz ferrítica do ferro fundido contribuiu também para a adesão de material.

Neste trabalho, não foram registradas as imagens obtidas pela câmera fotográfica durante o ensaio de desgaste da região da superfície secundária de folga, para não estendê-lo. As imagens obtidas pelo MEV, representadas pelo QUADRO 4.18, detalham essa região.

5 CONCLUSÃO

Por meio dos resultados dos testes de furação do ferro fundido nodular ferrítico FE 42012, utilizando-se brocas helicoidais de aço rápido AISI M2 sem revestimento e revestidas com SiO_2 pelo processo sol-gel e revestidas com TiN pelo método PVD para diferentes parâmetros de corte, são descritas algumas considerações a seguir:

Em relação à caracterização do revestimento SiO_2 pelo método sol-gel:

- por meio das imagens do MEV observaram-se regiões em que o revestimento de SiO_2 não foi uniforme e a adesão não foi completa, mostrando delaminação do revestimento, apresentando problemas em relação à molhabilidade. Contudo, no que diz respeito à parte dinâmica da furação, na qual serão apresentadas as conclusões a seguir, a ferramenta revestida de SiO_2 apresentou melhores resultados quando comparada à ferramenta sem revestimento.

Sobre a análise tribológica pino sobre o disco, concluiu-se que:

- os revestimentos possibilitaram menores valores de coeficiente de atrito e taxas de desgastes, em comparação ao pino sem revestimento, juntamente com o efeito da grafita dos ferros fundidos nodulares que forma um filme lubrificante e auxilia na redução do atrito e melhorando a resistência ao desgaste. O par tribológico pino revestido de TiN contra o ferro fundido apresentou um melhor desempenho em todas as velocidades de deslizamento, conforme a análise das pistas, pinos, coeficiente de atrito e taxa de desgaste, assegurando um mecanismo de desgaste abrasivo suave. Porém, o par tribológico pino revestido de SiO_2 contra o ferro fundido, exibiu um bom comportamento até a velocidade de deslizamento de 55 m/min, demonstrando um mecanismo de desgaste abrasivo suave. Já o pino sem revestimento obteve maiores valores de coeficiente de atrito e taxa de remoção para todas as velocidades avaliadas e um predominante desgaste abrasivo severo.

Em relação à força de avanço constatou-se que:

- o planejamento fatorial completo permitiu confirmar que os parâmetros principais avanço e a ferramenta de corte e as interações de segunda ordem afetaram significativamente a força de avanço. De maneira geral, o aumento do avanço elevou os valores da força, e as ferramentas revestidas contribuíram para garantir menores valores.

No que concerne à rugosidade dos furos pôde-se concluir que:

- o mesmo planejamento fatorial aplicado para a análise da força de avanço permitiu atestar que, dentre os parâmetros principais, o avanço e a ferramenta mostraram-se significantes. O aumento do avanço contribuiu, em proporção quadrática para o aumento do R_a . Em relação à ferramenta de corte, a presença do revestimento proporcionou menores valores de rugosidade média.

Sobre o diâmetro médio e o erro de circularidade pôde-se atestar que:

- por meio da análise fatorial aplicada ao diâmetro médio, o avanço e a ferramenta de corte apresentaram-se significantes. O aumento do avanço contribuiu por exibir menores variações dimensionais dos furos. Quanto à ferramenta de corte, as menores variações dimensionais dos furos foram para as ferramentas revestidas, tendo a ferramenta de TiN apresentado melhor desempenho.
- quanto ao erro de circularidade, ao avaliar o desvio-padrão das amostras para cada ferramenta, observou-se que para maiores velocidades de corte os erros foram maiores, podendo ter sido influenciado pela vibração na operação de furação. Em relação à ferramenta de corte, por meio da análise do boxplot, a ferramenta sem revestimento mostrou-se uma maior variabilidade. A presença dos revestimentos indicaram menores dispersões para o erro de circularidade.

Em relação à rebarba, conclui-se que:

- as maiores rebarbas ocorreram nos furos de maior velocidade de corte e maiores avanços para as ferramentas sem revestimento e revestida com SiO_2 , apresentando rebarbas dos tipos transição e coroa. Porém, para as velocidades de corte 40 e 55 m/min e avanço 0,25 mm/rev., foram observadas rebarbas uniformes tipo I, mais

fáceis de serem removidas, tanto para a ferramenta sem revestimento quanto para a ferramenta revestida com SiO_2 . Observaram-se, para os furos com a ferramenta revestida com TiN, rebarbas uniforme tipo I, e, para alguns furos, rebarba de transição. A presença do revestimento contribuiu para que ocorressem rebarbas uniformes, associado a um baixo coeficiente de atrito para essa ferramenta.

Em relação à forma do cavaco, inferiu-se que:

- o aumento do avanço e da velocidade de corte fez com que a forma do cavaco fosse modificada, reduzindo o seu tamanho para todas as ferramentas avaliadas. Quanto ao tipo, este não foi alterado pelas configurações dos parâmetros de corte estudado, sendo classificado como cavaco descontínuo.

Quanto ao desgaste das ferramentas de corte, pôde-se constatar que:

- por meio da análise das imagens de microscopia óptica e MEV, não foi possível descrever os possíveis mecanismos de desgaste para as ferramentas estudadas, devido à presença de material aderido nas ferramentas de corte, tanto aresta principal de corte, na aresta secundária de corte e na superfície lateral de folga. Foi evidenciado, para a ferramenta sem revestimento, desgastes de flanco e de quina, sendo que as ferramentas revestidas de SiO_2 e TiN apresentaram lascamentos próximos à aresta de corte e desgaste de flanco. Em relação à medição do desgaste de flanco máximo e médio, os menores valores foram para as ferramentas revestidas. Em relação ao número de furos, a ferramenta de SiO_2 apresentou um comportamento de 300% a mais no número de furos quando comparada a ferramenta sem revestimento.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados apresentados neste trabalho representam uma investigação limitada à análise de alguns parâmetros pré-selecionados. Contudo, para dar continuidade a essa linha de pesquisa, é proposto:

- coleta dos dados da força de avanço, de forma direta, com o auxílio de um dinamômetro e monitoramento da vibração durante o ensaio de furação;
- melhorar o efeito da molhabilidade em relação ao substrato quando utilizar revestimentos pelo método sol-gel, seja aumentando a rugosidade do substrato ou utilizando materiais que permitem a remoção dos óxidos da superfície;
- avaliar algum processo que auxilie na limpeza das brocas, principalmente quando se trabalha com materiais muito dúcteis, devido à aderência de material, permitindo, assim, a análise dos mecanismos de desgaste presentes após ensaio.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO 5419 - **Brocas helicoidais, termos, definições e tipos**, 2009.

ABOUKHASHABA, A. A. Life of TiN and Ti (C, N) coated and uncoated HSS drills. **Surface Engineering**, 2013.

ALVES, L.O.; RONCONI, C. M.; GALEMBECK, A. Decomposição de precursores metalorgânicos: uma técnica química de obtenção de filmes finos. **Química Nova**, vol. 25, No.1, 69-77, 2002.

AMIRI, S.; RAHIMI, A. Hybrid nanocomposite coating by sol-gel method: a review. **Iran Polymer and Petrochemical Institute**, 2016.

ASME Y14.5M - Dimensioning and Tolerancing, 1994.

ASTM G99-05 - **Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus**, 2010

AGUIAR, M.C.C.W.S. **Planejamento e Análise de Experimentos: Como identificar e avaliar as principais variáveis influentes em um processo**. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Fundação Christiano Ottoni, Belo Horizonte, 1996.

ASTAKHOV, V.P. **Drills: Science and Technology of Advanced Operations**, CRC Press: Taylor & Francis Group, NW, 2014

AURICH, J.C; DORNFELD, D.; ARRAZOLA, P.J.; FRANKE, V.; LEITZ,L.; MIN,S. Burns-Analysis, control and removal. **CIRP Annals- Manufacturing Technology**, 2009.

BARBOSA, P.A. “Furação de ferros fundidos austemperados e nodular perlítico”. Dissertação de Mestrado do programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, **Universidade Federal de Uberlândia**, 2009.

BARBOSA, P.A.; RABELO, G.B.; GUESSER, W.L.; COSTA, E.S.; MACHADO, A.R. “Esforços de usinagem na furação de ferro fundido vermicular e nodular perlítico”, **5º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Belo Horizonte, 2009.

BARROS NETO, B.D.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E. **Como fazer experimentos**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

BHUSHAN, B. **Introduction to Tribology**. 2 ed. New York: J. Wiley, 2013.

BLANCO, D.; VIESCA, J. L.; MALLADA, M. T.; RAMAJO, B.; GONZÁLEZ, R.; HERNÁNDEZ BATTEZ, A. Wettability and corrosion of [NTf₂] anion-based ionic liquids on steel and PVD (TiN, CrN, ZrN) coatings. **Surface & Coatings Technology**, 2016.

BLAU, P. J. **Friction Science and Technology: From concepts to applications**. 2 ed. New York: CRC Press, 2009.

BOEIRA, A.M.G. “Modelagem e simulação das forças na furação com brocas helicoidais a partir de dados obtidos no torneamento de segmentos cilíndricos”. Tese de Doutorado do programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, **Universidade Federal de Santa Catarina**, Florianópolis, 2010.

BORK, C. A. “Otimização de variáveis de processo para furação do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541”, Dissertação de Mestrado do programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, **Universidade Federal de Santa Catarina**, Florianópolis, 1995.

CALLISTER JR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais uma introdução**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CARDOSO, F.; NUNES, J.; CARLINI, G.C.; COLAÇO, F.H.G; GALIOTTO, A. “Avaliação dos parâmetros de corte na furação de ferro fundido FE45012”. **XXII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica**, Campos dos Goytacazes, 2015.

CARDOSO, M. J. “Análise do processo de furação profunda no aço SAE 4144M endurecido utilizando MQL e broca helicoidal revestida”. Dissertação de Mestrado do programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, **Universidade Federal do Paraná Campus Curitiba**, Curitiba, 2014.

CASTILLO, W. J. G. “Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal-duro com canais retos”. Dissertação de Mestrado do programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, **Universidade Federal de Santa Catarina**, Florianópolis, 2005.

CESCHINI, L.; CAMPANA, G.; PAGANO, N.; ANGELINI, V. Effect of laser surface treatment on the dry sliding behaviour of the ENGJS400-12 ductile cast iron. **Tribology International**, 2016.

CHATTERJEE, S.; CHANDRASHEKHAR, S.; SUDARSHAN, T.S. Review deposition processes and metal cutting applications of TiN coatings. **Journal of materials science**, 1992.

CHEN, Y. C., AI, X., HUANG, C. Z., WANG, B. Y. Preparation of α -alumina coated carbide tools by the sol-gel process. **Materials Science and Engineering**, 2000.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7 ed. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais-ABM, São Paulo, 2012.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8ed. São Paulo: Artliber, 2013.

FERRARESI, D. **Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blucher, 1970.

FELDSHTEIN, E. The influence of machining conditions on burr shapes when drilling reach-through holes in difficult-to-cut materials. **Advances in Manufacturing science and technology**, 2011.

FUKUI, H. Evolutional history of coatings Technologies for cement carbide inserts- Chemical Vapor Deposition and Physical Vapor Deposition. **Sei Technical Review**, 2016.

GHANI, A. K.; CHOUDHURY, I.A.; HUSNI. Study of tool life, surface roughness and vibration in machining nodular cast iron with ceramic tool. **Journal of Materials Processing Technology**, 2002.

GOUVEIA, W.J.S. “Estudo de revestimentos híbridos de sol-gel na proteção de ligas de alumínio para a construção civil”. Dissertação de Mestrado em Química Tecnológica, **Universidade de Lisboa**, Lisboa, 2013.

GUESSER, W. L.:“Avaliação da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular através de Ensaio de Furação”,**6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, 2011.

GUESSER, W.L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. Editora Edgard Blucher. São Paulo, 2009.

GUGLIELMI, M. Sol-Gel Coatings on Metals. **Journal of Sol-Gel Science and Technology**, 1997.

GUNDUZ, B.; CAVAS, M.; YAKUPHANOGLU, F. Quality controlling of SiO₂ thin films by sol gel method. **6th International Advanced Technologies Symposium**, 2011.

GRZESIK, W.; RECH, J.; ZAK,K.; CLAUDIN, C. Machining performance of pearlitic-ferritic nodular cast iron coated carbide and silicion nitride ceramic tools. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 2009.

GRZESIK, W.; KISZKA, P.; KOWALCZYK, D.; RECH, J.; ZAK,K.; CLAUDIN, C. Machining of nodular cast iron (PF-NCI) using CBN tools. **SciVerse ScienceDirect**, 2012.

HOLMBERG, K. MATTHEWS, A. **Coatings Tribology: properties, techniques and applications in surface engineering**. 2. Ed. Great Britain: Elsevier, 2009.

HOUMARD, M.; RIASSETTO, D.; ROUSSEL, F.; BOURGEOIS, A.; BERTHOMÉ, G.; JOUD, J.C.; LANGLET, M. Morphology and natural wettability properties of sol-gel derived TiO₂-SiO₂ composite thin films. **Elsevier**, 2007.

HÜTTER, G.; ZYBELL, L.; KUNA, M. Micromechanisms of fracture in nodular cast iron: From experimental findings towards modeling strategies – A review. **Engineering Fracture Mechanics**, 2015.

HUTCHINGS, I.M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. CRC Press, 1992.

KALPAKJIAN, S.; SCHIMD, S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. 6 ed. New Jersey: Prentice Hall, 2010.

KANAL, M. Statisticals characteristics of drill wear and drill life for standardized performance tests. **Cirp Annals manufacturing technology**, 1978.

KIM, J.; MIN, S.; DORNFELD, D.A. Optimization and control of drilling burr formation of AISI 304L and AISI 4118 based on drilling burr control charts. **International Journal of Machine Tools e Manufacture**, 2001.

KIM, J.; DORNFELD, D. Development of an analytical model for drilling burr formation in ductile materials. **Journal of Engineering Materials and Technology**, 2002

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1 – Cutting**. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2011.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungserfahren: drehen, fräsen, bohren**. 5 ed. Berlin: Springer, 1997.

LAU, K.H.; MEID,.; YEUNG, C. F.; MAN, H.C. Wear characteristics and mechanisms of a thin edge cutting blade, **J.Mater. Process. Technol**, 2000.

LEVY, D.; ZAYAT, M. **The Sol-Gel Handbook- synthesis, characterization and applications**. 2 ed. Alemanha, 2015.

NAYYAR, V.; KAMINSKI, J.; KINNANDER, A.; NYBORG, L. An experimental investigation of machinability of graphitic cast iron grades; flake, compacted and spheroidal graphite iron in continuous machining operations, **SciVerse Science Direct**, 2012.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R.; T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2011.

MARMENTINI, M. M.: “Análise da furação do ferro fundido nodular utilizando brocas helicoidais de M2 nitretadas”. Dissertação de Mestrado do Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, **Universidade Tecnológica Federal do Paraná**, Curitiba, 2009.

MARMENTINI, M. M.; PINTAÚDE, G.; BELTRÃO, P.A. C. Influência dos parâmetros de furação sobre a geometria e acabamento superficial de ferros fundidos utilizando brocas de aço rápido. **V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, 2008

MARQUES, F. M.: “Avaliação do desempenho de Brocas Helicoidais de Aço Rápido Revestidas na Usinagem do Ferro Fundido Nodular GGG50”. Dissertação de Mestrado do Programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 2012.

MARSAL, A.; ANSART, F.; TURQ, V.; BONINO, J.P.; SOBRINO, J.M.; CHEN, Y.M. GARCIA, J. Mechanical properties and tribological behavior of a sílica or/and alumina coating prepared by sol-gel route on stainless steel. **Surface e Coatings Technology**, 2013.

MATTOX, D.M. **Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing: film formation, adhesion, surface preparation and contamination control**. New Jersey, 1978.

MEENA, A.; MANSORI, M. E. Cutting performance and wear mechanisms of PVD coated carbide tools during dry drilling of newly produced ADI. **American Institute of Physics**, 2016.

MIN, S.; KIM, J.; DORNFELD, D.A. Development of a drilling burr control chart for low alloy steel, AISI 4118. **Journal of Materials Processing Technology**, 2001.

MINITAB. Disponível em <http://support.minitab.com/pt-br/minitab/17/topic-library/basic-statistics-and-graphs/introductory-concepts/data-concepts/anderson-darling/>. Acesso em: 23/11/2016.

MITSUBISHI. **Mitsubishi Tooling Technology Level 2**, 2006.

MOCELLIN, F.; MELLERAS, E.; GUESSER, W. L.; BOEHS, L. Study of the machinability of compacted graphite iron for drilling process. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 2004.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

NERI, M.A.; CARREÑO, C. Effect of copper content on the microstructure and mechanical properties of a modified nodular iron. **Materials Characterization**, 2003.

NIKNAM, A.S.; ZEDAN, Y.; SONGMENE, V. Machining burs formation and deburring of aluminium alloys. **Material Science- Light Metal Alloys Applications**, 2014.

PAGANO, N.; ANGELINI, V.; CESCHINI, L.; CAMPANA, G. Laser remelting for enhancing tribological performances of a ductile iron, **Procedia CIRP** **41**, 2016.

PAIVA JR, J. M. F. D.; AMORIM, F.L.; SOARES, P.; TORRES, R. D. Evaluation of hard coating performance in drilling compacted graphite iron (CGI). **Journal of Materials Engineering and Performance**, 2013.

PALDEY, S.; DEEVI, S.C. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti, Al)N: a review. **Materials Science and Engineering**, 2003.

RABINOWICZ, E. **Friction and wear of materials**. 2 ed. Canada: John Wiley & Sons, Inc, 1995.

REZENDE, B.A.; RUBIO, J.C.C; VIEIRA, L.M.G.; HOUMARD, M. Drilling of aluminium/PE sandwich material with a novel TiO₂-coated HSS drill deposited by sol-gel process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2017.

SAHIN, Y.; KILICLI, V.; OZER, M.; ERDOGAN, M. Comparison of abrasive wear behavior of ductile iron with different dual matrix structures. **Wear**, 2010.

SANCHEZ, C.; BELLEVILLE, P.; POPALL, M.; NICOLE, L. Applications of advanced hybrid organic-inorganic nanomaterials: from laboratory to market. **Chemical Society Technology**, 2002.

SHAW, M.C. **Metal Cutting Principles**. 1 ed. Oxford University Press, New York, 1984.

SAKKA, S.; YOKO, T. **Sol-gel derived coating films and applications**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1992.

SILVA, M. A. “Investigação experimental da formação do cavaco na usinagem do aço ABNT 1045 e do ferro fundido nodular”. Dissertação de Mestrado do programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, **Universidade Federal de Uberlândia**, 2008.

SILVA, R. G. “Avaliação do desempenho de brocas revestidas pelo processo Sol-Gel na furação de ferro fundido cinzento”. Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica, **Universidade Federal de Minas Gerais**, 2015.

SME- Society of Manufacturing Engineers. **Tool and Manufacturing Engineers Handbook**. 4.ed., Dearbon, Michigan, 1983

SMITH, W. F. **Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. 3 ed. Portugal: Mcgraw-will, 1998.

SMITH, W. F. **Advanced Machining-The Handbook of Cutting Technology**. IFS Publications, 1989.

STEMMER, C.E. **Ferramentas de Corte I**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 3 ed., 1993.

STEMMER, C.E. **Ferramentas de Corte II**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 3 ed., 2005.

SCHROETER, R. B.; WEINGAERTNER, W. L. **Processo de usinagem e ferramentas de corte** – Nível 1, vol 2. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2001 (b).

TRENT, E; WRIGHT, P. **Metal Cutting**. 4 ed. Butterworth Heinemann, 2000.

TLILI, B.; BARKAOUI, A.; WALOCK, M. Tribology and wear resistance of the stainless steel. The sol-gel coating impact on the friction and damage. **Tribology International**, 2016.

TKAYA, M. B.; MEZLINI, S.; MANSORI, M. EL.; ZAHOUANI, H. On some tribological effects of graphite in wear mechanism of SG cast iron: Finite element and experimental analysis. **Wear**, 2009.

VILLARES METALS. Disponível em: <http://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Rapidos/VWM2>>. Acesso em 07 dez, 2016.

YANDA, H.; GHANI, J.A.; RODZI, M.N.A.M.; OTHMAN, K.; HARON, C. H.C. Optimization of material removal rate, surface roughness and tool life on conventional dry turning of FCD 700. **International Journal of Mechanical and Materials Engineering**, 2010.

YAZICI, M.; ÇOMAKLI, O.; YETIM, T.; YETIM, A.F.; ÇELIK, A. Effect of sol aging time on the wear properties of TiO₂-SiO₂ composite films prepared by a sol-gel method. **Tribology internacional**, 2016.

YIGIT, R.; CELIK, E.; FINDIK, F.; KOKSAL, S. Effect of cutting speed on the performance of coated and uncoated tools in turning nodular cast iron. **Journal of Materials Processing Technology**, 2008.

WANG, D.; BIERWAGEN, G.P. Sol-gel coatings on metals for corrosion protection. **Progress in Organic Coatings**, 2009.

WERLANG FILHO, A. “Análise da usinabilidade de ferros fundidos nodulares austemperados como função dos tratamentos térmicos e microestruturas”. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, **Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 2015.

ANEXOS

Composição química dos corpos de prova utilizados na furação



SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi
 Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270
 Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

Análise Química por Combustão Direta Infravermelho
Chemical Analysis by by Combustion Infrared Method

Relatório / Report nº 15604/2016

Elementos <i>Elements</i>	Concentração <i>Concentration</i>	Unidade <i>Unit</i>
Carbono (C)	3,62819	%
Enxofre (S)	0,01338	%

Análise Química por Espectrometria ICP (Plasma) - Base Ferro
Chemical Analysis by Spectrometry ICP (plasma) - Iron Base

Relatório / Report nº 15605/2016

Elementos <i>Elements</i>	Concentração <i>Concentration</i>	Elementos <i>Elements</i>	Concentração <i>Concentration</i>
Carbono (C)	ND	Cromo (Cr)	ND
Enxofre (S)	ND	Cobre (Cu)	ND
Silício (Si)	2,468	Níquel (Ni)	ND
Manganês (Mn)	0,094	Molibdênio (Mo)	ND
Magnésio (Mg)	0,0283	Estanho (Sn)	ND
Fósforo (P)	0,0584	Vanádio (V)	ND
Titânio (Ti)	ND	Alumínio (Al)	ND

Propriedades mecânicas dos corpos de prova utilizados na furação



UNIVERSIDADE DE ITAÚNA
 FACULDADE DE ENGENHARIA - LABORATÓRIO METALGRÁFICO

CERTIFICADO Nº: 238454

ENSAIO DE TRAÇÃO

Item	C.P	Indicações	Diâmetro (mm)	Área Seção (mm ²)	Limite escoam. (MPa)	Limite Resist. (MPa)	Along: 25mm (%)	Estricção (%)	Dureza
7	1	Hora:13:32 125F01	5,94	27,71	376	554	14,0	====	=====

***Máquina Universal de Ensaios, tipo mecânica, marca Emic modelo DL 20000, NO 11441, NS094. Está calibrada pela ABNT NBR ISO/IEC 17025...
 CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº145499, emitido pelo Laboratório Isaac Newton do Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC - Acreditado pela RBC-CAL-0045.

Observações:

Limite de escoamento determinado a 0,2%

Os ensaios mecânicos realizados conforme norma "ABNT NBR ISO 6892-1:2013 B".

Itaúna, 05 de Agosto de 2016

Composição química do disco referente ao ensaio de desgaste



Certificado de Qualidade

Av. Cardeal Eugênio Pacelli, 1998 - Bairro Cidade Industrial - CEP 32.210-003 - Contagem - Minas Gerais - Fone: 3368-2800 - Fax: 3368-2837

Cliente: NATALIA FERNANDA SANTOS PEREIRA

Nota Fiscal: 168815

Dt.Emissão: 15/12/16

Item	Produto	Quantidade	Un.	No. Certifi.	Corrida	No. NF For.	Fornecedor
3	F.F. NODULAR 45012 Ø 306,90 X 25	30,10	KG	7308	7308	828971	TUPY S.A

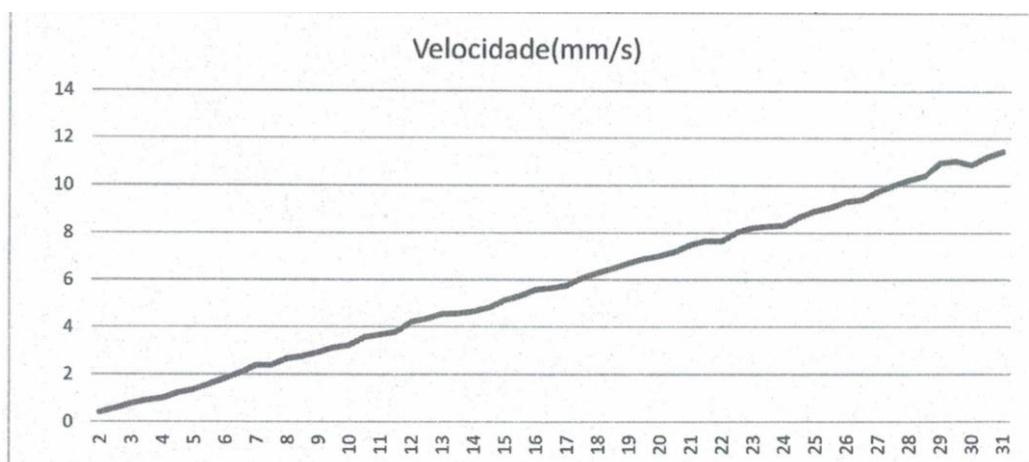
Análise química

C	Cr	Cu	Mg	Mn	P	S	Si
3,55000	0,01200	0,04100	0,04800	0,18000	0,07100	0,01400	2,65000

Ensaio do item

APÊNDICE A – Curva de calibração da velocidade do *dip-coating*

Tensão(V)	Velocidade(mm/s)	Tensão(V)	Velocidade(mm/s)
2	0,405624662	16,5	5,655042413
2,5	0,592183182	17	5,760921747
3	0,781657113	17,5	6,091370558
3,5	0,92936803	18	6,305832895
4	1,01146325	18,5	6,493506494
4,5	1,224989792	19	6,715540881
5	1,376778339	19,5	6,912442396
5,5	1,596763892	20	7,021650088
6	1,823708207	20,5	7,198992141
6,5	2,071823204	21	7,490636704
7	2,386634845	21,5	7,667731629
7,5	2,396166134	22	7,657945118
8	2,669039146	22,5	8,037508372
8,5	2,754820937	23	8,219178082
9	2,926829268	23,5	8,279287981
9,5	3,061849357	24	8,327550312
10	3,234501348	24,5	8,670520231
10,5	3,57568534	25	8,921933086
11	3,680981595	25,5	9,084027252
11,5	3,783102144	26	9,33125972
12	4,219409283	26,5	9,411764706
12,5	4,360465116	27	9,748172218
13	4,545454545	27,5	10,00834028
13,5	4,580152672	28	10,23017903
14	4,660797514	28,5	10,42571677
14,5	4,825737265	29	10,96892139
15	5,131128848	29,5	11,03955842
15,5	5,309734513	30	10,87941976
16	5,593536358	30,5	11,22544434
f(x)	$0,378516783136507 * X - 0,46914121745081$	31	11,45038168



**APÊNDICE B – Cargas utilizadas para a calibração e equação de regressão da força
de avanço x ddp**

Tabela B.1 – Dados da calibração

Massa (kg)	Força (N)	ddp (V)
0	0,000	0
1,888	185,024	0,130
3,844	376,712	0,250
6,844	670,712	0,440
10,275	1006,950	0,650
14,644	1435,112	0,900
20,53	2011,940	1,230
24,29	2380,420	1,400
27,696	2714,208	1,620
31,261	3063,578	1,750

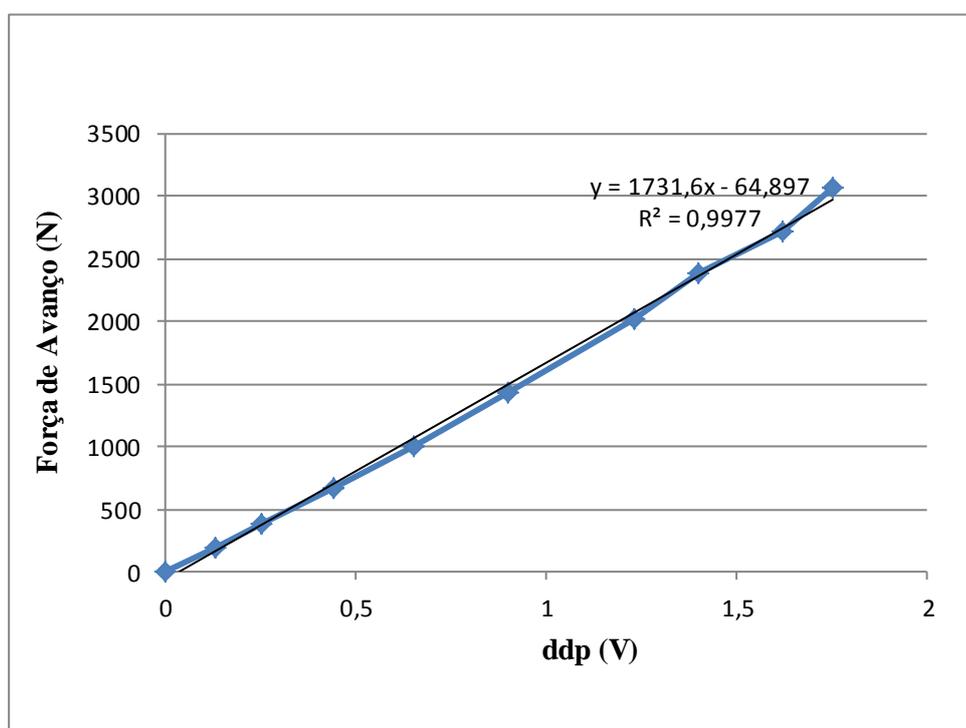
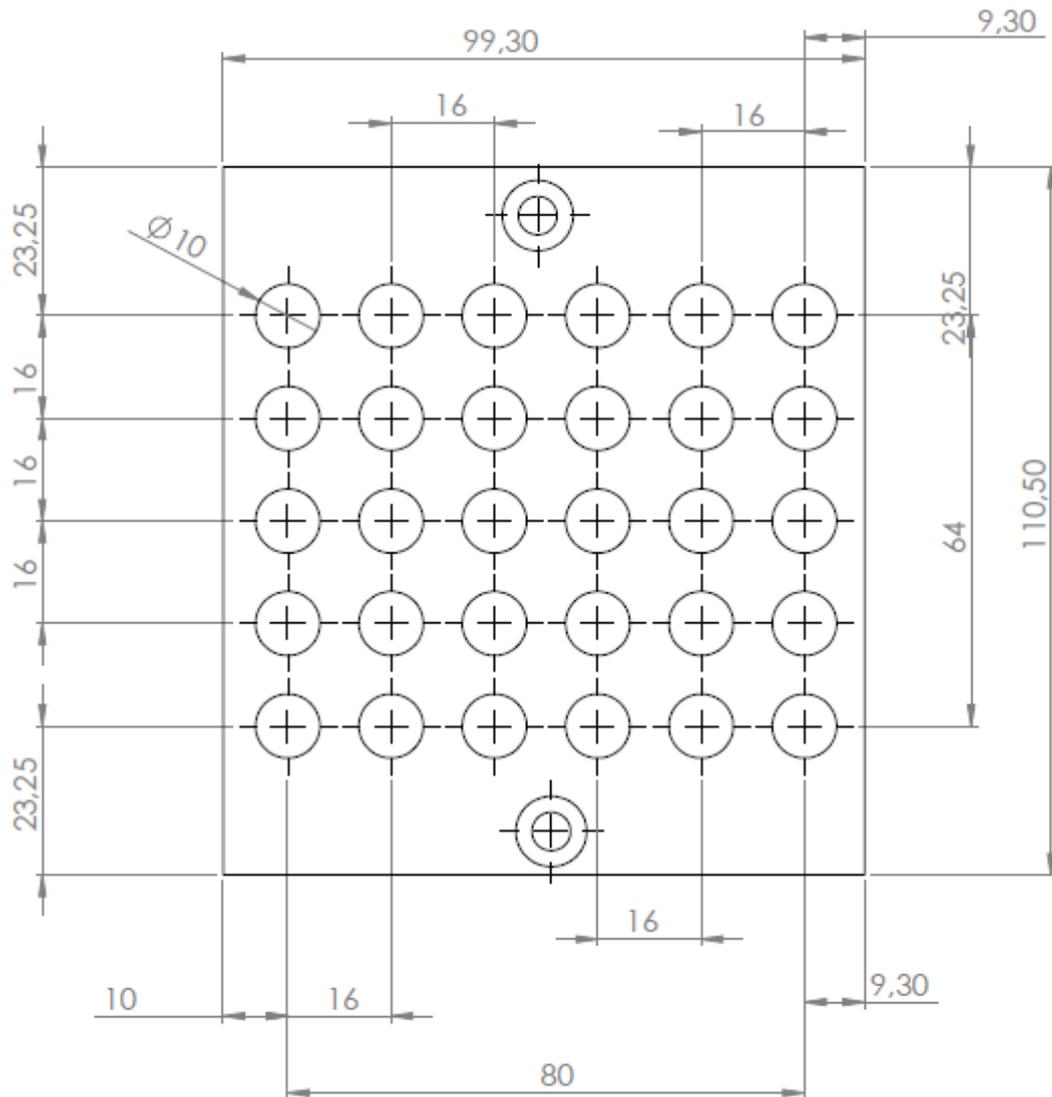


FIGURA B.1 - Força de Avanço (N) x ddp (V)

APÊNDICE C – Desenho do corpo de prova utilizado para a programação no CNC

ESCALA 1 : 1

APÊNDICE D – Dureza dos corpos de prova utilizados no ensaio na furação e no tribômetro

Região	Dureza dos CP (corpos de prova) utilizado na furação (HV)		
	Medidas - CP 1	Medidas - CP 2	Medidas - CP 3
1	147	147	143
2	143	156	147
3	147	147	138
4	156	156	138
5	152	143	138
Média	149	149,80	140,80
Desvio Padrão	5,05	5,89	4,09

Região	Dureza dos CP (corpos de prova) utilizado no tribômetro (HV)		
	Medidas - CP 1	Medidas - CP 2	Medidas - CP 3
1	176	162	176
2	181	162	176
3	176	166	166
4	181	162	176
5	166	156	162
Média	176	161,60	171,20
Desvio Padrão	6,12	3,58	6,72

APÊNDICE E – Variação das massas dos pinos utilizados no tribômetro

Pinos	Variação das massas dos pinos	
	Velocidades	Massas [g]
Pino sem Revestimento	40 m/min	0,0001
	55 m/min	0,0002
	70 m/min	0,0004
Pino revestido com Dióxido de silício	40 m/min	0,0005
	55 m/min	0,0006
	70 m/min	0,0008
Pino revestido com Nitreto de titânio	40 m/min	0,0002
	55 m/min	0,0004
	70 m/min	0,0006

APÊNDICE F – Resultado das medições da força de avanço [N]

Furo	Velocidade de corte [m/min]	Avanço [mm/rev]	Força de Avanço [N] - Ferramenta sem revestimento	Força de Avanço [N] - Ferramenta revestida com SiO ₂	Força de Avanço [N] - Ferramenta revestida com TiN
1	40	0,05	127,657	191,380	298,739
2	40	0,15	324,020	421,683	560,211
3	40	0,25	1030,230	1003,500	1026,011
4 (réplica)	40	0,05	374,929	281,420	454,583
5 (réplica)	40	0,15	636,401	489,220	690,081
6 (réplica)	40	0,25	1060,000	974,000	814,756
7	55	0,05	207,484	205,059	350,687
8	55	0,15	366,098	492,678	445,925
9	55	0,25	1080,100	1046,790	1069,301
10 (réplica)	55	0,05	432,765	419,950	442,462
11 (réplica)	55	0,15	503,068	541,160	471,899
12 (réplica)	55	0,25	1095,000	953,284	820,000
13	70	0,05	277,787	227,743	333,371
14	70	0,15	506,530	535,968	460,930
15	70	0,25	1206,097	939,000	1060,300
16 (réplica)	70	0,05	368,003	388,782	444,193
17 (réplica)	70	0,15	636,400	558,480	475,000
18 (réplica)	70	0,25	1320,120	820,000	1040,100

APÊNDICE G – Resultado das medições do R_a e R_z [µm]

Furo	Velocidade de corte [m/min]	Avanço [mm/rev]	Rugosidade média [Ra] - Ferramenta sem revestimento	Rugosidade média [Ra] - Ferramenta revestida com SiO ₂	Rugosidade média [Ra] - Ferramenta revestida com TiN
1	40	0,05	6,5	6,7	4,7
2	40	0,15	7,1	6,8	6,1
3	40	0,25	9,1	7,7	7,0
4 (réplica)	40	0,05	7,5	5,7	5,0
5 (réplica)	40	0,15	8,4	7,6	5,6
6 (réplica)	40	0,25	9,1	7,2	7,2
7	55	0,05	7,6	6,1	5,1
8	55	0,15	6,1	6,9	5,9
9	55	0,25	6,9	6,7	6,7
10 (réplica)	55	0,05	8,1	6,3	5,8
11 (réplica)	55	0,15	7,4	6,7	5,1
12 (réplica)	55	0,25	9,0	7,8	7,3
13	70	0,05	6,7	6,6	6,4
14	70	0,15	8,2	7,2	6,5
15	70	0,25	7,3	7,0	6,6
16 (réplica)	70	0,05	6,4	6,0	5,3
17 (réplica)	70	0,15	6,1	6,1	5,2
18 (réplica)	70	0,25	8,3	7,5	6,0

Furo	Velocidade de corte [m/min]	Avanço [mm/rev]	Altura máxima do perfil [Rz] - Ferramenta sem revestimento	Altura máxima do perfil [Rz] - Ferramenta revestida com SiO ₂	Altura máxima do perfil [Rz] - Ferramenta revestida com TiN
1	40	0,05	38,8	38,5	29,3
2	40	0,15	47,3	44,0	38,5
3	40	0,25	54,3	46,0	36,5
4 (réplica)	40	0,05	47,0	34,0	32,3
5 (réplica)	40	0,15	54,0	47,8	34,3
6 (réplica)	40	0,25	54,3	42,5	42,0
7	55	0,05	42,8	37,3	32,3
8	55	0,15	40,5	37,3	35,8
9	55	0,25	41,3	39,0	36,3
10 (réplica)	55	0,05	49,8	38,0	30,8
11 (réplica)	55	0,15	45,8	42,3	41,5
12 (réplica)	55	0,25	53,8	44,3	39,3
13	70	0,05	43,3	39,7	31,3
14	70	0,15	32,0	48,8	45,7
15	70	0,25	35,3	42,3	38,3
16 (réplica)	70	0,05	33,5	37,5	51,0
17 (réplica)	70	0,15	29,5	42,3	37,8
18 (réplica)	70	0,25	40,3	50,3	43,5

APÊNDICE H – Resultado das medições do diâmetro [mm]

Furo	Velocidade de corte [m/min]	Avanço [mm/rev]	Diâmetro médio [mm] - Ferramenta sem revestimento	Diâmetro médio [mm] - Ferramenta revestida com SiO ₂	Diâmetro médio [mm] - Ferramenta revestida com TiN
1	40	0,05	10,131	10,108	10,054
2	40	0,15	10,101	10,093	10,040
3	40	0,25	10,164	10,125	10,065
4 (réplica)	40	0,05	10,234	10,159	10,080
5 (réplica)	40	0,15	10,127	10,127	10,091
6 (réplica)	40	0,25	10,129	10,095	10,061
7	55	0,05	10,084	10,103	10,057
8	55	0,15	10,099	10,081	10,032
9	55	0,25	10,106	10,118	10,048
10 (réplica)	55	0,05	10,192	10,136	10,060
11 (réplica)	55	0,15	10,108	10,151	10,042
12 (réplica)	55	0,25	10,063	10,113	10,081
13	70	0,05	10,163	10,210	10,062
14	70	0,15	10,149	10,079	10,049
15	70	0,25	10,112	10,088	10,038
16 (réplica)	70	0,05	10,169	10,126	10,162
17 (réplica)	70	0,15	10,157	10,051	10,045
18 (réplica)	70	0,25	10,141	10,109	10,065

APÊNDICE I – Resultado das medições do erro de circularidade médio

Furo	Velocidade de corte [m/min]	Avanço [mm/rev]	Erro de circularidade médio [mm] - Ferramenta sem revestimento	Erro de circularidade médio [mm] - Ferramenta revestida com SiO ₂	Erro de circularidade médio [mm] - Ferramenta revestida com TiN
1	40	0,05	0,047	0,035	0,044
2	40	0,15	0,029	0,020	0,024
3	40	0,25	0,033	0,025	0,023
4 (réplica)	40	0,05	0,060	0,051	0,053
5 (réplica)	40	0,15	0,051	0,045	0,040
6 (réplica)	40	0,25	0,034	0,020	0,045
7	55	0,05	0,065	0,064	0,041
8	55	0,15	0,025	0,017	0,029
9	55	0,25	0,062	0,035	0,015
10 (réplica)	55	0,05	0,074	0,039	0,036
11 (réplica)	55	0,15	0,056	0,045	0,034
12 (réplica)	55	0,25	0,026	0,025	0,048
13	70	0,05	0,035	0,029	0,044
14	70	0,15	0,033	0,014	0,034
15	70	0,25	0,018	0,017	0,016
16 (réplica)	70	0,05	0,030	0,023	0,042
17 (réplica)	70	0,15	0,059	0,029	0,015
18 (réplica)	70	0,25	0,055	0,033	0,045

APÊNDICE J – Comportamento do revestimento SiO₂ na broca helicoidal

Para auxiliar nos trabalhos futuros com ferramentas de corte revestidas por SiO₂, foi avaliado o comportamento desse revestimento na superfície da broca. Abaixo apresenta algumas observações verificadas por meio das imagens realizadas no MEV.

De acordo com as imagens, observam-se regiões na superfície da broca com formação de bolhas, sendo essas regiões apresentando uma maior concentração de Si e O, conforme mapeamento. Esse fato pode ser atribuído ao efeito de secagem do revestimento. Ao analisar os demais elementos químicos, observa-se que, onde apresenta o elemento carbono, o revestimento não foi depositado. O carbono apresenta propriedades hidrofóbicas (que é a propriedade física que um material possui de repelir certa massa ou quantidade de água), nesse caso, dificultando a adesão do revestimento.

É apresentando também as imagens com o mapeamento dos elementos Fe, Cr e V. Espera-se que essas imagens, auxiliem para uma melhor compreensão do comportamento do revestimento

em SiO_2 em ferramentas de corte e assim melhorar a sua aderência em substratos.

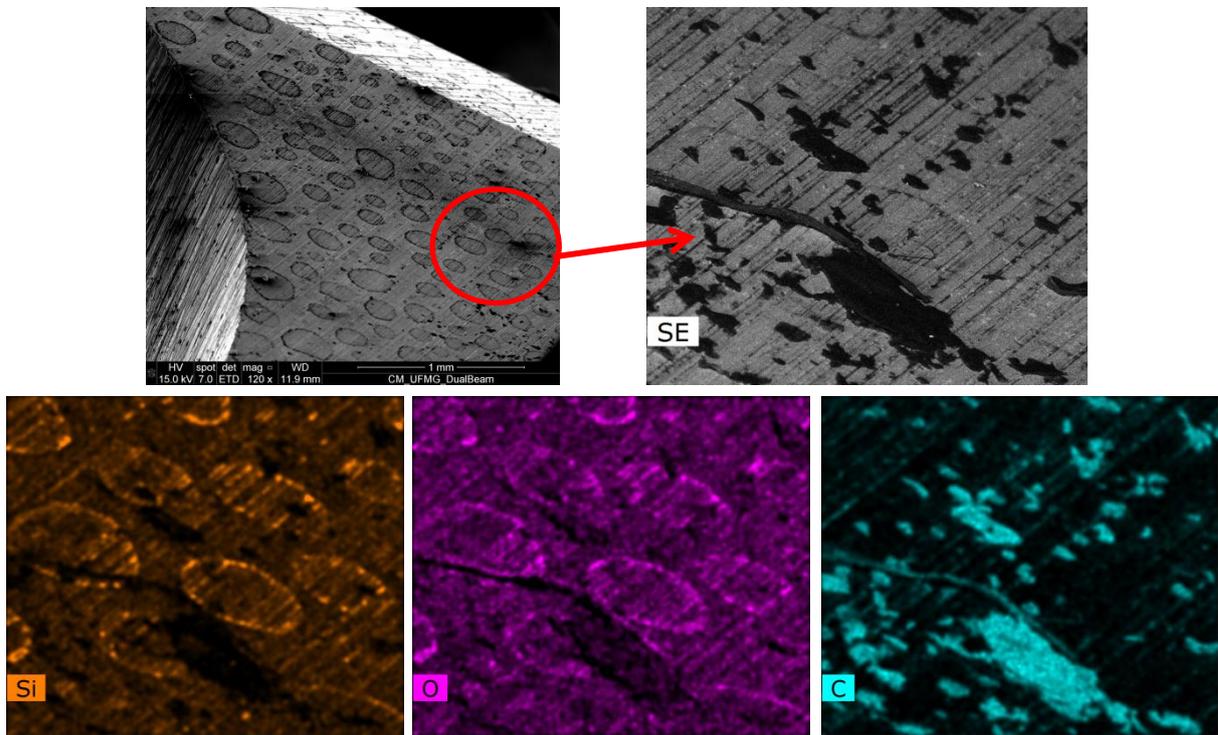


FIGURA J.1 - Imagens e mapeamento do revestimento de SiO_2 na broca helicoidal
 FONTE - Centro de Microscopia – UFMG (2017)

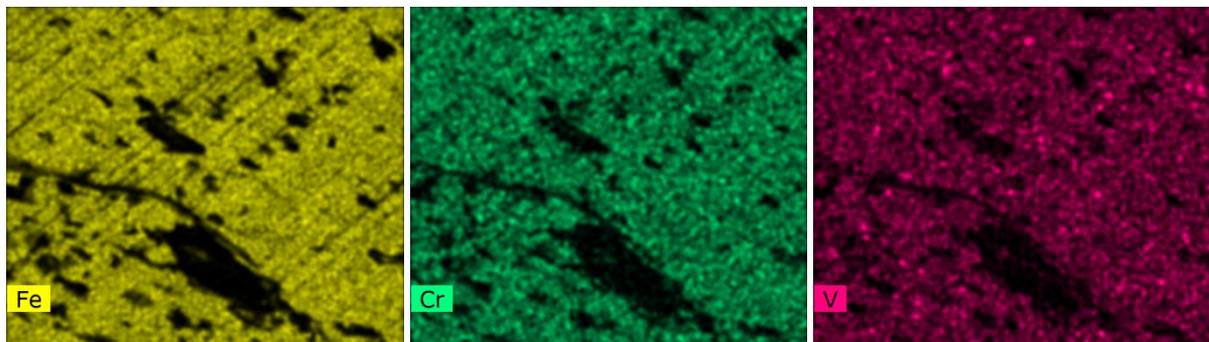


FIGURA J.2 - Mapeamento dos elementos Fe, Cr e V
 FONTE - Centro de Microscopia – UFMG (2017)