



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

ESTUDO DO DESEMPENHO DA NITRETAÇÃO EM BROCAS
DE HSS M2 COM REVESTIMENTO À BASE DE AICr NA
FURAÇÃO DE FERRO FUNDIDO CINZENTO

FERNANDA DE FREITAS

Belo Horizonte, 25 de Agosto de 2017

Fernanda de Freitas

**ESTUDO DO DESEMPENHO DA NITRETAÇÃO EM BROCAS
DE HSS M2 COM REVESTIMENTO À BASE DE AICr NA
FURAÇÃO DE FERRO FUNDIDO CINZENTO**

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. Marcelo Araújo Câmara

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2017

F866e

Freitas, Fernanda de.

Estudo do desempenho da nitretação em brocas de HSS M2 com revestimento à base de AlCr na furação de ferro fundido cinzento [manuscrito] / Fernanda de Freitas. – 2017.
xvii, 121 f., enc.: il.

Orientador: Marcelo Araújo Câmara.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos e Apêndices: f. 114-121.

Bibliografia: f. 107-113.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Processos de fabricação - Teses. 3. Nitretação - Teses. 4. Ferro fundido - Teses. I. Câmara, Marcelo Araújo. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



**"ESTUDO DO DESEMPENHO DA NITRETAÇÃO EM BROCAS DE
HSS M2 COM REVESTIMENTO À BASE DE AICr NA FURAÇÃO DE
FERRO FUNDIDO CINZENTO"**

FERNANDA DE FREITAS

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Processos de Fabricação**".

Dissertação aprovada no dia 25 de agosto de 2017.

Por:



Prof. Marcelo Araújo Câmara

Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG



Prof. Paulo César de Matos Rodrigues

Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG



Prof. Alexandre Mendes Abrão

Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

*Aos meus pais, Meire e Silvino, e às minhas
irmãs, Joselle e Talita.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por iluminar meu caminho.

A minha família, por todo apoio e incentivo não me deixando desanimar nos obstáculos encontrados ao longo desse período.

Ao professor Dr. Marcelo Araújo Câmara pela orientação, motivação e confiança.

Ao Paulo Vitor pela ajuda e compreensão durante estes “longos” anos.

À Oerlikon Balzers Revestimentos Metálicos LTDA pela colaboração na aplicação do revestimento das brocas.

À UFMG pela oportunidade e pela disponibilidade dos equipamentos para a realização deste trabalho.

À PUC MINAS por ceder os laboratórios e, em especial, aos técnicos de laboratório Thais, Marceliny e Edilene pela ajuda constante.

À Natália e ao Anderson pela amizade, força, ajuda e motivação.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, apoiaram e contribuíram para a realização deste trabalho.

“Quando penso que cheguei ao meu limite descobro que tenho forças para ir além.”

(Ayrton Senna)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE GRÁFICOS	x
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE QUADROS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS DE COMPOSTOS QUÍMICOS	xv
NOMENCLATURAS	xvi
RESUMO	xvii
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Objetivos.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Processo de furação	20
2.1.1 Brocas helicoidais e suas características	21
2.2 Parâmetros de corte	23
2.3 Esforços durante a furação	23
2.4 Materiais para ferramentas de corte.....	26
2.4.1 Aço rápido	28
2.5 Revestimentos.....	29
2.5.1 Métodos de aplicação de revestimentos	30
2.5.2 Revestimento à base de AlCr	31
2.6 Nitretação.....	33
2.7 Desgaste e mecanismos de desgaste de ferramentas de corte	37
2.7.1 Formas de desgaste em brocas helicoidais	38
2.7.2 Mecanismos de desgaste.....	39
2.8 Ferro fundido	40
2.8.1 Ferro fundido cinzento	41
2.9 Desvios geométricos na operação de furação	42
2.10 Estudos tribológicos	45
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	47
3.1 Materiais e métodos.....	47

3.2 Medição da microdureza da amostra com revestimento à base de AlCr e da amostra com tratamento duplex	51
3.3 Realização dos ensaios tribológicos	52
3.4 Realização dos ensaios de furação.....	52
3.5 Medição da rugosidade, diâmetro médio e erro de circularidade dos furos	55
3.6 Análise de MEV e EDS	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1 Resultados de microdureza.....	56
4.2 Resultados tribológicos	58
4.2.1 Coeficiente de atrito.....	58
4.2.2 Análise dos pinos.....	62
4.2.3 Análise das pistas	68
4.3 Torque.....	70
4.4 Qualidade dos furos usinados	75
4.4.1 Rugosidade – R_a	75
4.4.2 Diâmetro médio dos furos	79
4.4.3 Erro de circularidade	81
4.5 Desgaste das ferramentas de corte.....	82
5 CONCLUSÃO.....	103
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	105
ABSTRACT	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
ANEXO A	114
APÊNDICE A	115
APÊNDICE B.....	116
APÊNDICE C.....	117
APÊNDICE D	120

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: Distribuição da velocidade de corte.....	21
FIGURA 2.2: Partes básicas constituintes de uma broca helicoidal	22
FIGURA 2.3: Força de avanço média (F_z) em função da variação do avanço (f) com aplicação de fluido de corte por (a) jorro e (b) MQF	25
FIGURA 2.4: Torque médio (M_z) em função da variação do avanço (f) com aplicação de fluido de corte por (a) jorro e (b) MQF.....	25
FIGURA 2.5: Principais classes de materiais para ferramentas de corte	27
FIGURA 2.6: Perfil de microdureza das amostras de aço rápido M2 convencional nitretadas a 400°C, 450°C e 500°C, em atmosferas (a) 0,8N ₂ +0,2H ₂ , (b) 0,2N ₂ +0,8H ₂ e (c) N ₂	35
FIGURA 2.7: Comparação do desempenho em usinagem entre ferramentas tratadas com tratamento simples e (a) Duplex TiN; (b) Novo Duplex TiN.....	36
FIGURA 2.8: Tempos de vida de brocas HSS M2 padrão (sem tratamento), nitretada, revestida apenas com revestimento de TiAlN e tratamento duplex.....	37
FIGURA 2.9: Formas de desgaste em brocas helicoidais	38
FIGURA 2.10: Medições do torque nos ensaios de furação	42
FIGURA 2.11: (a) Circularidade dos furos usinados versus desgaste de flanco e (b) Rugosidade dos furos usinados versus desgaste de flanco.....	44
FIGURA 2.12: Coeficiente de atrito dos revestimentos de AlCrN e TiAlN em função da distância deslizada em teste de esfera-sobre-disco.....	46
FIGURA 3.1: Corpo de prova para o ensaio tribológico.....	47
FIGURA 3.2: Croqui do pino para o ensaio tribológico	48
FIGURA 3.3: (a) Seção transversal da amostra para análise; (b) amostra embutida em baquelite	48
FIGURA 3.4: Discos de ferro fundido cinzento FC 300 para ensaio de furação	49
FIGURA 3.5: Corpo de prova de ferro fundido cinzento FC 300 para ensaio de furação sobre o dinamômetro.....	49
FIGURA 3.6: Exemplo de broca com revestimento à base de AlCr.....	50
FIGURA 3.7: Microdurômetro e impressões realizadas	51
FIGURA 3.8: Tribômetro Microtest, modelo SMT-A/0100 – n° série B01100-19	52
FIGURA 3.9: Centro de usinagem – montagem do experimento	53

FIGURA 3.10: Sistema de aquisição de dados	54
FIGURA 4.1: Resultados do teste t pareado dos valores de microdureza.....	57
FIGURA 4.2: Imagem e análise EDS do pino sem revestimento - $V_c = 40$ m/min.....	63
FIGURA 4.3: Imagem e análise EDS do pino revestido à base de AlCr - $V_c = 40$ m/min	63
FIGURA 4.4: Imagem e análise EDS do pino com tratamento duplex - $V_c = 40$ m/min.....	63
FIGURA 4.5: Imagem e análise EDS do pino sem revestimento - $V_c = 50$ m/min.....	64
FIGURA 4.6: Imagem e análise EDS do pino revestido à base de AlCr - $V_c = 50$ m/min	64
FIGURA 4.7: Imagem e análise EDS do pino com tratamento duplex - $V_c = 50$ m/min.....	65
FIGURA 4.8: Imagem e análise EDS do pino sem revestimento - $V_c = 60$ m/min.....	65
FIGURA 4.9: Imagem e análise EDS do pino revestido à base de AlCr - $V_c = 60$ m/min	66
FIGURA 4.10: Imagem e análise EDS do pino com tratamento duplex - $V_c = 60$ m/min.....	66
FIGURA 4.11: Imagem e análise EDS do pino sem revestimento - $V_c = 70$ m/min.....	67
FIGURA 4.12: Imagem e análise EDS do pino revestido à base de AlCr - $V_c = 70$ m/min ...	67
FIGURA 4.13: Imagem e análise EDS do pino com tratamento duplex - $V_c = 70$ m/min.....	67
FIGURA 4.14: Evolução do torque (M_z) ao longo dos testes nas diferentes condições de corte estudadas: (a) $V_c = 40$ m/min, (b) $V_c = 50$ m/min, (c) $V_c = 60$ m/min e (d) $V_c = 70$ m/min .	71
FIGURA 4.15: (a) Resíduos versus valor ajustado e (b) Resíduos versus Ordem.....	74
FIGURA 4.16: Região de captura das imagens e análise EDS	88

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 4.1: Perfil de microdureza das amostras com revestimento e com tratamento duplex	56
GRÁFICO 4.2: Boxplot de diferenças (a) com outlier (b) sem outlier	58
GRÁFICO 4.3: Coeficiente de atrito para a velocidade de deslizamento de 40 m/min.....	59
GRÁFICO 4.4: Coeficiente de atrito para a velocidade de deslizamento de 50 m/min.....	59
GRÁFICO 4.5: Coeficiente de atrito para a velocidade de deslizamento de 60 m/min.....	60
GRÁFICO 4.6: Coeficiente de atrito para a velocidade de deslizamento de 70 m/min.....	60
GRÁFICO 4.7: Coeficiente de atrito médio nas velocidades de deslizamento consideradas ..	62
GRÁFICO 4.8: Efeitos principais para o torque	73
GRÁFICO 4.9: Gráfico de probabilidade normal para o torque	74
GRÁFICO 4.10: Rugosidade dos furos usinados com $V_c = 40$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev	75
GRÁFICO 4.11: Rugosidade dos furos usinados com $V_c = 50$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev	76
GRÁFICO 4.12: Rugosidade dos furos usinados com $V_c = 60$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev	77
GRÁFICO 4.13: Rugosidade dos furos usinados com $V_c = 70$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev	78
GRÁFICO 4.14: Variação da rugosidade R_a em função da velocidade de corte e da ferramenta	79
GRÁFICO 4.15: Diâmetro médio dos furos usinados com $V_c = 40$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev	79
GRÁFICO 4.16: Diâmetro médio dos furos usinados com $V_c = 50$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev	80
GRÁFICO 4.17: Diâmetro médio dos furos usinados com $V_c = 60$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev	80
GRÁFICO 4.18: Diâmetro médio dos furos usinados com $V_c = 70$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev	81
GRÁFICO 4.19: Variação do erro de circularidade em função da velocidade de corte e da ferramenta.....	82

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Composição química e características dos aços rápidos.....	29
TABELA 2.2 – Resumo dos testes de furação acelerada para Ti-N e Cr-Al-N	31
TABELA 2.3 – Resumo dos resultados de rugosidade superficial, desgaste e microdureza dos revestimentos	32
TABELA 2.4 – Classes de ferro fundido cinzento segundo a ASTM.....	41
TABELA 3.1 – Composição química (%) do ferro fundido cinzento FC 300.....	47
TABELA 3.2 – Composição química (%) do aço rápido AISI M2	49
TABELA 3.3 – Composição química (%) do aço rápido AISI M2	50
TABELA 3.4 – Propriedades do Balinit Helica	51
TABELA 3.5 – Parâmetros de entrada utilizados na furação.....	53
TABELA 4.1 – Quantidade de furos usinados	70
TABELA 4.2 – ANOVA para o torque (velocidade de corte e ferramenta).....	72

LISTA DE QUADROS

QUADRO 4.1 - Imagem e largura das pistas dos testes tribológicos.....	69
QUADRO 4.2 – Imagens do desgaste gradativo das brocas $V_c = 40$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev	83
QUADRO 4.3 – Imagens do desgaste gradativo das brocas na $V_c = 50$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev	84
QUADRO 4.4 – Imagens do desgaste gradativo das brocas na $V_c = 60$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev	85
QUADRO 4.5 – Imagens do desgaste gradativo das brocas na $V_c = 70$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev	86
QUADRO 4.6 – Imagens das regiões desgastadas e análise EDS da broca sem revestimento na $V_c = 40$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev	89
QUADRO 4.7 – Imagens das regiões desgastadas e análise EDS da broca apenas com revestimento na $V_c = 40$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev.....	90
QUADRO 4.8 – Imagens das regiões desgastadas e análise EDS da broca com tratamento duplex na $V_c = 40$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev	91
QUADRO 4.9 – Imagens das regiões desgastadas e análise EDS da broca sem revestimento na $V_c = 50$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev	93
QUADRO 4.10 – Imagens das regiões desgastadas e análise EDS da broca apenas com revestimento na $V_c = 50$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev.....	94
QUADRO 4.11 – Imagens das regiões desgastadas e análise EDS da broca com tratamento duplex na $V_c = 50$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev	95
QUADRO 4.12 – Imagens das regiões desgastadas e análise EDS da broca sem revestimento na $V_c = 60$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev	97
QUADRO 4.13 – Imagens das regiões desgastadas e análise EDS da broca apenas com revestimento na $V_c = 60$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev.....	98
QUADRO 4.14 – Imagens das regiões desgastadas e análise EDS da broca com tratamento duplex na $V_c = 60$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev	99
QUADRO 4.15 – Imagens das regiões desgastadas e análise EDS da broca apenas com revestimento na $V_c = 70$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev.....	101

QUADRO 4.16 – Imagens das regiões desgastadas e análise EDS da broca com tratamento duplex na $V_c = 70$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev	102
--	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
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>)
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CVD	Deposição química de vapor (<i>Chemical Vapor Deposition</i>)
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva
HSS	Aço rápido (<i>High Speed Steel</i>)
HV	Dureza Vickers
ISO	Organização Internacional de Padronização (<i>International Organization for Standardization</i>)
MEV	Microscopia eletrônica de varredura (<i>Scanning Electron Microscopy</i>)
MQF	Mínima quantidade de fluido (<i>minimum quantify of fluid</i>)
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PUC	Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
PVD	Deposição física de vapor (<i>Physical Vapor Deposition</i>)
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

LISTA DE ABREVIATURAS DE COMPOSTOS QUÍMICOS

AlCr	Alumínio-Cromo
AlCrN	Nitreto de alumínio cromo
CrN	Nitreto de cromo
MnS	Sulfeto de manganês
Si ₃ N ₄	Nitreto de silício
TiN	Nitreto de titânio
TiAlN	Nitreto de alumínio titânio
TiSiN	Nitreto de titânio silício
WC-Co	Carboneto de tungstênio ao cobalto

NOMENCLATURAS

Letras Latinas

a_p	Profundidade ou largura de usinagem	[mm]
E	Módulo de elasticidade	[GPa]
f	Avanço	[mm/rev]
F_z	Força de avanço	[N]
H	Dureza plástica	[GPa]
M_z	Torque	[N x m]
R_a	Desvio aritmético médio	[μm]
R_z	Altura máxima do perfil	[μm]
v_c	Velocidade de corte	[m/min]
v_f	Velocidade de avanço	[mm/min]

Letras Gregas

ϵ_r	Ângulo de ponta	[graus]
--------------	-----------------	---------

RESUMO

A busca por novos materiais e processos para ferramentas de corte que as tornem mais produtivas é constantemente impulsionada pelo surgimento de novas ligas com dureza e propriedades mecânicas mais altas e pelas indústrias que visam produtividade e ganho na qualidade dos seus produtos e serviços para satisfazer o cliente final. O desgaste, como sendo um dos problemas industriais mais frequentes, pode ser minimizado e controlado, não podendo, no entanto, ser eliminado. Sendo assim, é importante o estudo desses novos materiais, processos e mecanismos de desgaste visando o desempenho que estes podem ter em serviço, com estudos em laboratório. Neste intuito, estudou-se o efeito do tratamento duplex (nitretação a baixa pressão seguida de revestimento à base de AlCr produzido pelo processo PVD) em brocas de aço rápido AISI M2 na operação de furação do ferro fundido cinzento FC 300. Os resultados foram comparados aos encontrados nos testes realizados com brocas apenas revestidas e com brocas sem revestimento. O tratamento duplex aumentou em 7% a microdureza do substrato comparada a uma superfície apenas com revestimento. Nos testes pino-sobre-disco (pino de aço rápido AISI M2 e disco de ferro fundido cinzento FC 300), os maiores valores de coeficiente de atrito foram verificados para as ferramentas sem revestimento, apresentando desgaste abrasivo na superfície dos pinos e nos discos. O melhor desempenho foi conseguido com o pino com tratamento duplex com velocidade de deslizamento de 70 m/min. Com relação aos testes de furação, verificou-se, por meio da ANOVA, que a velocidade de corte e a interação de segunda ordem (velocidade de corte e ferramenta) não afetaram os valores de torque. Quanto à rugosidade, em geral, o aumento da velocidade de corte contribuiu para um aumento da rugosidade superficial dos furos. O tratamento duplex assegurou às ferramentas de corte melhor desempenho, em termos de menor variação dimensional do diâmetro do furo e, o aumento da velocidade de corte resultou em um aumento do erro de circularidade, mesmo com a utilização de revestimento. Em geral, o desgaste das ferramentas ocorreu de forma mais acentuada próximo à ponta de corte e, em segundo plano, na aresta transversal. Verificou-se ainda que o tratamento duplex influenciou no tipo de desgaste, considerando os mesmos parâmetros de corte.

Palavras-chave: furação; nitretação; revestimento à base de AlCr; aço rápido AISI M2; ferro fundido cinzento

1 INTRODUÇÃO

A evolução contínua dos processos de produção tem aumentado a severidade das condições de contato nas ferramentas de corte. Conseqüentemente, novos desafios são constantemente requeridos às indústrias de superfícies na busca por melhorias dos processos.

O desenvolvimento da engenharia de superfície tem sido muito dinâmico ao longo dos anos. Graças aos estudos nesta área foram obtidos avanços em economia de energia, redução de atrito entre componentes de máquinas e equipamentos, redução de perdas por corrosão, fadiga e desgaste e aumento de confiabilidade e produtividade na fabricação de peças, devido ao aumento de vida útil e redução de falhas catastróficas em ferramentas de corte (REZENDE, 2010).

O desgaste e a falha de brocas de aço rápido (HSS) são de importância tecnológica e econômica significativas em operações de usinagem. Um ponta desgastada da broca afeta a qualidade do furo e, dependendo do tipo de desgaste ou avaria, pode levar à sua destruição e substituição. É importante ressaltar que cada troca de ferramenta está associada à diminuição da produtividade e aumento dos custos de produção (NICKEL *et al.*, 2000).

Dois grandes avanços em relação à utilização de aços rápidos em usinagem foram conseguidos nos anos 1970 e merecem destaque: ferramentas revestidas e produzidas pela metalurgia do pó (MACHADO *et al.*, 2011). O desenvolvimento de processos alternativos de metalurgia do pó, empregados na fabricação de componentes de aços rápidos, foi estimulado pela exigência de fabricantes de ferramentas e usuários das mesmas por melhorias microestruturais e, conseqüentemente, propriedades mecânicas superiores desse material (SANDEROW *apud* BOEHS *et al.*, 2000).

Além disso, filmes finos têm sido usados com sucesso para o incremento das propriedades tribológicas em termos de redução do coeficiente de atrito e aumento da resistência ao desgaste. Estes filmes podem ser aplicados por meio de diversas técnicas de deposição entre as quais se destacam a deposição química de vapor (CVD – *Chemical Vapor Deposition*) e a deposição física de vapor (PVD – *Physical Vapor Deposition*). Contudo, o filme protetor pode falhar prematuramente se o substrato se deformar plasticamente frente a um nível muito alto de carregamento (BELL *et al.*, 1998).

Uma das formas de se atender à severidade crescente das condições de contato é por meio da adequada seleção de dois ou mais processos de engenharia de superfícies – artifício

conhecido como tratamento híbrido ou duplex (KWIETNIEWSKI *et al.*, 2005; MATTHEWS e LEYLAND, 1995). O tratamento duplex produz uma superfície com um revestimento fino, duro, com elevada resistência térmica, química e ao desgaste, suportado por uma camada espessa e endurecida pelas reações de nitretação (FRANCO JR. *et al.*, 2009) localizada acima do substrato.

As propriedades obtidas pela pré-nitretação, seguida do revestimento PVD, são resultado da divisão de funções entre substrato/camada nitretada/revestimento e da combinação das melhores propriedades de cada componente no conjunto (YAKUSHIJI *et al.* e HÖCK *et al.* *apud* KWIETNIEWSKI *et al.*, 2005).

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o efeito do tratamento duplex (nitretação a baixa pressão seguida de revestimento à base de AlCr produzido pelo processo PVD) aplicado em brocas de aço rápido AISI M2 na operação de furação do ferro fundido cinzento FC 300 e comparar os resultados obtidos com os encontrados nos testes realizados com brocas apenas com revestimento à base de AlCr e com brocas sem revestimento (entenda-se brocas sem revestimento aquelas que não foram revestidas e nem submetidas ao processo termoquímico da nitretação).

Os objetivos específicos são:

- fazer um mapa de microdureza dos pinos com revestimento e com tratamento duplex;
- examinar o comportamento dos pares tribológicos (pino sem revestimento, pino apenas com revestimento à base de AlCr e pino com tratamento duplex deslizando sobre ferro fundido cinzento) por meio do coeficiente de atrito e da análise dos pinos e das pistas desgastadas;
- comparar o desempenho das brocas sem revestimento versus brocas apenas com revestimento à base de AlCr versus brocas com tratamento duplex por meio dos testes de furação, variando a velocidade de corte e compreender a influência desses parâmetros sobre o torque na furação e sobre a rugosidade, variação do diâmetro médio e erro de circularidade dos furos usinados);
- analisar os tipos de desgaste das brocas em estudo por meio de imagens de MEV e análise EDS.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos que contemplam a fundamentação teórica básica referente ao trabalho proposto. As seções 2.1, 2.2 e 2.3 descrevem, sucintamente, o processo de furação, os parâmetros de usinagem e os esforços empregados durante este processo. A seção 2.4 discorre sobre os materiais para ferramentas de corte. A seção 2.5 contempla os revestimentos empregados nas ferramentas de corte com foco no revestimento à base de AlCr. Já a seção 2.6 descreve o processo de nitretação. A seção 2.7 aborda o desgaste e mecanismos de desgastes em ferramentas de corte. A seção 2.8 refere-se ao ferro fundido com foco no ferro fundido cinzento. A seção 2.9 destina-se aos desvios geométricos no processo de furação. Por fim, a seção 2.10 apresenta uma abordagem da tribologia no processo usinagem.

2.1 Processo de furação

A norma brasileira ABNT NBR 6175 (2015): *Usinagem – Processos mecânicos*, define furação como sendo:

Processo mecânico de usinagem destinado à 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 desloca segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo principal de rotação da máquina. (ABNT NBR 6175, 2015, p. 3).

De acordo com Klocke (2011), as peculiaridades da furação incluem: uma velocidade de corte que tende a zero em direção ao centro do furo, dificuldade de remoção do cavaco, distribuição de calor desfavorável no ponto de ação, desgaste acentuado nas quinas com canto vivo e as guias apresentam desgaste em função do atrito com a parede do furo. A FIG. 2.1 ilustra a distribuição da velocidade de corte ao longo da aresta de corte. A aresta transversal tem velocidade de corte zero.

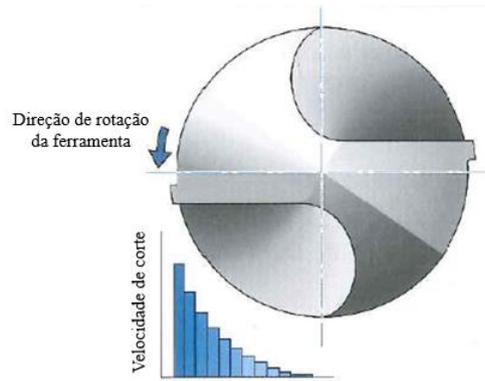


FIGURA 2.1: Distribuição da velocidade de corte

FONTE: Mitsubishi: Tooling Technology – Level 2, p. 177

Há uma grande variedade de operações de furação usadas na indústria moderna. Embora todas essas operações utilizem os mesmos movimentos cinemáticos e definição de ferramenta de furação genérica, os projetos de ferramentas particulares, regimes de usinagem e muitos outros recursos das ferramentas de furação envolvidos são específicos da operação (ASTAKHOV, 2014).

A escolha do tipo de broca a ser adotada bem como do seu material está intimamente ligada às características da operação de furação. Astakhov (2014) destaca que o ótimo desempenho da broca na furação é alcançado quando a combinação da velocidade de corte, avanço, geometria da ferramenta, grau do material da ferramenta é selecionada adequadamente dependendo do material de trabalho (sua dureza, composição e estrutura), das condições de usinagem e dos requisitos de qualidade dos furos.

2.1.1 Brocas helicoidais e suas características

Os conceitos básicos e a nomenclatura das diversas partes das brocas helicoidais são definidas pela norma ABNT NBR ISO 5419 (2009): *Brocas Helicoidais – Termos, definições e tipos*.

De acordo com Shaw (2005), uma broca helicoidal é uma ferramenta de corte complexa usada para produzir furos. Em geral, existem duas arestas cortantes que produzem cavacos. Ambas as arestas de corte de uma broca operam com ângulo de saída, ângulo de inclinação e ângulo de folga variáveis ao longo da aresta de corte. Os canais de uma broca tem um papel importante em levar os cavacos para fora do furo e o ângulo da hélice é importante nesta conexão. As principais partes constituintes de uma broca helicoidal estão ilustradas na FIG. 2.2.

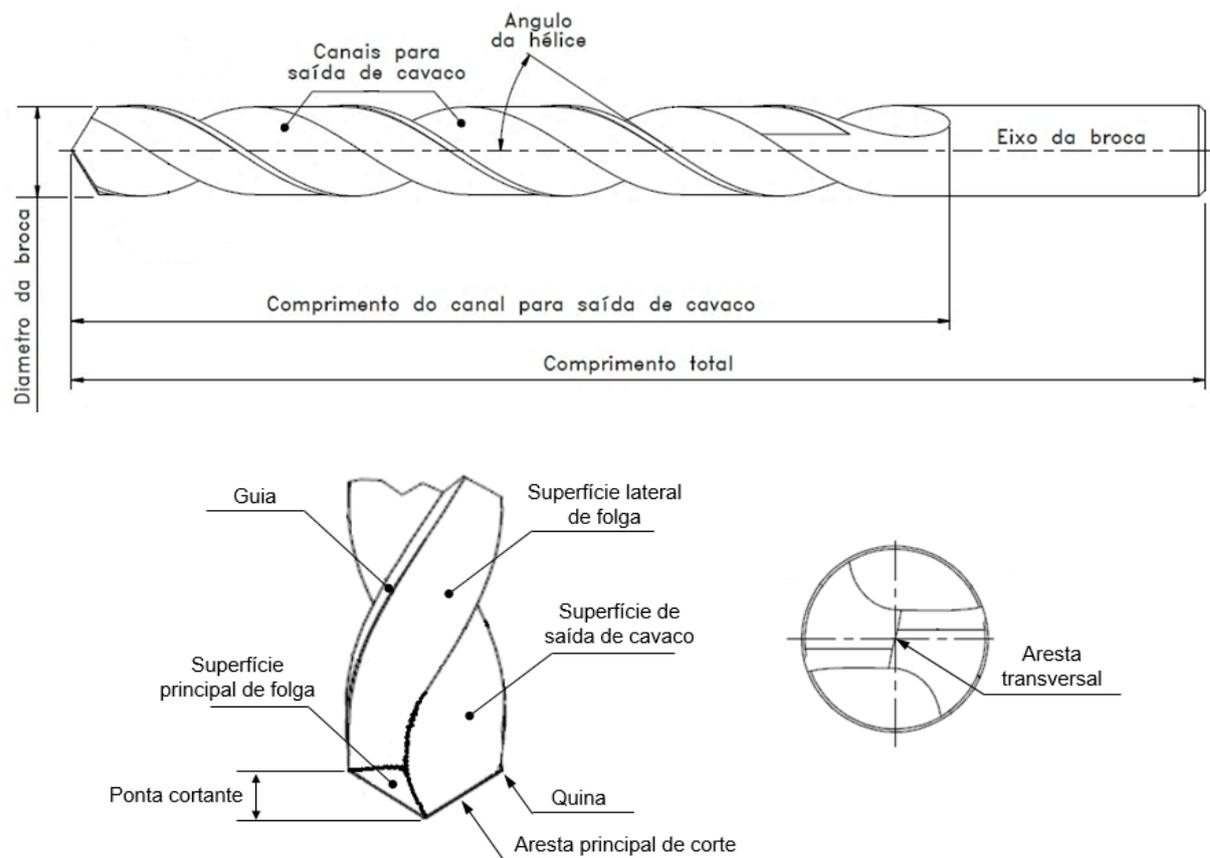


FIGURA 2.2: Partes básicas constituintes de uma broca helicoidal

FONTE: ABNT NBR ISO 5419, 2009

O núcleo é a porção central da broca, localizada em todo o comprimento entre os canais para saída de cavaco (ABNT NBR ISO 5419, 2009). Se a espessura do núcleo for aumentada, a rigidez da broca também aumentará. No entanto, ao aumentar a espessura do núcleo, a área do canal para saída do cavaco se tornará mais estreita conduzindo a uma disposição ruim do cavaco. Além disso, ao aumentar a espessura do núcleo, o empuxo aumentará afetando todo o processo de furação. Brocas de aço rápido geralmente têm núcleo com espessura de 10 a 20% do diâmetro da broca (MITSUBISHI TOOLING TECHNOLOGY, LEVEL 2).

Também cabe ressaltar que o ângulo de ponta (ϵ_r) é o ângulo formado entre os planos de corte principal e secundário, medido no plano de referência (FERRARESI, 1970). Porém, é comum encontrar fabricantes de brocas e diversas literaturas definindo o ângulo de ponta como sendo o ângulo formado entre as duas arestas principais de corte.

2.2 Parâmetros de corte

Os parâmetros de usinagem são elementos fundamentais para se obter o desempenho ideal da ferramenta, custos competitivos e excelente qualidade da peça. Destacam-se no processo de furação (FERRARESI, 1970):

- **velocidade de corte (v_c):** é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido do corte, dada pela EQ. (2.1), onde d é o diâmetro da ferramenta em mm e n é o número de rotações por minuto (rpm).

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

- **velocidade de avanço (v_f):** é a velocidade instantânea da ferramenta segundo a direção e sentido de avanço, expressa pela EQ. (2.2), onde f é o avanço em mm/revolução e n é o número de rotações por minuto (rpm).

$$v_f = f \times n [mm/min] \quad (2.2)$$

- **profundidade ou largura de usinagem (a_p):** é a profundidade ou largura de penetração da ferramenta em relação à peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. Na furação corresponde à metade do diâmetro da broca.

Astakhov (2014) destaca que selecionar adequadamente a velocidade de corte e o avanço para uma data operação de furação é fundamental para reduzir o desgaste e a quebra da broca, bem como para alcançar uma elevada eficiência no processo em termos de custo por furo usinado.

2.3 Esforços durante a furação

O sistema de força resultante na furação pode ser representado pela força axial e pelo torque. Variam em amplitudes bastante amplas, dependendo do tipo de material da peça de trabalho, seu estado metalúrgico e propriedades mecânicas, geometria e material da

ferramenta, regime de usinagem entre outras particularidades do processo de usinagem (ASTAKHOV, 2014).

Diniz *et al.* (2013) relatam que durante o corte uma broca helicoidal é basicamente submetida a esforços de torção (devido à rotação da broca) e a esforços de compressão devido ao avanço da broca.

De acordo com Astakhov (2014), a velocidade de corte tem pouca influência sobre a força de corte e sobre o torque. Os fatores como geometria da broca e o regime de furação podem ser variados para obter um ótimo desempenho do processo. Dessa forma, o único fator a ser considerado é o avanço.

Trent e Wright (2000) afirmam que as forças aumentam em proporção direta ao aumento do avanço e da profundidade de corte.

Da Silva (2010) utilizou brocas helicoidais de aço rápido M42, revestidas com multicamadas de TiN-TiAlN e diâmetro de 10 mm para analisar a influência do ciclo de furação (contínuo e intermitente) na usinabilidade do ferro fundido cinzento GH190. A força de avanço (F_z) e o torque (M_z) foram monitorados durante a usinagem dos furos. Os experimentos foram divididos em duas etapas e os resultados foram analisados estatisticamente. Na etapa 1 foram testadas quatro situações de paradas (0, 1, 2 e 3), duas velocidades de corte (45 e 65 m/min), dois avanços (0,20 e 0,30 mm/rev) e três sistemas lubri-refrigerantes (seco, jorro e MQF). Para todas as combinações testadas, o aumento do avanço para 0,30 mm/rev aumentou F_z , quando comparado ao avanço de 0,20 mm/rev. Já na etapa 2 foram testadas duas situações de confronto entre os recuos da broca (3mm x total e 1 mm x 3 mm) e as velocidades de corte, os avanços e os sistemas lubri-refrigerantes foram os mesmos utilizados na etapa 1. Para todas as combinações testadas o aumento da velocidade de corte e do avanço causaram o aumento de F_z e M_z . De acordo com o autor, o aumento do avanço, além de aumentar a velocidade de penetração da broca, promove o aumento das dimensões dos cavacos e das áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário, contribuindo para aumentar os esforços de corte F_z e M_z . Já a maior velocidade de corte de 65 m/min deveria gerar mais calor que a de 45 m/min, amolecendo o material, o que tenderia a reduzir os esforços de corte. Porém isso não ocorreu. Pode ser que quanto maior a velocidade de corte, maior é a dificuldade de penetração do fluido na região de corte, e o efeito menor lubrificação contribuiu para estes resultados.

Barbosa *et al.* (2009) compararam a usinabilidade do ferro fundido vermicular (classe FV 450) com o ferro fundido nodular perlítico (classe FE 70003) no processo de furação em relação aos critérios referentes à força de avanço (F_z) e torque (M_z), utilizando brocas de aço rápido revestidas com TiN. Os parâmetros de corte utilizados foram: velocidade de corte

de 25 e 35 m/min e avanço de 0,15 e 0,25 mm/rev. Furos cegos foram usinados com um comprimento de penetração de 20 mm. Também foram avaliados dois tipos de aplicações de fluido de corte: jorro e MQF. Os resultados mostraram que a força de avanço foi influenciada significativamente tanto pelo avanço quanto pelo tipo de aplicação de fluido (FIG. 2.3). Já o torque foi influenciado significativamente apenas pelo avanço (FIG. 2.4). O aumento tanto da força de avanço quanto do torque foi explicado pelo crescimento das áreas de cisalhamento primário e secundário ocasionado pelo aumento do avanço.

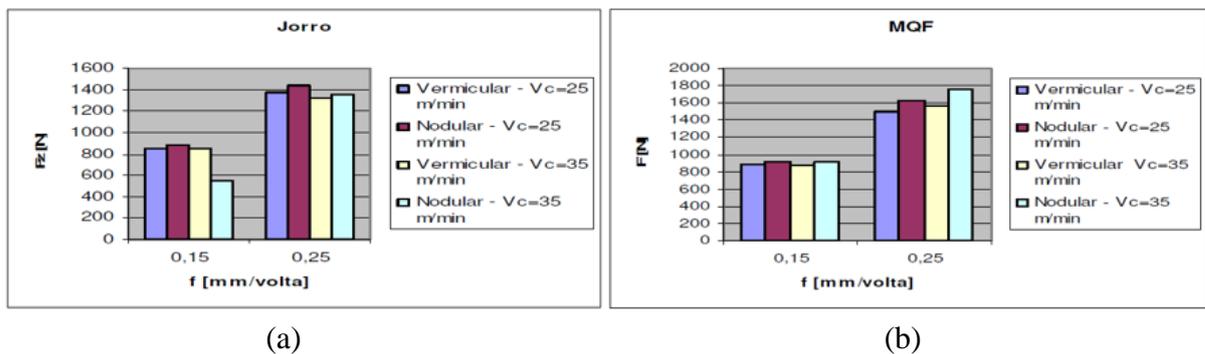


FIGURA 2.3: Força de avanço média (F_z) em função da variação do avanço (f) com aplicação de fluido de corte por (a) jorro e (b) MQF

FONTE: Barbosa et al., 2009, p.5

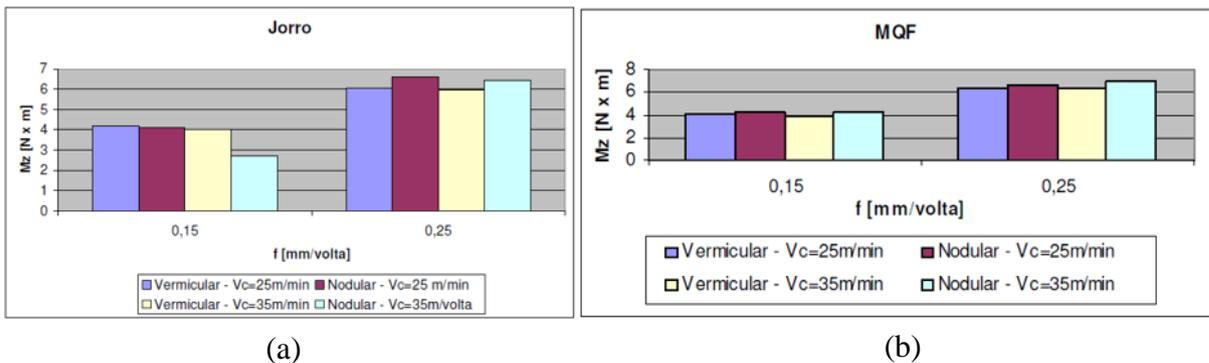


FIGURA 2.4: Torque médio (M_z) em função da variação do avanço (f) com aplicação de fluido de corte por (a) jorro e (b) MQF

FONTE: Barbosa *et al.*, 2009, p.6

Utilizando brocas helicoidais com corpo de aço e insertos de metal duro intercambiáveis, Da Silva (2016) avaliou a usinabilidade do ferro fundido cinzento FC-300 com refino de grafita e adição de molibdênio, para aplicação em cabeçotes de motores, comparando-o com materiais já utilizados para este fim: FC-300 apenas ligado ao molibdênio, ferro fundido

cinzento FC-250 e o ferro fundido vermicular classe 450. As forças de avanço e o momento torçor foram monitorados e posteriormente analisados. Os resultados obtidos mostraram que quando se varia a velocidade de corte para os quatro materiais estudados, tanto a força de avanço quanto o torque mantiveram-se aproximadamente constantes, ou seja, a velocidade de corte não influenciou significativamente estes parâmetros na faixa testada. Entretanto, à medida que o avanço foi incrementado, houve uma leve tendência de aumento da componente F_z . O torque também aumentou com o avanço, porém de forma mais pronunciada. Os autores justificaram esses resultados por meio dos trabalhos de Barbosa *et al.* (2009) em que o incremento dessa variável (avanço) aumenta diretamente as áreas de cisalhamento primário e secundário, causando o aumento de F_z e M_z e dos trabalhos de De Souza, Mattes e Mognaga (2014) os quais destacam que quanto maior o valor do avanço, maior será a deformação plástica e encruamento do cavaco pela broca no fundo do furo. Assim, há uma maior resistência à penetração da broca devido ao efeito conjunto do esmagamento do material na aresta transversal de corte e do corte do material nas duas arestas principais.

2.4 Materiais para ferramentas de corte

De acordo com Klocke (2011), o desenvolvimento no setor de materiais de ferramentas de corte está longe de ser concluído e, dessa forma, é de grande importância que novos estudos sejam constantemente realizados visando melhorar os materiais das ferramentas de corte já estabelecidos bem como descobrir novos materiais para uso na fabricação de ferramentas de corte.

Klocke (2011) destaca que os materiais das ferramentas de corte devem ter as seguintes propriedades para fazer justiça às tensões colocadas sobre elas: dureza e resistência à compressão, resistência à flexão e tenacidade, resistência ao cisalhamento, força de coesão interna, resistência à temperaturas elevadas, resistência à oxidação, pequena propensão à difusão e adesão, resistência à abrasão e comportamento de desgaste reprodutível.

Entretanto, não existe um material de ferramenta de corte que reúna todas as propriedades necessárias. Um exemplo é a oposição física de dureza e tenacidade (normalmente alta dureza se associa a baixa tenacidade e vice-versa).

König e Klocke (2002) enfatizam que na operação de furação, as propriedades como resistência ao desgaste e a tenacidade são as principais características exigidas da ferramenta. Os motivos são devido ao mecanismo de desgaste predominante (abrasão) e os esforços (compressão, torção e flexão) submetidos à broca durante o corte.

O conhecimento básico de cada material de ferramenta de corte e seu desempenho é, portanto, importante para que a seleção seja feita de forma correta considerando cada aplicação. As considerações incluem o tipo e propriedades do material a ser usinado, o tipo de peça e forma, condições de usinagem e a necessidade de qualidade do furo. O custo por furo usinado (tamanho do lote de produção, programa anual, maquinário existente, prática de usinagem, etc.) também deve ser considerado na seleção do material da ferramenta apropriado (tecnicamente e economicamente) (ASTAKHOV, 2014).

As principais classes de materiais para ferramentas de corte existentes podem ser esquematizados conforme mostra a FIG. 2.5. Atualmente, em operações de furação, três tipos principais de material de ferramenta são utilizados: aço rápido, metal duro e diamante (ASTAKHOV, 2014). A ênfase será dada ao aço rápido, por ser objeto de estudo.

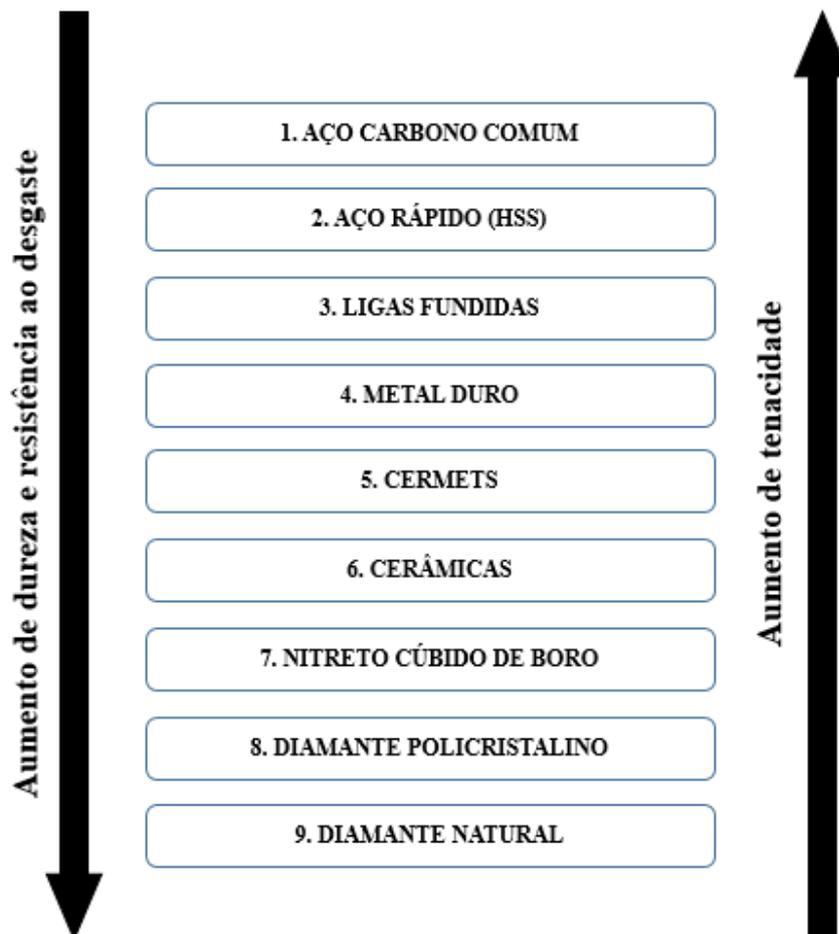


FIGURA 2.5: Principais classes de materiais para ferramentas de corte

FONTE: Adaptado de SHAW, 2005, p. 310

2.4.1 Aço rápido

Os aços rápidos são basicamente empregados na fabricação de ferramentas de corte. A característica principal desse material é sua capacidade de operar em velocidades e outras condições de corte que podem elevar a temperatura da aresta de corte da ferramenta a cerca de 550°C-600°C, durante a operação de usinagem. Essa característica é chamada de dureza a quente e constitui a mais importante propriedade dos aços rápidos (CHIAVERINI, 2008). Outras características importantes são resistência ao desgaste e abrasão, estabilidade dimensional e boa tenacidade (SILVA e MEI, 2010).

De acordo com Klocke (2011) os efeitos dos elementos de liga presentes nos aços rápidos são, resumidamente, os seguintes:

- **tungstênio:** forma carbonetos; aumenta a dureza a quente, retenção de dureza e resistência ao desgaste.
- **molibdênio:** forma carbonetos; melhora o endurecimento e tenacidade, aumenta a dureza a quente, retenção de dureza e resistência ao desgaste, pode substituir o tungstênio (tem metade da sua densidade).
- **vanádio:** aumenta a resistência ao desgaste.
- **cobalto:** desloca o limite de sensibilidade ao sobreaquecimento para temperaturas mais elevadas, tornando possível atingir temperaturas de dureza mais elevadas. A maioria dos carbonetos é dissolvida e a dureza a quente aumenta.
- **cromo:** melhora a dureza, participa na formação de carbonetos.
- **carbono:** a fonte de dureza no material base. Aumenta a resistência ao desgaste porque forma carbonetos.

Outros elementos de liga têm sido adicionados aos aços rápidos para conferir características especiais: o enxofre é adicionado em alguns casos para melhorar a usinabilidade; o nióbio, por sua vez, tem sido empregado com a aparente vantagem de diminuir a tendência à decarbonetação; o titânio é adicionado para substituir todo ou parte do vanádio; o boro pode substituir o carbono nos aços rápidos e, aparentemente contribui para manter a dureza a quente (CHIAVERINI, 2008 e FERRARESI, 1970).

Há duas categorias de aços rápidos: a categoria T que compreende os tipos predominantemente ao tungstênio e a categoria M que compreende os tipos predominantemente

ao molibdênio. Essas duas categorias são subdivididas em duas subcategorias contendo ambas cobalto. A TAB. 2.1 apresenta a classificação dos principais aços rápidos, bem como suas composições e características.

Silva e Mei (2010) destacam que nas últimas décadas, os aços da série M vêm apresentando aceitação bastante superior aos da série T. Em particular, o aço M2 (contendo molibdênio e tungstênio) tem se caracterizado como um dos mais populares.

Segundo Klocke (2011) as propriedades de desgaste dos aços rápidos podem ser melhoradas por meio de tratamentos de superfície como, por exemplo, a nitretação (enriquecimento da camada superficial com nitrogênio por tratamento termoquímico), recozimento (formação de uma fina camada de óxido de ferro na superfície da ferramenta), a aplicação de revestimentos, entre outros.

TABELA 2.1 – Composição química e características dos aços rápidos

Tipo de Aço	Classificação SAE	Composição química (%)								Tenacidade	Resistência ao desgaste	Dureza a quente
		C	Mn	Si	Cr	V	W	Mo	Co			
ao W	T1	0,70	0,30	0,25	4,00	1,00	18,00	-	-	Baixa	Média	Muito Boa
	T2	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	18,00	-	-			
	T3	1,00	0,30	0,25	4,00	3,00	18,00	-	-			
	T7	0,80	0,30	0,25	4,00	2,00	14,00	-	-			
	T9	1,20	0,30	0,25	4,00	4,00	18,00	-	-			
ao W-Co	T4	0,75	0,30	0,25	4,00	1,00	18,00	-	5,00	Baixa	Alta	Excelente
	T5	0,80	0,30	0,25	4,00	2,00	18,00	-	8,00			
	T6	0,80	0,30	0,25	4,00	1,50	20,00	-	12,00			
	T8	0,80	0,30	0,25	4,00	2,00	14,00	-	5,00			
ao Mo	M1	0,80	0,30	0,25	4,00	1,00	1,50	8,00	-	Baixa	Média	Muito Boa
	M2	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	6,00	5,00	-			
	M3	1,00	0,30	0,25	4,00	2,75	6,00	5,00	-			
	M4	1,30	0,30	0,25	4,00	4,00	5,50	4,50	-			
	M10	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	-	8,00	-			
ao Mo-Co	M6	0,80	0,30	0,25	4,00	1,50	4,00	5,00	13,00	Baixa	Alta	Excelente
	M30	0,85	0,30	0,20	4,00	1,25	2,00	8,00	5,00			
	M34	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	2,00	8,00	8,00			
	M35	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	6,00	5,00	5,00			
	M36	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	6,00	5,00	8,00			

FONTE: Adaptado de Diniz *et al.* (2013)

2.5 Revestimentos

A deposição de revestimentos é um procedimento adotado para alterar as propriedades de uma superfície. Em ferramentas de corte aumentam consideravelmente a vida útil das ferramentas.

Astakhov (2014) destaca que os revestimentos proporcionam aumento da dureza superficial e maior resistência ao desgaste; redução do coeficiente de atrito o que facilita o deslizamento do cavaco, reduz as forças de corte, evita a aderência nas superfícies de contato, reduz o calor gerado devido ao deslizamento do cavaco; redução de parte da energia térmica que flui para a ferramenta; melhoria de qualidade da superfície das peças acabadas.

O uso de revestimentos de superfície abre a possibilidade de desenvolver um material no qual as propriedades específicas estão localizadas onde elas são mais necessárias. O material do substrato pode ser concebido para a resistência e tenacidade, enquanto o revestimento é responsável pela resistência ao desgaste, cargas térmicas e corrosão (HOLMBERG e MATTHEWS, 2009).

2.5.1 Métodos de aplicação de revestimentos

A aplicação de revestimentos em ferramentas de corte pode ser feito quimicamente e fisicamente. Em geral, os principais métodos são: deposição química de vapor (CVD – *Chemical Vapor Deposition*) e deposição física de vapor (PVD – *Physical Vapor Deposition*).

A deposição química de vapor (CVD) envolve a aplicação de material sólido a partir de um vapor por reação química ocorrendo sobre ou próximo de um substrato aquecido para formar uma camada fina (SHAW, 2005). Devido às altas temperaturas requeridas para o processo CVD, em geral temperaturas próximas de 1000°C, este processo apresenta aplicação limitada (ASTAKHOV, 2014).

De acordo com Shaw (2005), revestimentos CVD são aplicados individualmente, em combinação ou em camadas múltiplas para aumentar a tenacidade. Podem apresentar espessura entre 5 a 20 µm. O processo CVD é o principal método empregado em WC-Co e substratos cerâmicos.

Já a deposição física de vapor (PVD) é um processo de deposição atomística em que o material é vaporizado a partir de uma fonte sólida ou líquida na forma de átomos ou moléculas, transportados sob a forma de um vapor através de vácuo ou gases de baixa pressão (ou plasma) ao substrato onde se condensa (MATTOX, 1998).

O processo PVD é normalmente utilizado para revestimentos de aços rápidos, devido às temperaturas mais baixas requeridas pelo substrato, em torno de 400 a 600°C (TRENT e WRIGHT, 2000).

2.5.2 Revestimento à base de AlCr

Há um número crescente de aplicações de revestimentos duros em engenharia onde tanto alta resistência à oxidação e dureza a quente são requeridos. Uma maneira de resolver este problema é a utilização de revestimentos duros de cerâmica, que são uma combinação de mais de um metal de modo que o desempenho do revestimento irá beneficiar da combinação das propriedades mecânicas dos metais presentes (SPAIN *et al.*, 2005).

Spain *et al.* (2005) realizaram um estudo comparativo na caracterização do revestimento de CrAlN em relação aos revestimentos de TiN, TiAlN e CrN. Tais revestimentos foram depositados por meio da deposição física de vapor de feixe de elétrons assistida por plasma em brocas de HSS de 6,35 mm. Os resultados do teste de furação acelerada utilizando fluido de corte mostraram que o comprimento furado do revestimento de CrAlN chega a três vezes quando comparado ao TiN e TiAlN antes da falha catastrófica da broca, conforme mostra a TAB. 2.2. Além disso, nos testes de desgaste de pino sobre disco, utilizando esfera de WC-Co de 3 mm de diâmetro e discos de aço rápido AISI M2 revestidos com CrAlN, TiN, TiAlN e CrN, o coeficiente de desgaste do CrAlN foi superior no sentido em que a pista de desgaste obtida foi tão pequena que está além de 10 nm de resolução do perfilômetro óptico (TAB. 2.3). De acordo com os autores, o aumento no tempo de vida da ferramenta observado com o revestimento de CrAlN pode ser explicado em termos simples: desgasta mais lentamente do que outros revestimentos. Sua maior habilidade para acompanhar a deformação elástica e plástica do substrato antes da falha iniciar pode ser também outro fator influenciando seu desempenho. A elevada resistência ao desgaste e resistência à oxidação do CrAlN e adicionado um meio lubrificante contribuem para um aumento de vida de 2 a 3 vezes comparando ao TiN e ao TiAlN.

TABELA 2.2 – Resumo dos testes de furação acelerada para Ti-N e Cr-Al-N

Revestimento	Espessura (μm)	Número de furos
Sem revestimento ^a	-	1 \pm 1
Ti – N ^a	2,5 \pm 0,1	167 \pm 96
Ti – Al – N ^a	1,3 \pm 0,1	150 \pm 26
Ti – N ^b	2,5 \pm 0,1	115 \pm 21
Cr – Al – N ^b	1,4 \pm 0,1	325 \pm 120

^a Velocidade de 2500 rpm e avanço de 0,15, com fluido de corte emulsivo óleo/água

^b Velocidade de 2000 rpm e avanço de 0,15, com fluido de corte emulsivo óleo/água

FONTE: SPAIN *et al.*, 2005, p. 1510

TABELA 2.3 – Resumo dos resultados de rugosidade superficial, desgaste e microdureza dos revestimentos

Revestimento	R_a (nm)	Coef. de Desgaste k ($m^3 N^{-1} m^{-1}$)	E (módulo de elasticidade) $E/(1-\nu^2)$ (GPa)	Dureza H (GPa)	H/E
Ti-N	17 ± 3	$6,68 \times 10^{-15}$	454 ± 7	$36,3 \pm 0,1$	0,08
Cr-N	12 ± 4	$2,40 \times 10^{-16}$	337 ± 6	34 ± 1	0,10
Ti-Al-N	$16,9 \pm 0,8$	$8,80 \times 10^{-15}$	430 ± 10	$52,8 \pm 0,2$	0,12
Cr-Al-N	13 ± 3	Imensurável	455 ± 9	$55,8 \pm 0,2$	0,12

FONTE: Adaptado de SPAIN *et al.*, 2005, p. 1509

A razão H/E (dureza / módulo de elasticidade), que basicamente descreve a tensão elástica para a falha de materiais, tem encontrado grande aplicabilidade em sistemas revestidos. Revestimentos possuindo uma elevada razão H/E geralmente exibe baixas taxas de desgaste (LEYLAND e MATTHEWS, 2000 *apud* SPAIN *et al.*, 2005).

Paiva Jr. *et al.* (2013) compararam o desempenho dos revestimentos TiAlN/TiN, AlCrN e TiSiN/AlCrN depositados em brocas de metal duro (classe K10) na furação de ferro fundido vermicular da classe CGI 450. Os testes de furação foram conduzidos adotando duas velocidades de corte: 80 e 150 m/min e avanço de 0,1 mm/rot. Para cada condição de ensaio foram determinados o desgaste de flanco da ferramenta, a força de avanço e a circularidade e a rugosidade dos furos usinados. Os resultados encontrados indicaram que o desgaste de flanco (como uma função do comprimento de usinagem) sob velocidade de 80 m/min para os sistemas de revestimentos AlCrN e TiSiN/AlCrN, ocorreu em três estágios: o primeiro caracteriza-se pela elevada taxa de desgaste de flanco devido ao fato de uma carga muito alta ser aplicada numa pequena área da aresta de corte; no segundo estágio a área de contato entre a broca e a contraparte torna-se maior e, dessa forma, o fluxo plástico não ocorre e o sistema de revestimento é continuamente removido; já no terceiro estágio o revestimento é completamente removido da aresta de corte da ferramenta ficando o substrato da ferramenta exposto a altas temperaturas causadas pelo processo de corte, o que leva a uma rápida degradação da superfície. Para o TiAlN/TiN, a taxa de desgaste é elevada, mesmo a 80 m/min, devido à sua estabilidade térmica mais baixa, a qual favorece a remoção de partículas, provavelmente devido à oxidação e à abrasão. Na velocidade de corte de 150 m/min, os três sistemas de revestimento mostraram uma taxa de desgaste de flanco muito elevada em comparação aos desempenhos dos revestimentos observados a 80 m/min. Em se tratando da força de avanço em função do desgaste de flanco, a 80 m/min o TiAlN/TiN apresentou uma força de avanço maior do que os

revestimentos à base de Cr. Para a velocidade de corte de 150 m/min, a força de avanço aumentou com o desgaste de flanco para todos os três sistemas de revestimento.

De acordo com os artigos de Spain *et al.* (2005) e Paiva Jr. *et al.* (2013), os revestimentos à base de AlCr aplicados tanto em brocas de aço rápido quanto em brocas de metal duro apresentaram desempenhos satisfatórios quando comparados aos revestimentos de TiAlN e TiN, independentemente do material usinado. Segundo a Balzers (catálogo Balzers – Balinit Helica) estes revestimentos apresentam maior resistência ao desgaste e estabilidade na aresta de corte, mesmo em condições máximas de esforço.

2.6 Nitretação

Tratamentos termoquímicos são processos empregados aos aços com o objetivo principal de aumentar a dureza e a resistência ao desgaste da superfície, ao mesmo tempo em que o núcleo do material se mantém dúctil e tenaz (CHIAVERINI, 2008).

Dentre os processos de endurecimento superficial, encontra-se a nitretação, cuja definição é descrita a seguir:

Nitretação é o processo de introdução superficial de nitrogênio no aço, até uma certa profundidade, pelo aquecimento deste, a uma temperatura determinada, para formar uma camada dura de nitretos (CHIAVERINI, 2008, p. 144; SILVA e MEI, 2010, p.171).

De acordo com Silva e Mei (2010), as principais razões para se utilizar a nitretação são: obter altíssima dureza superficial e alta resistência ao desgaste, melhorar a resistência à fadiga e à corrosão (exceto para aços inoxidáveis) e obter superfície resistente ao amaciamento por aquecimento até temperaturas próximas à de nitretação. Ichimura *et al.* (2003) relatam que a dureza da zona de difusão aumenta proporcionalmente com a concentração de nitrogênio e que a capacidade de suporte de carga de um revestimento duplex é aumentada pelo processo em relação a um revestimento similar convencional, isto é, sem tratamento de nitretação.

As principais características do processo são: temperaturas de tratamento inferior à crítica (compreendida na faixa de 500° a 575°C), em consequência as peças são menos suscetíveis a empenamento ou distorção e não há necessidade de qualquer tratamento térmico posterior à nitretação (CHIAVERINI, 2008). Os inconvenientes desse processo são: longos tempos de tratamento e pequena profundidade de penetração (< 0,8 mm), (BALZERS, 2007).

A nitretação pode ser realizada por meio dos seguintes processos: nitretação a gás, nitretação líquida ou em banho de sal e nitretação iônica ou a plasma (CHIAVERINI, 2008; SILVA e MEI, 2010).

A nitretação a baixa pressão ou vácuo é um processo utilizado pela Balzers (2007). Consiste na pré-oxidação do metal ou liga (aço), seguida de redução do ferro com amônia e posterior dissociação da amônia. A baixa pressão do gás durante o processo de nitretação permite o controle da microestrutura da camada nitretada. Apresenta como vantagens alta dureza superficial, alta resistência ao desgaste, alta resistência à fadiga devido às tensões de compressão na camada nitretada, as propriedades metalúrgicas de metal são mantidas, apresenta baixa deformação, controle preciso da estrutura da camada, controle da espessura da camada, apresenta baixa distorção (BALZERS, 2007).

Estudando a influência da temperatura e da atmosfera do plasma na nitretação iônica do aço rápido M2 convencional e sinterizado, Wanke (2003) constatou que a microdureza na camada nitretada pode aumentar até 115% em relação ao substrato e a espessura da camada depende da temperatura de tratamento e da composição do gás de trabalho (N_2+H_2). A FIG. 2.6 detalha os resultados do perfil de microdureza obtidos para o aço rápido M2 convencional nas temperaturas e atmosferas estudadas.

Segundo o autor, a atmosfera de N_2 puro não favorece a formação de camadas de nitretos espessas e, portanto, não forma uma região superficial de alta dureza. Esse fenômeno pode estar ligado à hipótese da descarbonetação.

Além da análise comparativa da influência da temperatura e da atmosfera de nitretação na espessura, microdureza e no tipo das camadas formadas, Wanke (2013) realizou um estudo de teste de vida útil de ferramentas de aço rápido M2 convencional e constatou que, durante os testes, as ferramentas sofreram fratura da camada superficial o que pode estar relacionado à formação de uma camada de nitretos muito dura e ao mesmo tempo frágil, levando as ferramentas a falharem e, conseqüentemente, obtendo um tempo de vida menor que as ferramentas não nitretadas.

Embora os parâmetros de nitretação escolhidos por Wanke (2013) não tenham melhorado a vida útil das ferramentas, não se pode descartar o uso da nitretação como processo de tratamentos superficial de ferramentas de corte.

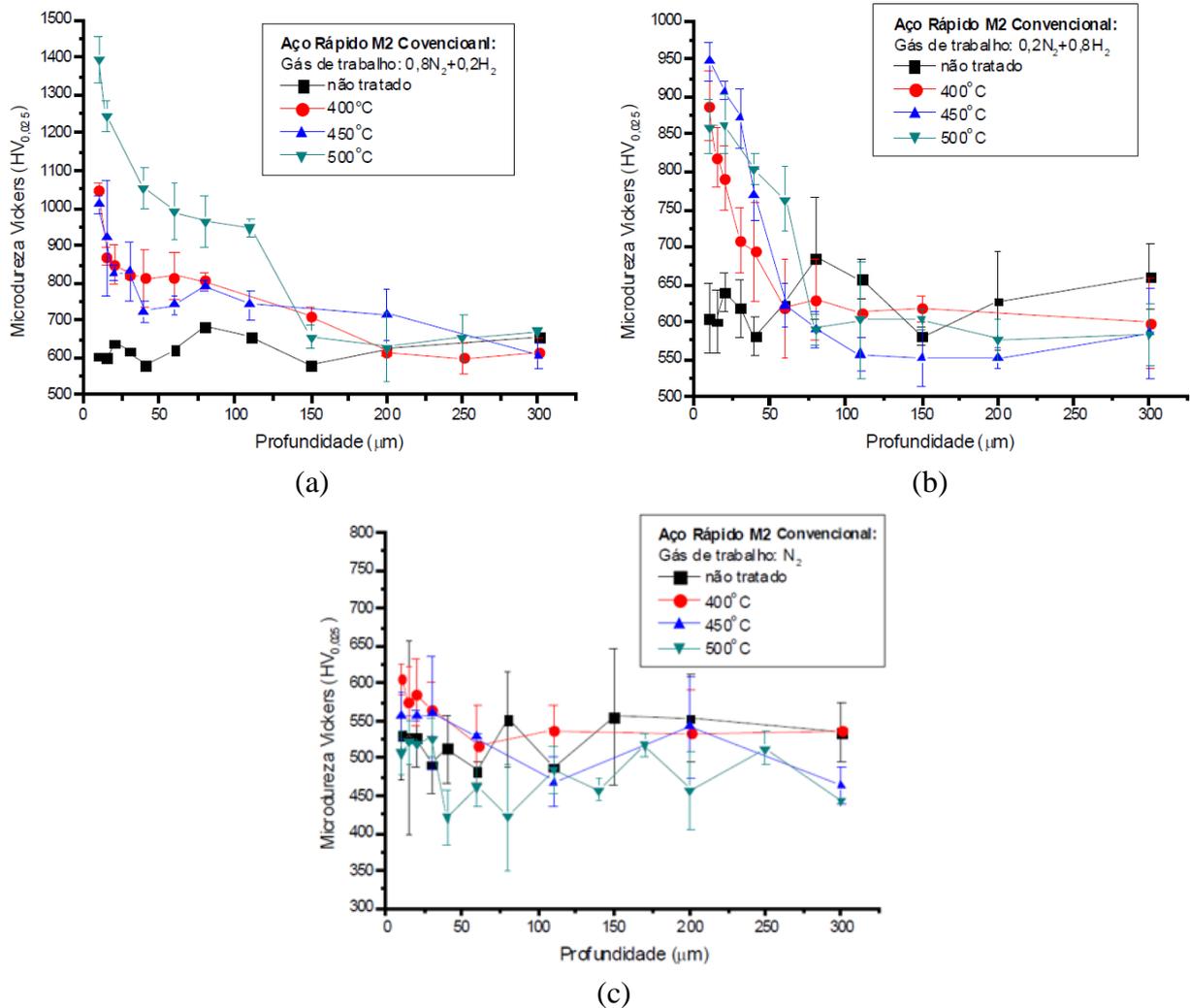


FIGURA 2.6: Perfil de microdureza das amostras de aço rápido M2 convencionais nitretadas a 400°C, 450°C e 500°C, em atmosferas (a) 0,8N₂+0,2H₂, (b) 0,2N₂+0,8H₂ e (c) N₂

FONTE: Wanke, 2003, p. 42, 47 e 51

De acordo com Kwietniewski *et al.* (2005), uma adequada seleção dos parâmetros de nitretação contribui para um melhor desempenho das ferramentas nos processos de usinagem. Eles utilizaram ferramentas de aço rápido AISI M2 nitretadas e revestidas na usinagem de barras laminadas de aço NBR 1045 a uma velocidade de corte de 65 m/min e avanço de 0,102 mm/volta, sem o uso de fluido de corte. Os parâmetros de nitretação a plasma foram cuidadosamente definidos a fim de evitar a formação da “camada branca” (camada de compostos) na superfície das ferramentas. Entretanto, os resultados encontrados não foram satisfatórios conforme mostra a FIG. 2.7 (a), isto é, a pré-nitretação do substrato não aumentou o desempenho do revestimento de TiN. Zona de difusão muito profunda, precipitação de carbonetos e nível de tensões na camada nitretada levaram a uma excessiva fragilização das arestas reduzindo a vida em serviço.

A análise do processo descrito anteriormente levou os autores a sugerirem um novo conjunto de parâmetros de nitretação (novo duplex TiN), os quais resultaram em um extraordinário incremento do desempenho de usinagem, conforme mostra a FIG. 2.7 (b).

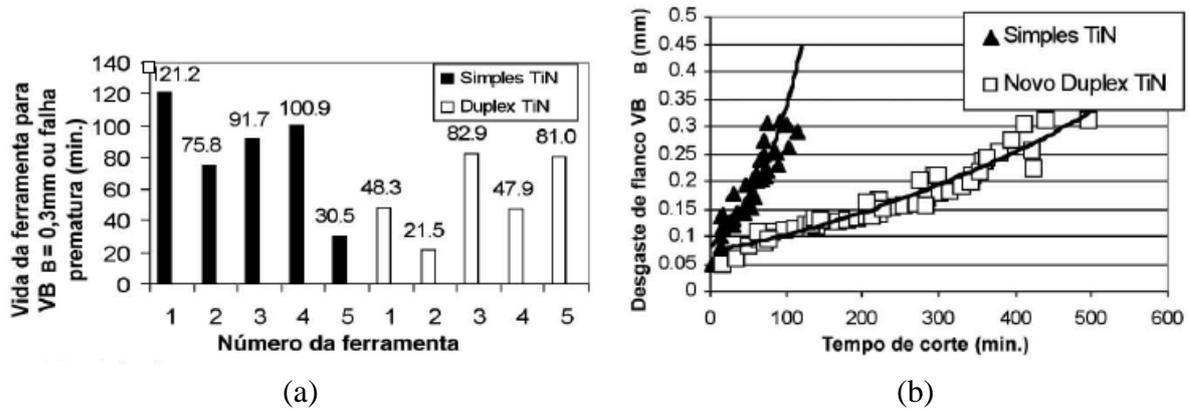


FIGURA 2.7: Comparação do desempenho em usinagem entre ferramentas tratadas com tratamento simples e (a) Duplex TiN; (b) Novo Duplex TiN

FONTE: Kwietniewski *et al.*, 2005, p. 34 e 36

Uma investigação dos efeitos dos parâmetros do processo de nitretação a plasma sobre as características de desgaste do aço ferramenta AISI M2 foi realizada por Pessin *et al.* (2000). Eles variaram a temperatura e a pressão do gás enquanto o tempo de tratamento foi mantido constante e chegaram à conclusão de que a nitretação a plasma pode ser utilizada com sucesso para melhorar a resistência ao desgaste do aço ferramenta AISI M2, desde que sejam aplicados os parâmetros de nitretação adequados.

Rousseau *et al.* (2015) estudaram a caracterização microestrutural e tribológica de um tratamento duplex – nitretação/revestimento de TiAlN PVD – aplicado a ferramentas de HSS M2. Foram realizados testes de furação utilizando brocas M2 de 6,35 mm de diâmetro sem tratamento, nitretadas, apenas revestidas com revestimento de TiAlN e tratamento duplex e corpo de prova aço ferramenta D2, com uma velocidade e corte de 35 m/min e avanço de 0,125 mm/rev e profundidade do furo cego de 2,5 vezes o diâmetro. Os resultados dos testes de furação mostraram que existem diferenças significativas na vida útil operacional (número de furos perfurados antes da falha) entre as brocas nitretadas, apenas revestidas de TiAlN PVD e tratamento duplex, conforme mostra a FIG. 2.8. Comparando os dois últimos tratamentos, a média do tempo de vida da ferramenta com tratamento duplex é mais do que o dobro quando comparada com a ferramenta apenas revestida de TiAlN. Análises de microscopia eletrônica de varredura (SEM) realizadas após os testes de furação até a falha revelaram extensa deformação

plástica e delaminação na seção transversal da broca apenas revestida de TiAlN, o que pode justificar o melhor desempenho das brocas com tratamento duplex.

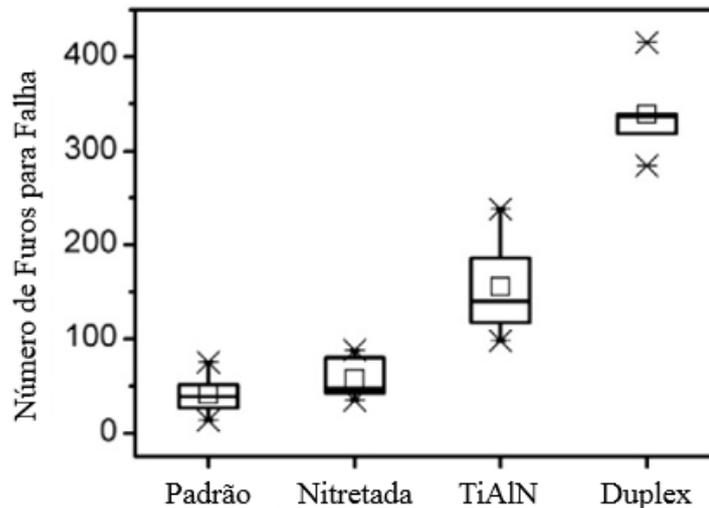


FIGURA 2.8: Tempos de vida de brocas HSS M2 padrão (sem tratamento), nitretada, revestida apenas com revestimento de TiAlN e tratamento duplex
 FONTE: Rousseau *et al.*, 2015, p. 407

Avaliando o desgaste de brocas HSS nitretadas a plasma e revestidas de TiN, Nickel *et al.* (2000) constataram, por meio das medições de desgaste de flanco, que as brocas pré-nitretadas tiveram redução do desgaste de flanco e, conseqüentemente, vida da ferramenta prolongada em comparação às brocas apenas revestidas. O desempenho de usinagem relativamente melhor das brocas pré-nitretadas foi atribuído ao papel da nitretação a plasma em melhorar a adesão do revestimento de TiN e, assim, aumentar a resistência ao desgaste do revestimento. Isso foi suportado pelo fato de que os valores de dureza dos materiais de base HSS dos dois tipos de brocas eram iguais.

2.7 Desgaste e mecanismos de desgaste de ferramentas de corte

Diversos são os tipos de desgaste e avarias que acontecem em uma ferramenta durante uma operação de usinagem e que, conseqüentemente, causam a sua destruição ou substituição, ocasionando paradas da máquina para troca e assim, elevando os custos do processo e perda de produtividade.

Consideram-se como avarias da ferramenta as quebras, trincas, sulcos distribuídos em forma de pente e as deformações plásticas que ocorrem na aresta de corte durante a

usinagem (FERRARESI, 1970). Já o desgaste é comumente definido como a remoção de material de superfícies sólidas como resultado de uma superfície de contato se deslocando sobre outra (HOLMBERG e MATTHEWS, 2009).

2.7.1 Formas de desgaste em brocas helicoidais

Há diversas formas de desgaste em brocas helicoidais. Elas podem apresentar desgaste de cratera na superfície de saída, desgaste de flanco na superfície de folga, desgaste na aresta transversal, na quina (ponta de corte) e nas guias conforme mostra a FIG. 2.9.

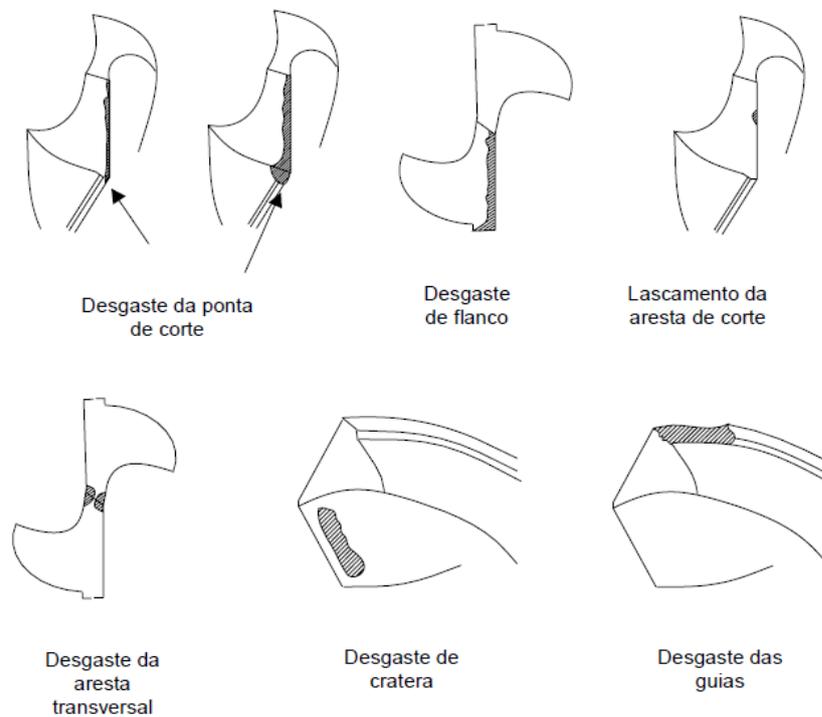


FIGURA 2.9: Formas de desgaste em brocas helicoidais

FONTE: Kanai e Kanda (1979) *apud* Da Silva (2010), p. 41

As situações práticas de desgaste raramente envolvem apenas uma dessas formas de desgaste, isto é, há interações importantes entre elas, embora uma delas deva prevalecer (SHAW, 2005).

2.7.2 Mecanismos de desgaste

De acordo com Holmberg e Matthews (2009), um mecanismo de desgaste é uma classificação do processo pelo qual o material é removido da superfície de contato. Mecanismos típicos de desgaste são a adesão, abrasão, difusão e oxidação, embora encontra-se na literatura outras classificações como a deformação plástica superficial por cisalhamento a altas temperaturas e deformação plástica da aresta de corte sob altas tensões de compressão (TRENT e WRIGHT, 2000).

Os principais mecanismos de desgaste das ferramentas de corte podem ser definidos, em separado, conforme se segue:

- **adesão:** acontece, geralmente, em velocidades de corte e temperaturas mais baixas. O fluxo de material após a aresta de corte é mais irregular. Além disso, a aresta postiça de corte pode ser formada e o contato com a ferramenta pode ser menos contínuo. Sob tais condições, fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto ao fluxo de material adjacente à interface (TRENT e WRIGHT, 2000; MACHADO *et al.*, 2011).
- **abrasão:** ocorre quando o material é removido ou deslocado da superfície por partículas duras que podem estar soltas entre duas superfícies com movimento relativo, ou que pertencem a uma das superfícies (MACHADO *et al.*, 2011). Mecanismos de desgaste abrasivo podem envolver tanto fluxo plástico quanto fratura frágil (HUTCHINGS, 1992).
- **difusão:** consiste na transferência de material, em nível atômico, de um material para outro, o que causa variações nas propriedades da camada superficial da ferramenta. A taxa de desgaste por difusão é muito dependente da relação metalúrgica entre ferramenta e material de trabalho. A velocidades e temperaturas mais altas a difusão é acelerada (TRENT e WRIGHT, 2000).
- **oxidação:** consiste na reação química das superfícies ativas com agentes oxidantes (ar, água ou outro integrante dos fluidos de corte) em temperaturas elevadas. Geralmente este mecanismo de desgaste é mais acentuado nas extremidades de contato cavaco-ferramenta, onde o acesso dos agentes oxidantes é mais fácil (TEIXEIRA, 2001).

Para altas temperaturas de usinagem (altas velocidades de corte e avanços) irão prevalecer os desgastes por difusão, abrasão e oxidação, enquanto que para temperaturas mais baixas a abrasão e principalmente a adesão serão os atuantes (DA SILVA, 2010).

2.8 Ferro fundido

Os ferros fundidos constituem um grupo de ligas de importância fundamental para a indústria, não só devido às características inerentes ao próprio material, como também pelo fato de, mediante introdução de elementos de liga e aplicação de tratamentos térmicos adequados, possibilitaram seu emprego em aplicações que, de certo modo, eram exclusivas dos aços (CHIAVERINI, 2008). Pode ser definido conforme se segue:

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, 2008, p. 494)

A norma ABNT NBR 6215 (2011): *Produtos siderúrgicos – Terminologia* define, dentro da denominação geral de ferro fundido, os seguintes tipos: ferro fundido branco, ferro fundido cinzento, ferro fundido cinzento de alto teor em liga, ferro fundido coquilhado, ferro fundido maleável, ferro fundido maleável de núcleo branco, ferro fundido maleável de núcleo preto, ferro fundido mesclado, ferro fundido nodular, ferro fundido nodular ligado e o ferro fundido vermicular.

Segundo Santos e Sales (2007), a usinabilidade dos ferros fundidos está relacionada à sua microestrutura e aos elementos de liga. A presença de ferrita implica em melhor usinabilidade em relação a outras estruturas. Já o silício faz com que a perlita tenha dureza maior que a dos aços. A perlita é o microconstituente dos ferros fundidos que tem a melhor relação entre usinabilidade e resistência ao desgaste. Já a martensita e a bainita têm, respectivamente, dureza elevada e intermediária, ambas apresentando difícil usinabilidade. O estanho em quantidades entre 0,05 e 0,15% promove maior uniformidade da dureza ao longo da seção do material, melhorando sua usinabilidade. Os carbonetos, por sua vez, prejudicam a vida das ferramentas, mesmo em pequenas quantidades. A presença destes aumenta as forças de usinagem. Os ferros fundidos podem apresentar inclusões de óxidos de elevada dureza que, além de acelerar o desgaste das ferramentas, ainda elevam as forças de usinagem. Os sulfetos são benéficos para a usinabilidade tanto por sua ação lubrificante quanto pela redução da resistência ao cisalhamento. Os silicatos e os nitretos são compostos de alta dureza e exercem ação abrasiva sobre as ferramentas de corte. O cobre é um elemento com leve ação grafitizante

e inibe a formação de ferrita, resultando em uma estrutura mais homogênea e de melhor usinabilidade.

A subseção seguinte destina-se os ferros fundidos cinzentos, material selecionado para a realização do presente estudo.

2.8.1 Ferro fundido cinzento

Os ferros fundidos cinzentos são considerados de usinabilidade relativamente fácil. A grafita presente nos ferros fundidos cinzentos cria descontinuidades no material, facilitando sua ruptura e provocando menor solicitação na ferramenta de corte, Ela atua, ainda, como lubrificante sólido, reduzindo a tendência de adesão do material na ferramenta (SANTOS e SALES, 2007).

Os ferros cinzentos possuem algumas características desejáveis: são muito eficientes no amortecimento de energia vibracional, exibem uma elevada resistência ao desgaste, no seu estado fundido possuem uma elevada fluidez à temperatura de fundição e estão entre os materiais metálicos mais baratos que existem (CALLISTER, 2002).

A ASTM classifica os ferros fundidos cinzentos conforme sua composição química, de acordo com a TAB. 2.4. Os números de 20 a 60, das classes ASTM, correspondem aos limites de resistência à tração (ASTM A-48 *apud* Chiaverini, 2008).

TABELA 2.4 – Classes de ferro fundido cinzento segundo a ASTM

Classe ASTM	Composição química (%)				
	C	Si	Mn	P	S
20	3,10 – 3,80	2,20 – 2,60	0,50 – 0,80	0,20 – 0,80	0,08 – 0,13
25	3,00 – 3,50	1,90 – 2,40	0,50 – 0,80	0,15 – 0,50	0,08 – 0,13
30	2,90 – 3,40	1,70 – 2,30	0,45 – 0,80	0,15 – 0,30	0,08 – 0,12
35	2,80 – 3,30	1,60 – 2,20	0,45 – 0,70	0,10 – 0,30	0,06 – 0,12
40	2,75 – 3,20	1,50 – 2,20	0,45 – 0,70	0,07 – 0,25	0,05 – 0,12
50	2,55 – 3,10	1,40 – 2,10	0,50 – 0,80	0,07 – 0,20	0,06 – 0,12
60	2,50 – 3,00	1,20 – 2,20	0,50 – 1,00	0,05 – 0,20	0,05 – 0,12

FONTE: ASTM A-48 *apud* Chiaverini, 2008, p. 517

A usinabilidade do ferro fundido cinzento FC 400 e do vermicular classe 450 foi estuda por Evans, Hoogendoorn e Platt (2013) mediante ensaios de furação utilizando brocas de metal duro com diâmetro de 6,35 mm. A avaliação da usinabilidade destes materiais foi feita

por meio de medidas do momento torçor e desgaste da ferramenta que ocorrem durante a operação. Como esperado, o ferro fundido vermicular é significativamente mais difícil de usar comparado ao ferro fundido cinzento. Os valores de torque medidos durante a usinagem do ferro fundido cinzento FC 400 foram consistentes e estáveis durante todo o processo enquanto para o ferro fundido vermicular classe 450 os resultados demonstraram uma transição a partir do 27º furo, seguido por um rápido e crescente aumento do momento torçor ao longo do teste, conforme mostra a FIG. 2.10. Segundo os autores, a mudança nos valores dos torques medidos no processo constitui uma medida indireta útil da modificação ou deterioração na condição da ferramenta, geralmente decorrente do desgaste da ferramenta e/ou adesão de metal na aresta de corte. Além disso, a ausência da camada lubrificante formada pelo MnS no ferro fundido vermicular é responsável pelo alto atrito, aquecimento e aceleração do desgaste da ferramenta.

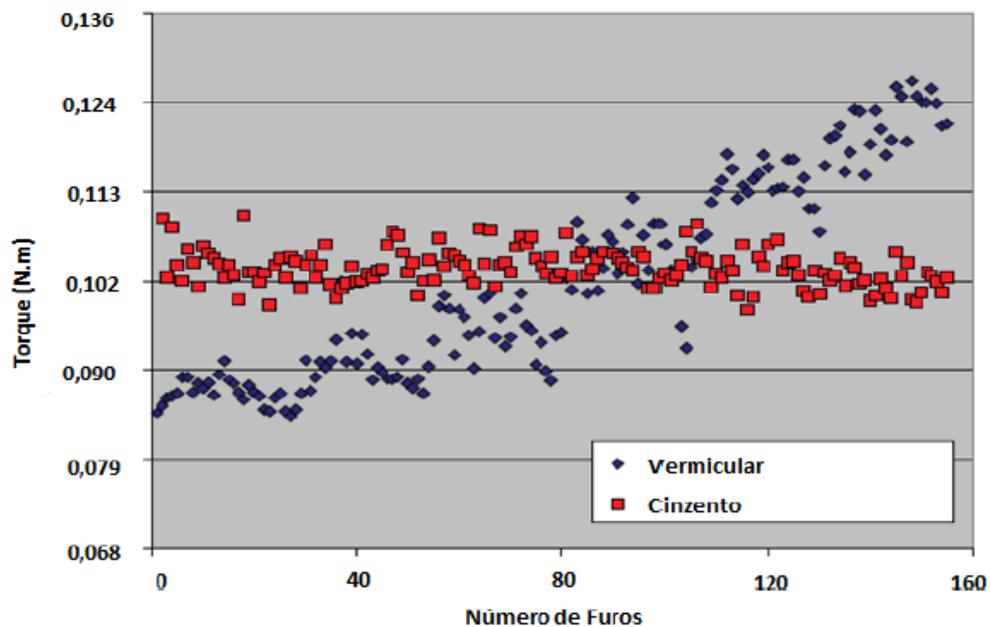


FIGURA 2.10: Medições do torque nos ensaios de furação

FONTE: EVANS, HOOGENDOORN e PLATT, 2013, p. 2

2.9 Desvios geométricos na operação de furação

Em geral, não é possível fabricar peças sem variação dimensional. De acordo com Agostinho *et al.* (1977), o grau dentro do qual a peça real difere da projetada, determinado pela qualidade de usinagem, caracteriza a precisão de fabricação. Em muitos casos, os desvios da peça original para a peça realmente fabricada podem ser indicados previamente, enquadrando-se assim nas chamadas tolerâncias geométricas, representadas pelos desvios de forma e posição.

Tais desvios geométricos provém da falta de rigidez da máquina-ferramenta, de um dispositivo de usinagem, da perda da aresta de corte de uma ferramenta e outros inúmeros fatores que influenciam diretamente na qualidade final de uma peça usinada.

Por serem objetivos de estudo, serão descritos, de forma sucinta, apenas os desvios de circularidade e rugosidade superficial:

- A circularidade de um furo é a condição em que todos os pontos de uma superfície de revolução em qualquer seção perpendicular a um eixo comum, são equidistantes daquele eixo. O desvio de circularidade é representado por dois círculos concêntricos com uma distância radial mínima aplicada independente em cada plano (NOVASKI, 2013).
- Em se tratando da rugosidade do furo, o processo de furação produz variações nas superfícies de trabalho. Estas variações são muitas vezes imperceptíveis ou invisíveis a olho nu. São cristas e vales que as ferramentas formam nas superfícies usinadas, conhecidas como rugosidade. A rugosidade pode ser causada pelas variações no processo induzidas por vibrações, esforços de usinagem (F_z e M_z), imperfeições nos mecanismos das máquinas-ferramentas ou mesmo por defeitos da peça (DA SILVA, 2010).

Os parâmetros mais utilizados para a avaliação de superfícies, segundo a norma ABNT NBR ISO 4287 (2002), são:

- **desvio aritmético médio do perfil avaliado (R_a):** é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem.
- **desvio médio quadrático do perfil avaliado (R_q):** é a raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem.
- **altura máxima do perfil (R_z):** é a soma da altura máxima dos picos do perfil e da maior das profundidades dos vales do perfil no comprimento de amostragem.
- **altura total do perfil (R_t):** é a soma das maiores alturas de pico do perfil e das maiores profundidades dos vales do perfil no comprimento de avaliação.

As condições de corte têm grande influência sobre a rugosidade: as irregularidades deixadas pelas marcas de avanço tendem a aumentar em proporção quadrática ao avanço; baixas velocidades de corte proporcionam a formação de aresta postiça de corte resultando em um acabamento inferior; a elevação da temperatura provoca a redução da resistência ao

cisalhamento do material da peça, promovendo a redução das forças de usinagem e, conseqüentemente, a melhoria do acabamento; o aumento da velocidade de corte pode acarretar vibrações da máquina e assim prejudicar o acabamento; a geometria da ferramenta, a rigidez da máquina-ferramenta e a composição química, dureza, microestrutura e consistência metalúrgica do material da peça são fatores que também podem afetar o acabamento; e a utilização de fluido de corte como forma de reduzir o desgaste da ferramenta e o atrito entre a ferramenta e a peça ou o cavaco, pode também contribuir para uma melhoria do acabamento (MACHADO *et al.*, 2011).

Paiva Jr. *et al.* (2013), além de compararam o desempenho dos revestimentos TiAlN/TiN, AlCrN e TiSiN/AlCrN depositados em brocas de metal duro (classe K10) na furação de ferro fundido vermicular da classe CGI 450, também avaliaram a qualidade dos furos usinados por meio da circularidade e da rugosidade. Os resultados revelaram duas tendências: a qualidade da circularidade está diretamente relacionada com a velocidade de corte, isto é, em um dado sistema de revestimento, maior a velocidade de corte, melhor a circularidade e, embora a rugosidade seja diretamente influenciada pelo desgaste do sistema de revestimento e a adesão, utilizando velocidade de corte mais baixa reduz a quantidade de desgaste e a aderência de ferro na aresta de corte da ferramenta resultando em uma menor rugosidade superficial. A FIG. 2.11 ilustra os resultados apresentados acima.

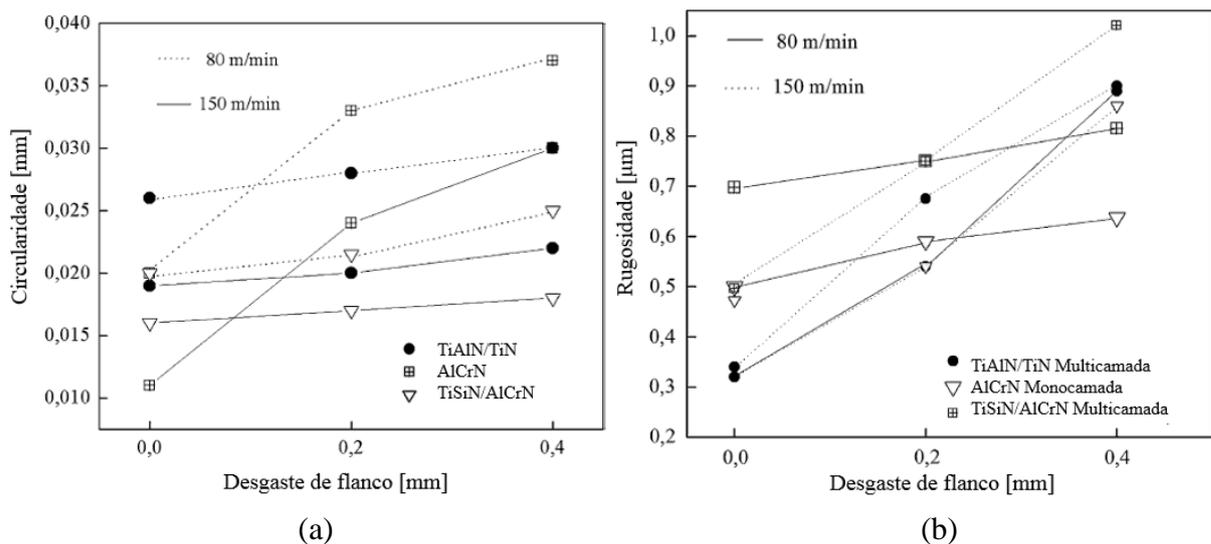


FIGURA 2.11: (a) Circularidade dos furos usinados versus desgaste de flanco e (b) Rugosidade dos furos usinados versus desgaste de flanco.

FONTE: Adaptado de Paiva Jr. *et al.*, 2013, p. 3159

2.10 Estudos tribológicos

O movimento de uma superfície sólida sobre outra é de extrema importância para o funcionamento de vários tipos de mecanismo, tanto artificiais como naturais. Sendo assim, a tribologia, como sendo a ciência e tecnologia de interação de superfícies em movimento relativo, desempenha um papel muito importante na discussão do comportamento de pares tribológicos por meio do estudo do atrito, do desgaste e lubrificação (HUTCHINGS, 1992).

De acordo com Le Bourhis *et al.* (2009), o desempenho tribológico de um sistema revestido é resultado da combinação de dureza, módulo de elasticidade, tenacidade, tensões residuais e morfologia superficial (rugosidade) dos materiais que englobam tal sistema. Não só a dureza do substrato e do revestimento são importantes para se conseguir um bom desempenho tribológico, mas também a concorrência entre diferentes modos de deformação deve ser levada em consideração.

Bhushan (2013) afirma que a forma das curvas de atrito pode ser afetada pelos materiais da interface, bem como pelas condições de operação.

Um estudo comparativo do comportamento tribológico dos revestimentos de AlCrN e TiAlN depositados pelo processo PVD foi realizado por Mo *et al.* (2007). Para os testes de esfera-sobre-disco foram utilizadas esferas de Si₃N₄ de 4 mm de diâmetro e discos de metal duro com revestimento de AlCrN e TiAlN. Os parâmetros experimentais foram: carga normal de 5 N, velocidade de rotação de 318 rpm (10 m/min), diâmetro nominal da pista de desgaste de 10 mm e tempo total de ensaio de 30 min. Os resultados mostraram que o revestimento de AlCrN apresentou menores coeficiente de atrito e taxa de desgaste comparado ao revestimento de TiAlN. Após um estágio inicial de cerca de 5 m em distância percorrida, os coeficientes de atrito dos revestimentos AlCrN e TiAlN atingiram seus valores estáveis de aproximadamente 0,75 e 0,85, respectivamente. O coeficiente de atrito do revestimento de TiAlN apresentou ser mais instável do que o do revestimentos de AlCrN devido aos diferentes comportamentos dos detritos e das propriedades tribo-químicas, conforme mostra a FIG. 2.12.

Além disso, em comparação com o revestimento TiAlN, o revestimento AlCrN apresentou melhores características de anti-oxidação, anti-lascamento e remoção de detritos da interface de contato. Os óxidos formados pelas reações tribo-químicas foram vantajosos para o anti-desgaste e o anti-atrito devido à elevada resistência à oxidação e à estabilidade térmica do revestimento AlCrN.

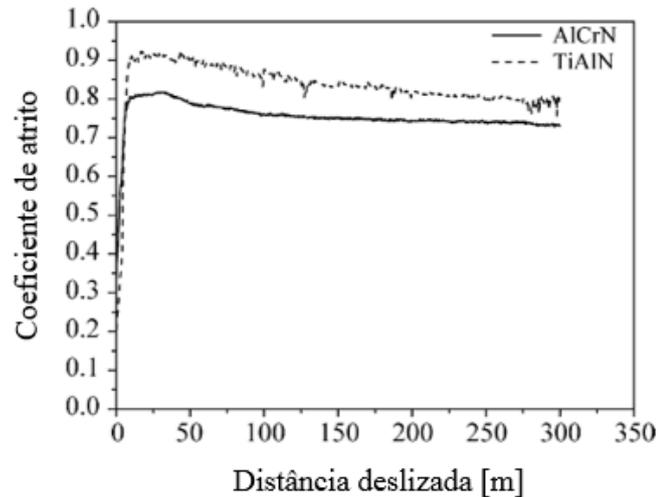


FIGURA 2.12: Coeficiente de atrito dos revestimentos de AlCrN e TiAlN em função da distância deslizada em teste de esfera-sobre-disco

FONTE: Mo *et al.*, 2007, p. 1425

Mo e Zhu (2008), investigando o comportamento tribológico deslizante do revestimento de AlCrN depositado em substrato de metal duro e utilizando esfera de Si_3N_4 , constataram que o revestimento de AlCrN obteve excelentes propriedades anti-abrasão. A velocidade de deslizamento teve uma influência significativa no comportamento tribológico do revestimento. Verificou-se que o período do estágio de transição diminuiu enquanto o valor do coeficiente de atrito, no estado estacionário, aumentou com o aumento da velocidade de deslizamento. A combinação de abrasão e oxidação foi o principal mecanismo de desgaste e, a proteção do revestimento foi atribuída aos óxidos resistentes ao desgaste e termicamente estáveis formados pelas reações tribo-químicas de cromo e alumínio.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os procedimentos experimentais necessários à realização de todo o conjunto de ensaios são apresentados nos itens subsequentes.

3.1 Materiais e métodos

Para a realização dos ensaios de pino sobre disco foram preparados três corpos de prova de ferro fundido cinzento FC 300 nas dimensões 60x60x15 mm (FIG. 3.1). A TAB. 3.1 apresenta a composição química do material (o certificado do fornecedor encontra-se no Anexo A). A planicidade e a rugosidade da superfície dos três corpos de prova foram analisadas, obtendo valores de R_a inferiores a 0,8 μm conforme norma ASTM G99-05. Este procedimento é necessário para evitar possíveis vibrações durante os ensaios e, conseqüentemente, evitar interferências no coeficiente de atrito.

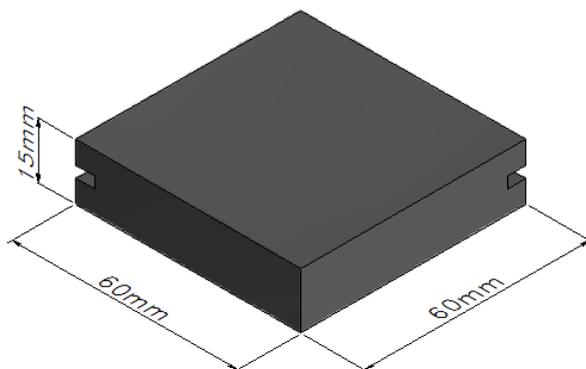


FIGURA 3.1: Corpo de prova para o ensaio tribológico

FONTE: O autor

TABELA 3.1 – Composição química (%) do ferro fundido cinzento FC 300

C	Mn	S	Cu	Si	P	Cr
3,2400	0,4100	0,1660	0,1100	2,5900	0,0540	0,0500

FONTE: Plastmetal - nº Certificado Fornecedor 533364

A medição da dureza dos corpos de prova foi realizada em 4 regiões distintas por meio de um durômetro marca Wolpert, modelo D-6700, com diâmetro da esfera de 2,5 mm e

carga de 62,5 kgf, da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – Contagem, obtendo valor médio de 179 HB.

Pinos de topo esférico de aço rápido AISI M2, cujo croqui está representado na FIG.3.2, foram utilizados para os ensaios tribológicos nas seguintes condições: sem revestimento (entenda-se pinos sem revestimento aqueles que não foram revestidos e nem submetidos ao processo termoquímico da nitretação), apenas com revestimento à base de AlCr e com tratamento duplex (nitretação seguida de revestimento à base de AlCr).

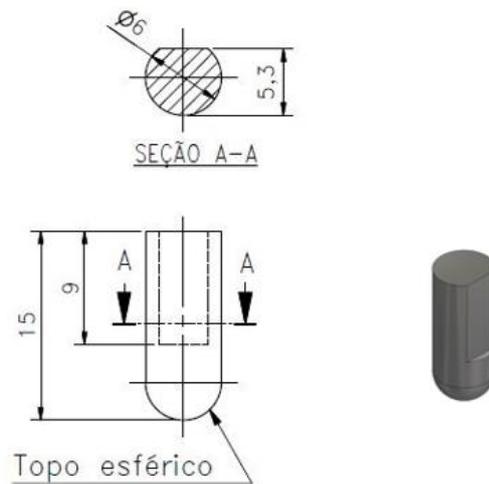


FIGURA 3.2: Croqui do pino para o ensaio tribológico

FONTE: O autor

Para verificar a microdureza da superfície apenas com revestimento à base de AlCr e da superfície com tratamento duplex foram utilizados pinos de aço rápido AISI M2 de topo reto nas dimensões de 8 mm de comprimento e 6 mm de diâmetro. Ambos foram embutidos em baquelite (FIG. 3.3) e, posteriormente, as seções expostas foram lixadas e polidas

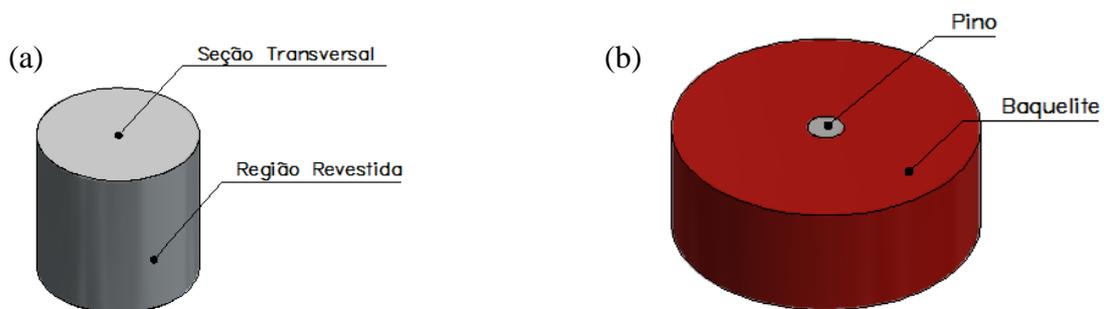


FIGURA 3.3: (a) Seção transversal da amostra para análise; (b) amostra embutida em baquelite

FONTE: O autor

A TAB. 3.2 apresenta a composição química dos pinos de topo esférico e topo reto.

TABELA 3.2 – Composição química (%) do aço rápido AISI M2

C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V
0,888	0,334	0,301	5,339	7,801	2,780	1,837

FONTE: Laboratório de Materiais e Aplicações Fiat Automóveis S/A - Relatório nº 254150

Para os testes de furação foram utilizados discos de ferro fundido cinzento FC 300 de 290 mm de diâmetro e 30 mm de espessura conforme mostra a FIG. 3.4 e corpos de prova de dimensões 80x18x30 mm (FIG. 3.5) para a realização da furação sobre o dinamômetro para a coleta do torque.

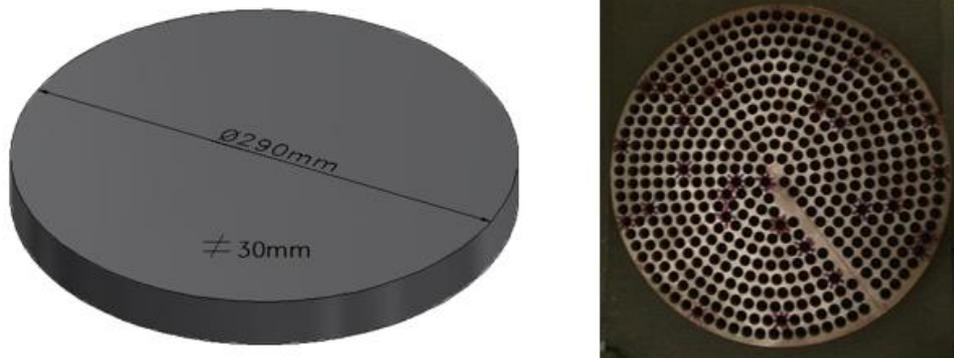


FIGURA 3.4: Discos de ferro fundido cinzento FC 300 para ensaio de furação

FONTE: O autor

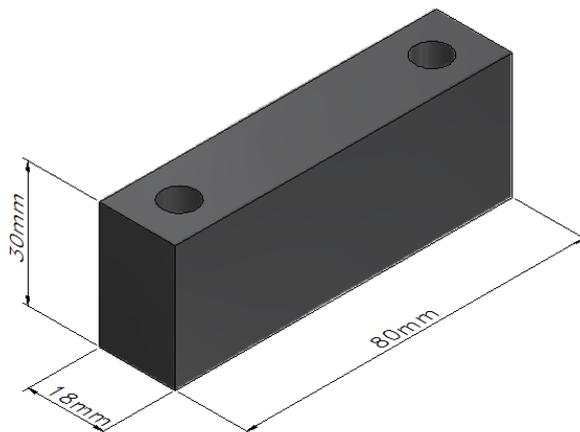


FIGURA 3.5: Corpo de prova de ferro fundido cinzento FC 300 para ensaio de furação sobre o dinamômetro

FONTE: O autor

A composição química do ferro fundido cinzento FC 300 dos discos e dos corpos de prova utilizados na furação é a mesma dos três corpos de prova utilizados para os ensaios tribológicos pois correspondem ao mesmo lote de fabricação.

Brocas helicoidais de aço rápido AISI M2 com diâmetro de 10 mm, marca Dormer, modelo A114, norma DIN 338, tipo N, com ângulo de ponta de 59°, comprimento total de 133 mm, comprimento do canal de 87 mm e composição química apresentada na TAB. 3.3 foram utilizadas nesse experimento.

TABELA 3.3 – Composição química (%) do aço rápido AISI M2

C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V
0,825	0,507	0,387	4,164	5,424	4,864	1,822

FONTE: Laboratório de Materiais e Aplicações Fiat Automóveis S/A - Relatório nº 254149

O tratamento duplex e o revestimento à base de AlCr depositados em brocas de aço rápido AISI M2 utilizadas neste trabalho foram executados pela empresa Oerlikon Balzers Revestimentos Metálicos Ltda (Jundiaí – SP).

A FIG. 3.6 apresenta um exemplo de broca com revestimento à base de AlCr.



FIGURA 3.6: Exemplo de broca com revestimento à base de AlCr

FONTE: Catálogo Balzers – Balinit Helica

Para o procedimento da nitretação foi utilizada a tecnologia de nitretação a baixa pressão, onde basicamente ela opera pelo processo gasoso (com amônia). Porém, diferentemente do processo convencional, trabalha-se em um ambiente em vácuo. Os dados abaixo foram fornecidos pela Balzers.

- profundidade de difusão: ~ 0,04 mm
- temperatura de processo: 480°C
- tempo total de processo: 16 horas (entre iniciar o processo e abrir o forno)

As propriedades do revestimento encontram-se detalhadas na TAB. 3.4.

TABELA 3.4 – Propriedades do Balinit Helica

Composição química	Base em AlCr (Al _{0,6} Cr _{0,4} N/Ti _{0,86} Si _{0,14} N)
Microdureza (HV 0,05)	3000
Máxima temperatura de trabalho	1100°C
Tensão residual (GPa)	-3
Coefficiente de atrito	0,25
Estrutura	Multicamada
Cor do revestimento	Cobre

FONTE: Catálogo Balzers – Balinit Helica

3.2 Medição da microdureza da amostra com revestimento à base de AlCr e da amostra com tratamento duplex

As medidas de microdureza Vickers (HV) foram executadas em um microdurômetro da Mitutoyo MVK-H1 Hardness Testing Machine (FIG. 3.7). Foi utilizada uma carga de 1 kgf e um tempo de impressão de 15 s para as duas amostras. As impressões foram feitas a partir da borda em direção ao centro do pino. Tomou-se o cuidado de não fazer uma impressão próxima da outra, para evitar o efeito de encruamento do material.

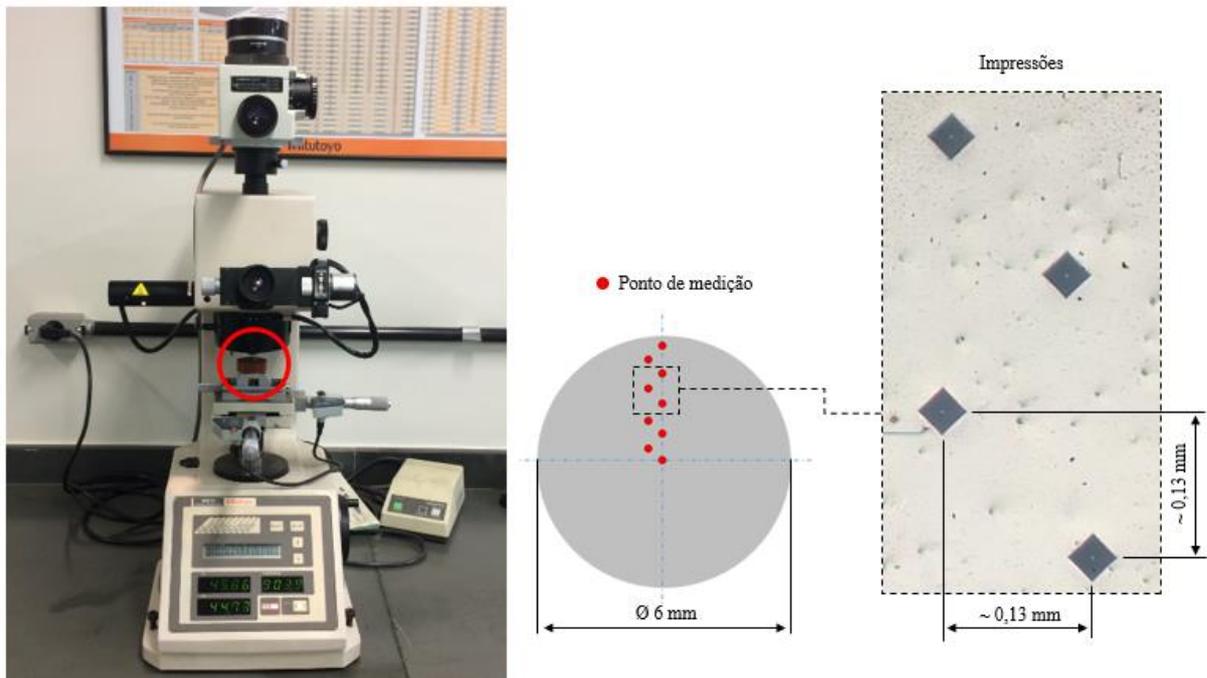


FIGURA 3.7: Microdurômetro e impressões realizadas

FONTE: O autor

3.3 Realização dos ensaios tribológicos

Utilizou-se um tribômetro da Microtest, modelo SMT-A/0100 – n° série B01100-19 conforme FIG. 3.8, para determinar o coeficiente de atrito do par de materiais selecionados. Os dados foram coletados por meio do programa Nanovea Tribometer Software. Aplicou-se uma carga normal constante de 5 N e velocidades de deslizamento de 40, 50, 60 e 70 m/min para cada condição de pino. A duração de todos os testes de atrito foi concluída quando o pino percorreu uma distância de 550 metros. É importante ressaltar que não foi utilizando fluido de corte e, a temperatura e umidade relativa do ar foram ambiente. Na elaboração das curvas de coeficiente de atrito por distância percorrida foi utilizado filtro 40 no *software* para ajuste da curva.

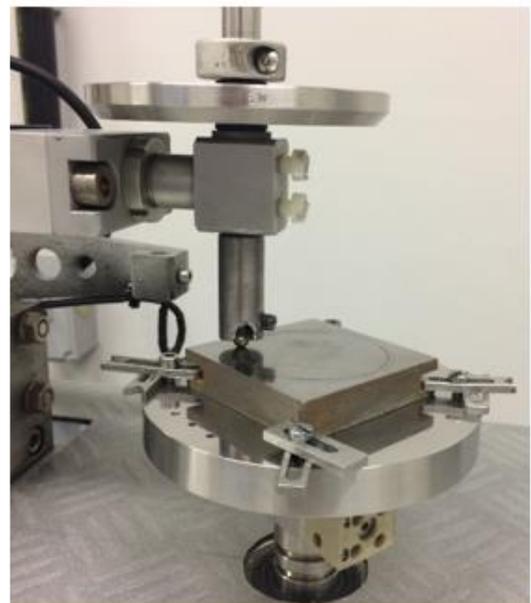
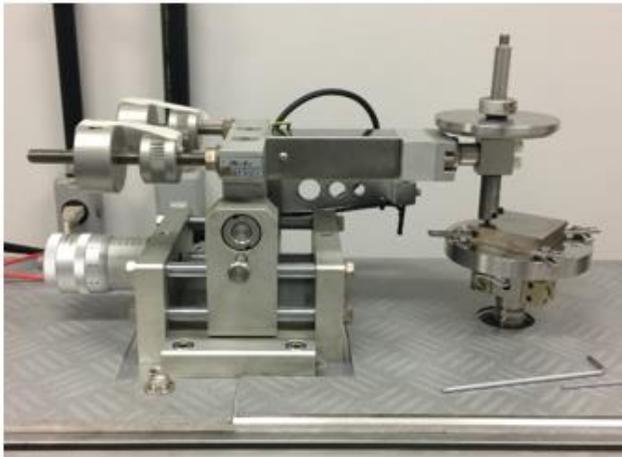


FIGURA 3.8: Tribômetro Microtest, modelo SMT-A/0100 – n° série B01100-19

FONTE: O autor

3.4 Realização dos ensaios de furação

Os ensaios de furação foram realizados a seco em um centro de usinagem Romi, modelo Discovery 560, com potência máxima de 9 kW e rotação máxima de 7500 rpm. A montagem do experimento pode ser vista na FIG. 3.9.



FIGURA 3.9: Centro de usinagem – montagem do experimento

FONTE: O autor

Os valores dos parâmetros de entrada definidos para este experimento encontram-se detalhados na TAB. 3.5.

TABELA 3.5 – Parâmetros de entrada utilizados na furação

Material da Ferramenta de Corte	Velocidade de Corte [m/min]	Avanço (f) [mm/rev]	Profundidade do furo [mm]
HSS	40, 50 e 60	0,20	25
HSS + Revestimento à base de AlCr	40, 50, 60 e 70	0,20	25
HSS + Tratamento duplex	40, 50, 60 e 70	0,20	25

FONTE: O autor

Para monitorar o torque durante o processo de furação, o centro de usinagem foi instrumentado com um dinamômetro de cristal piezelétrico da marca Kistler modelo 7292, caixa de distribuição da Kistler, placa de aquisição de dados modelo NI USB-6366 da National Instruments e com um computador munido de *software* de processamento de sinais NI SignalExpress 2013, conforme mostra a FIG. 3.10.



FIGURA 3.10: Sistema de aquisição de dados

FONTE: O autor

A calibração do sistema foi realizada utilizando massas conhecidas e avaliada a diferença de potencial, em volts, para cada massa. O valor da massa conhecida foi multiplicado pela aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$) e pela distância de $0,040 \text{ mm}$ conforme procedimento adotado. Com os dados obtidos foi possível estabelecer uma curva de regressão para o momento torçor e a diferença de potencial, conforme mostra a EQUAÇÃO (3.1). A calibração encontra-se no Apêndice A.

$$y = 19,225x + 0,0681 \quad (3.1)$$

Onde: y representa o momento torçor e x representa a 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 ($0,0681$) da EQUAÇÃO (3.1). Como forma de compensação, o balanceamento da saída pode ser feito por meio de *Trimpot* externo (potenciômetro).

Os ensaios foram realizados a seco e conduzidos da seguinte forma: o primeiro e o sétimo furo, para todas as condições dos testes, foram executados em corpos de provas sobre o dinamômetro a fim de obter os esforços (torque) iniciais. A partir desse instante, a cada três furos, o desgaste das pontas das brocas foi analisado de forma qualitativa e imagens coletadas registravam o desgaste gradativo das mesmas.

Quando o desgaste tornou-se visivelmente excessivo, nova furação foi realizada sobre o dinamômetro para obter o torque final e, conseqüentemente, encerrar o teste. Esse procedimento não foi adotado para os testes realizados a uma velocidade de corte de 40 m/min ,

onde os testes finais foram estabelecidos ao atingir a quantidade de 250 furos, tendo em vista que as brocas não apresentavam desgaste que as fizessem cessar os ensaios.

Os resultados das medições do torque estão detalhados no Apêndice B.

3.5 Medição da rugosidade, diâmetro médio e erro de circularidade dos furos

Para a medição da rugosidade superficial das paredes dos furos usinados foi utilizado um rugosímetro Taylor Hobson Precision - modelo Surtronic 25. Foi empregado um comprimento de amostragem de 2,5 mm e um comprimento de avaliação de 12,5 mm, valores recomendados para rugosidade R_a entre 2 a 10 μm . Antes de iniciar as medições, o equipamento foi calibrado usando o padrão de referência.

O seguinte procedimento foi adotado para a medição da rugosidade R_a (desvio aritmético médio) dos furos: para cada furo foram feitas quatro medições, considerando quatro pontos distintos (0° , 90° , 180° e 270°) e, ao final, foi calculada a média e o desvio padrão correspondente.

Com relação ao diâmetro médio e o erro de circularidade dos furos, estes foram mensurados utilizando uma máquina de medição por coordenadas da Mitutoyo, modelo QM-Measure 353, com resolução de 0,0005 mm, da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – Contagem.

A calibração do equipamento foi realizada antes do início das medições utilizando o padrão de referência. O procedimento a seguir foi estabelecido: para cada furo (os mesmos utilizados na rugosidade) foram feitas três medições e, ao final, foi calculada a média e o desvio padrão correspondente.

Os valores de rugosidade média, diâmetro médio, erro de circularidade e seus respectivos desvio padrão estão especificados no Apêndice C.

3.6 Análise de MEV e EDS

As imagens dos pinos e das pistas desgastadas pertinentes aos ensaios tribológicos e as imagens das pontas das brocas desgastadas proveniente dos ensaios de furação foram analisadas e obtidas por microscopia eletrônica de varredura Jeol, modelo JSM-IT300, da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – Belo Horizonte, o qual possui um equipamento de microanálise acoplado e um detector para análise EDS.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados referentes às etapas experimentais. A seção 4.1 corresponde ao estudo da microdureza do revestimento à base de AlCr e do tratamento duplex (tratamento termoquímico de nitretação seguido de revestimento à base de AlCr). Os resultados das análises tribológicas serão apresentados na seção 4.2. A seção 4.3 refere-se ao estudo da influência do tratamento duplex nos resultados de momento torçor ao variar a velocidade de corte. Já a seção 4.4 diz respeito à qualidade dos furos usinados com foco na rugosidade Ra , diâmetro médio e erros de circularidade. A apresentação do desgaste das ferramentas dar-se-á por meio das imagens obtidas por MEV (microscopia eletrônica de varredura) e das análises químicas mediante EDS (espectroscopia de energia dispersiva) na seção 4.5.

4.1 Resultados de microdureza

Como visto na seção 2.6, a nitretação é um processo termoquímico utilizado com o objetivo principal de aumentar a dureza e a resistência ao desgaste da superfície. O perfil de microdureza da amostra revestida à base de AlCr e da amostra com tratamento duplex (nitretação seguida de revestimento à base de AlCr) é mostrado no GRA. 4.1.

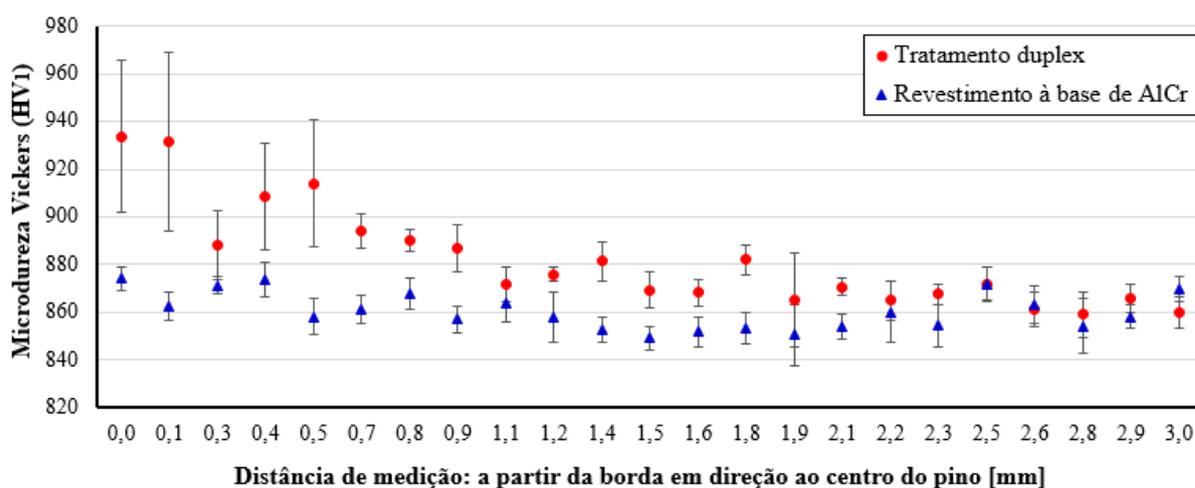


GRÁFICO 4.1: Perfil de microdureza das amostras com revestimento e com tratamento duplex

FONTE: O autor

Observa-se que a amostra com tratamento duplex apresentou um aumento na microdureza superficial de cerca de 7% em relação à amostra apenas revestida no ponto de medição correspondente à distância 0,0 mm.

Além disso, para determinar se o tratamento duplex tem algum efeito na microdureza superficial comparada à uma superfície apenas com revestimento à base de AlCr foi realizado o teste t pareado. O teste t pareado é útil para analisar o mesmo conjunto de itens que foram medidos sob duas condições diferentes, as diferenças nas medições feitas sobre o mesmo assunto antes e depois de um tratamento, ou diferenças entre dois tratamentos dados ao mesmo assunto (MINITAB 18).

Para a realização do teste t pareado foi escolhido um nível de significância de $\alpha = 0,05$, isto é, um intervalo de confiança de 95% e as seguintes hipóteses foram consideradas:

- H_0 (hipótese nula): $\mu_d = \mu_0$, isto é, a média das diferenças na população (μ_d) é igual à média hipotética das diferenças (μ_0)
- H_1 (hipótese alternativa): $\mu_d \neq \mu_0$, isto é, a média das diferenças na população (μ_d) não é igual à média hipotética das diferenças (μ_0)

Os resultados desse teste são mostrados na FIG. 4.1. A hipótese nula afirma que a diferença média da microdureza superficial da amostra com tratamento duplex comparada à amostra apenas com revestimento à base de AlCr é 0. Como o valor de p é 0,000, que é menor do que o nível de significância de 0,05, logo rejeita-se a hipótese nula e conclui que há uma diferença entre as microdurezas superficiais das amostras em questão ao nível de significância considerado.

Teste T Pareado e IC: Tratamento Duplex; Revestimento à base de AlCr

Teste T pareado para Tratamento Duplex - Revestimento à base de AlCr

	N	Média	DesvPad	EP	Média
Tratamento Duplex	23	881,89	21,63	4,51	
Revestimento à base de A	23	860,51	7,77	1,62	
Diferença	23	21,38	19,57	4,08	

IC de 95% para a diferença média: (12,92; 29,84)

Teste T de diferença de média = 0 (versus $\neq 0$): Valor T = 5,24 Valor-p = 0,000

FIGURA 4.1: Resultados do teste t pareado dos valores de microdureza

FONTE: O autor

Para verificar se há problemas nos dados mensurados, como a presença de outliers que são valores de dados que estão distantes de outros valores e que podem afetar os resultados da análise, foi utilizado o boxplot de diferenças. O asterisco (*) denota a presença de outliers como pode ser visto no GRA. 4.2 (a). Quando isso ocorre, é necessário tentar identificar a causa de todos os outliers. Neste caso, foi realizado um novo teste desconsiderando os pontos de medição realizados à distância de 0,1 mm (GRA. 4.1) e os novos resultados mostraram-se satisfatórios (ausência de outliers), conforme o GRA. 4.2 (b).

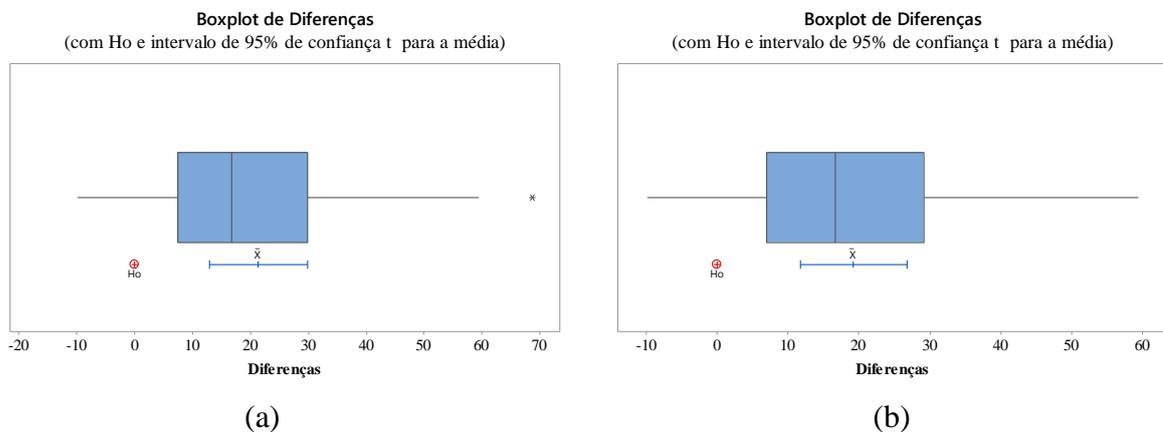


GRÁFICO 4.2: Boxplot de diferenças (a) com outlier (b) sem outlier

FONTE: O autor

Logo, como os pontos de medição realizados na distância de 0,0 mm não são outliers, sugere-se que o aumento na microdureza superficial de cerca de 7% da amostra com tratamento duplex comparada à amostra apenas com revestimento à base de AlCr é verdadeira.

4.2 Resultados tribológicos

A análise tribológica foi realizada com o intuito de observar o comportamento do coeficiente de atrito médio dos pares tribológicos além de avaliar os possíveis mecanismos de desgaste por meio das imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura e análise EDS dos pinos e das pistas desgastadas.

4.2.1 Coeficiente de atrito

Os resultados do coeficiente de atrito dos testes tribológicos utilizando pinos sem revestimento, pinos apenas com revestimento à base de AlCr e pinos com tratamento duplex,

todos deslizando sobre ferro fundido cinzento FC 300, e as velocidades de deslizamento consideradas sendo iguais às velocidades de corte programadas para os testes de furação, isto é, 40 m/min, 50 m/min, 60 m/min e 70 m/min estão representados nos GRA. 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6, respectivamente.

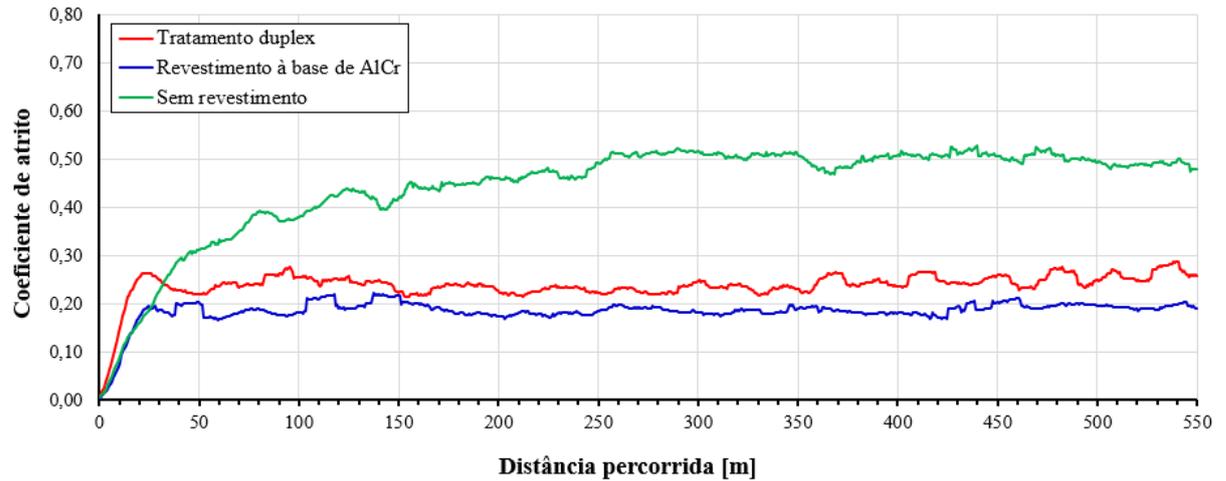


GRÁFICO 4.3: Coeficiente de atrito para a velocidade de deslizamento de 40 m/min

FONTE: O autor

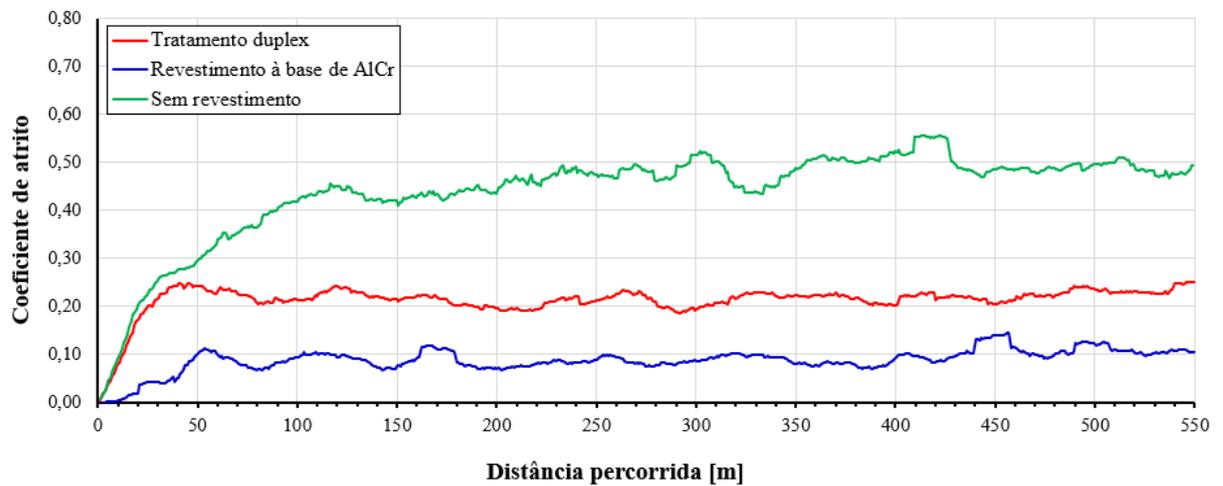


GRÁFICO 4.4: Coeficiente de atrito para a velocidade de deslizamento de 50 m/min

FONTE: O autor

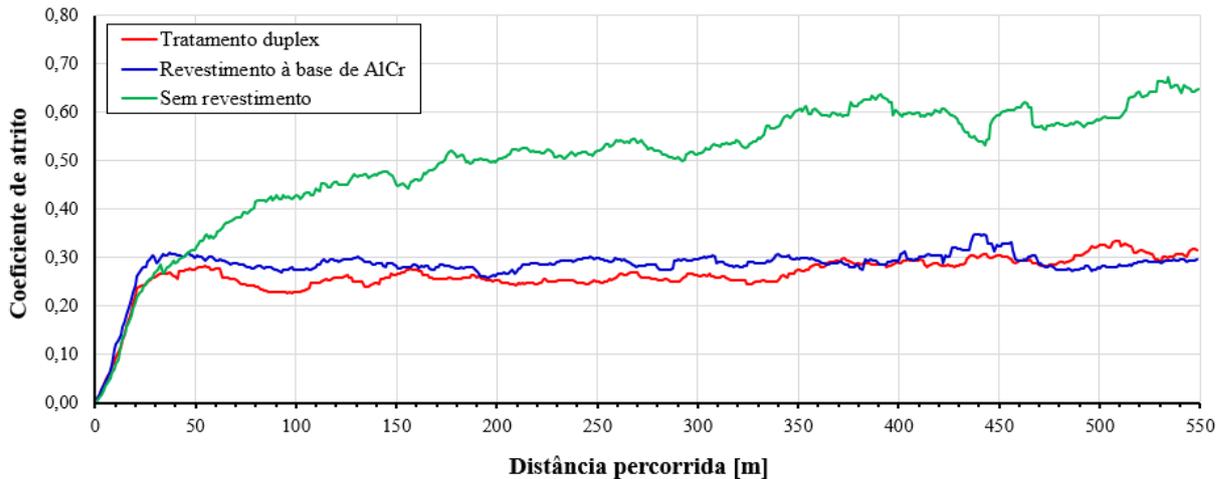


GRÁFICO 4.5: Coeficiente de atrito para a velocidade de deslizamento de 60 m/min

FONTE: O autor

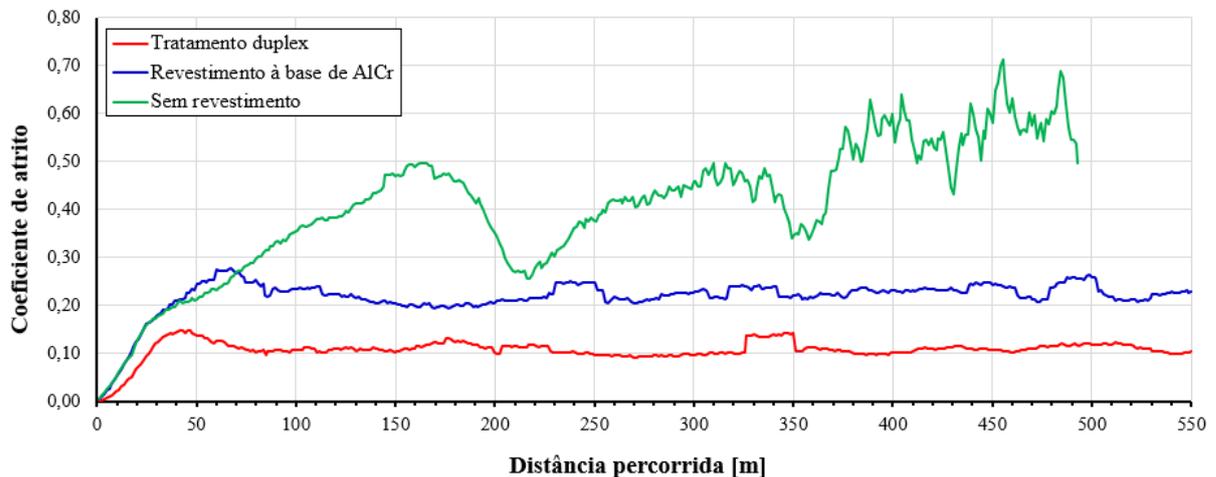


GRÁFICO 4.6: Coeficiente de atrito para a velocidade de deslizamento de 70 m/min

FONTE: O autor

Por meio das curvas de coeficiente de atrito em função da distância é possível verificar as diferenças presentes no comportamento do atrito durante os estágios de deslizamento em cada tipo de amostra. Nota-se que os pinos sem revestimento foram os que apresentaram ser mais instáveis em todas as velocidades de deslizamento. Já os gráficos dos pinos apenas com revestimento à base de AlCr e com tratamento duplex apresentaram comportamentos com importante destaque. A baixas velocidades de deslizamento, isto é, 40 m/min e 50 m/min, a curva do coeficiente de atrito do pino apenas revestido com revestimento à base de AlCr manteve-se abaixo da curva do pino com tratamento duplex. Entretanto, quando as velocidades de deslizamentos foram aumentadas para 60 m/min e 70 m/min, ocorreu uma inversão das curvas e o pino com tratamento duplex mostrou-se superior, em termos de menor

coeficiente de atrito, comparado ao pino apenas revestido à base de AlCr. Tal inversão pode ser explicada pelo aumento da velocidade de deslizamento uma vez que esta afeta a taxa de dissipação de energia e, portanto, a temperatura na interface. O aumento da velocidade de deslizamento promove a elevação da temperatura. Quanto maior a temperatura, mais rápida será a formação de óxidos. Tais óxidos reduzem a interação entre as superfícies contribuindo para um baixo coeficiente de atrito. Além disso, com o aumento da temperatura há redução da tensão de cisalhamento da interface e, como o pino com tratamento duplex apresenta uma maior dureza, conforme evidenciado na seção 4.1, o coeficiente de atrito é reduzido.

Segundo Rabinowicz (1995) em alta velocidade, a alta temperatura da interface causa amaciamento do substrato. Os testes em que a temperatura é variada indicam o ponto de dessorção dos lubrificantes, a formação de óxidos e talvez outros filmes e ajudam a determinar a utilidade dos materiais sob condições de deslizamento de alta temperatura.

De acordo com Bhushan (2013) durante o deslizamento ocorrem mudanças nas condições das superfícies de contato que afetam as propriedades de atrito e desgaste. Após algum período, a força de atrito geralmente se estabiliza no que se denomina estado estacionário (ou estável) de deslizamento. Blau (2009) define estado estacionário (ou estável) como sendo a condição de um determinado sistema tribológico em que o coeficiente médio de atrito cinético, a taxa de desgaste e outros parâmetros especificados (temperatura, concentração de partículas de detritos e rugosidade superficial) alcançaram e mantiveram um nível relativamente constante. Sendo assim, os valores médios do coeficiente de atrito foram coletados na fase estacionária e estão sintetizados no GRA. 4.7.

O coeficiente de atrito foi menor para os pinos com revestimento à base de AlCr e com tratamento duplex. Observa-se que a presença do revestimento em ambos os pinos contribuiu para obtenção de um menor coeficiente de atrito. Os resultados sugerem que o tratamento duplex apresenta uma pequena melhora no desempenho a maiores velocidades de deslizamento.

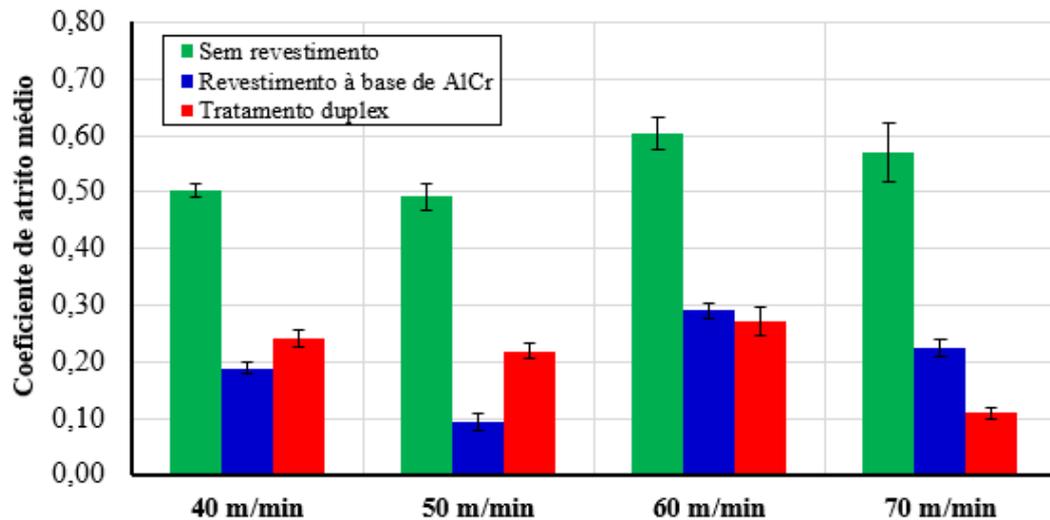


GRÁFICO 4.7: Coeficiente de atrito médio nas velocidades de deslizamento consideradas

FONTE: O autor

4.2.2 Análise dos pinos

As superfícies desgastadas dos pinos sem revestimento, apenas com revestimento à base de AlCr e com tratamento duplex, na velocidade de deslizamento de 40 m/min, são mostradas nas FIG. 4.2, 4.3 e 4.4, respectivamente.

Para o pino sem revestimento, de acordo com o EDS obtido, nota-se a presença do elemento Fe. Entretanto, não se pode afirmar que este seja oriundo de uma possível adesão do ferro fundido cinzento ou se do aço M2. Contudo, observa-se também a presença dos elementos C, Mo, V, W os quais podem sim ser atribuídos ao aço rápido. Por meio da análise da imagem do pino desgastado, sugere-se que o desgaste abrasivo foi predominante devido à presença de ranhuras na direção de deslizamento.

Já para os pinos apenas com revestimento e com tratamento duplex, pela análise das imagens e dos EDS, observa-se a presença dos elementos do revestimento como Cr, Al, Ti, Si, N propondo que não houve remoção do revestimento. Além disso, a ausência dos elementos do aço rápido indica que o substrato não foi exposto. A presença do elemento Fe sugere, apesar do baixo pico de intensidade, que a superfície do ferro fundido foi desgastada e o material então removido aderiu-se ao pino.

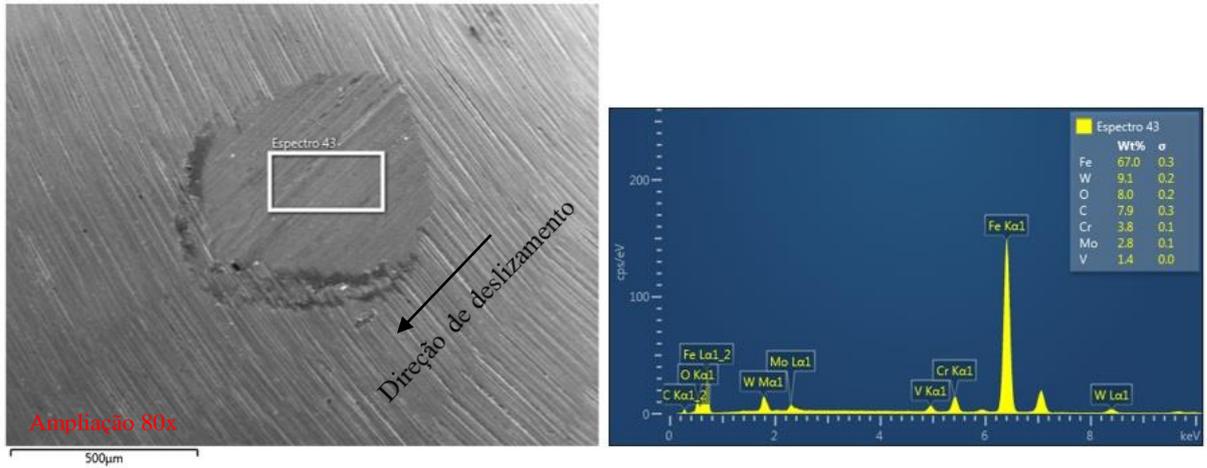


FIGURA 4.2: Imagem e análise EDS do pino sem revestimento - $V_c = 40$ m/min

FONTE: O autor

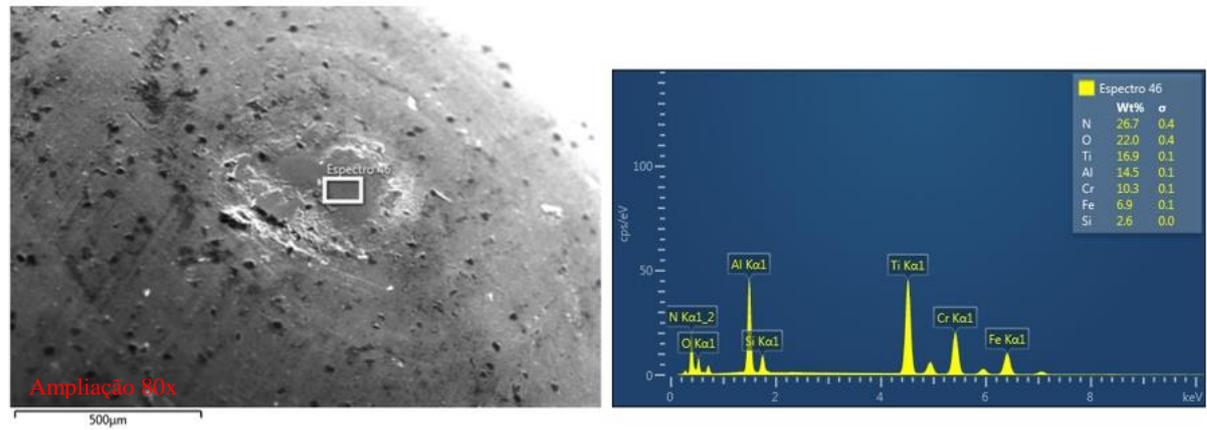


FIGURA 4.3: Imagem e análise EDS do pino revestido à base de AlCr - $V_c = 40$ m/min

FONTE: O autor

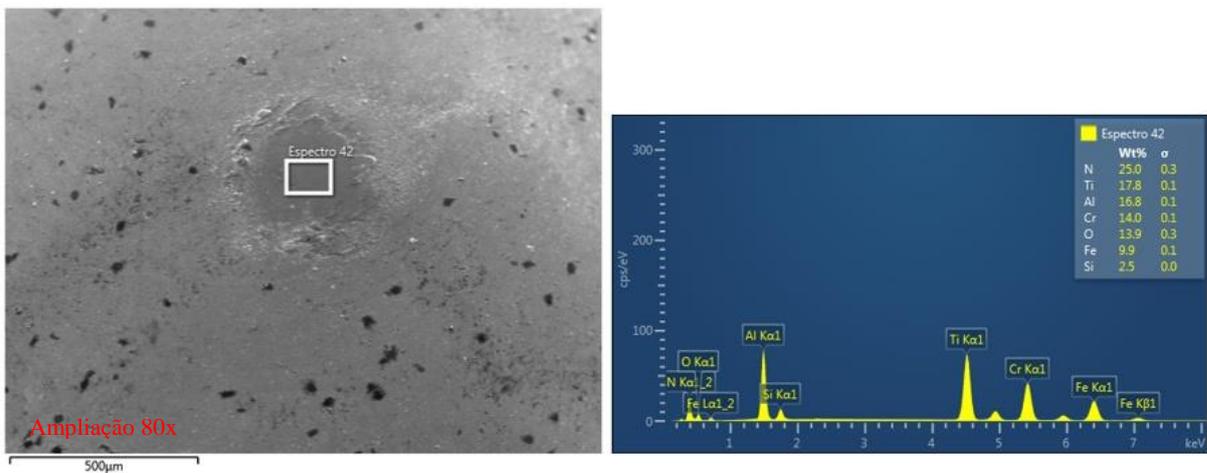


FIGURA 4.4: Imagem e análise EDS do pino com tratamento duplex - $V_c = 40$ m/min

FONTE: O autor

As superfícies desgastadas dos pinos sem revestimento, apenas com revestimento à base de AlCr e com tratamento duplex, na velocidade de deslizamento de 50 m/min, estão expostas nas FIG. 4.5, 4.6 e 4.7, respectivamente. Novamente, observa-se para o pino sem revestimento, de acordo com o EDS obtido, a presença do elemento Fe inferindo uma possível adesão do ferro fundido. Devido à presença de ranhuras na direção de deslizamento, pode-se deduzir que houve também desgaste abrasivo.

As imagens e EDS adquiridos dos pinos com revestimento e com tratamento duplex instilam que não houve remoção do revestimento uma vez que os elementos deste são evidenciados e não há indícios da exposição do substrato. A presença do elemento Fe novamente sugere que houve um desgaste de adesão na superfície do pino.

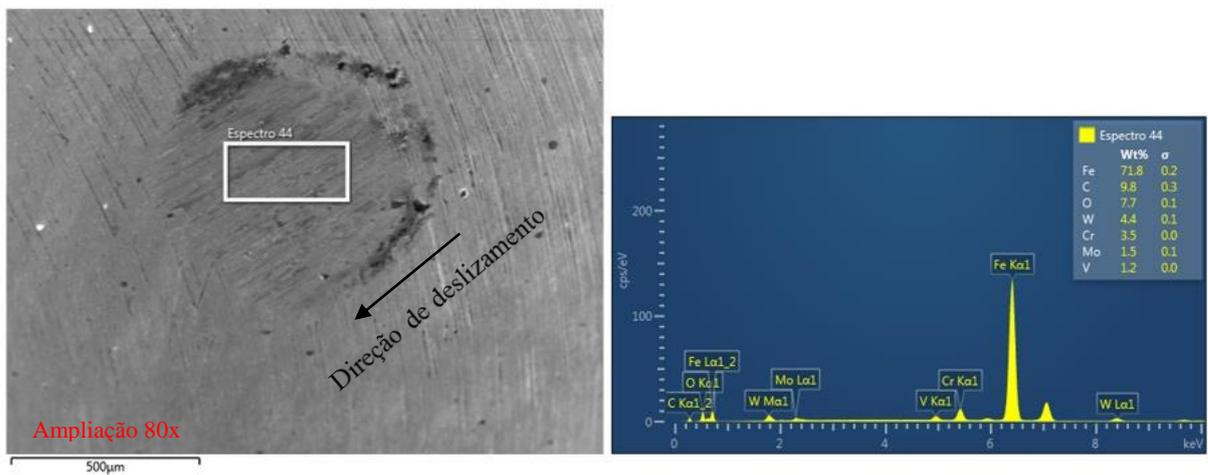


FIGURA 4.5: Imagem e análise EDS do pino sem revestimento - $V_c = 50$ m/min

FONTE: O autor

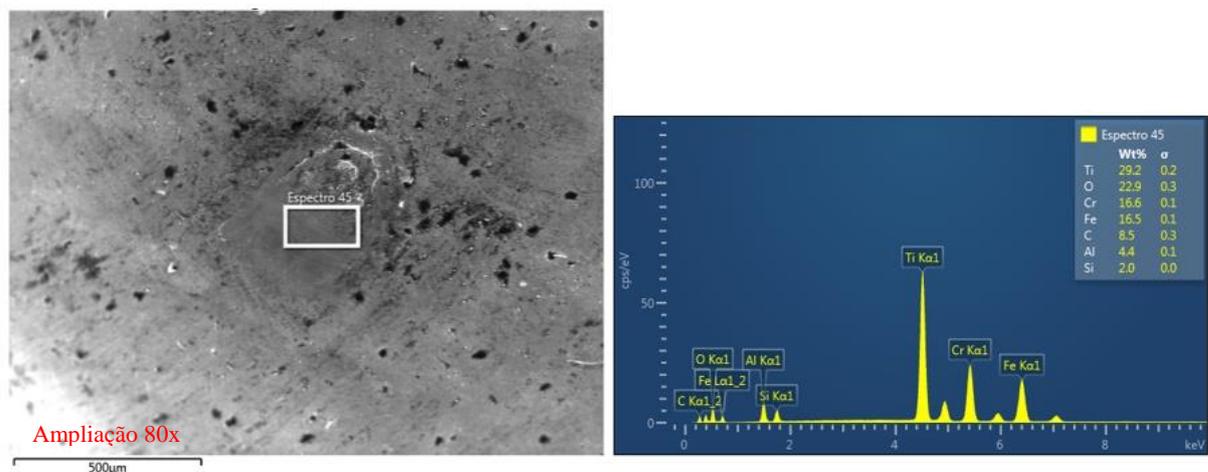


FIGURA 4.6: Imagem e análise EDS do pino revestido à base de AlCr - $V_c = 50$ m/min

FONTE: O autor

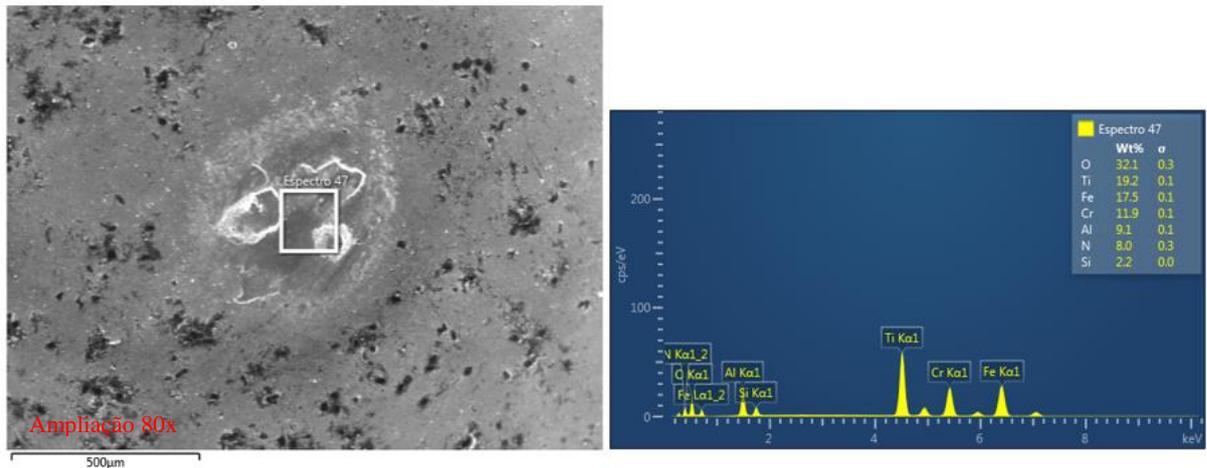


FIGURA 4.7: Imagem e análise EDS do pino com tratamento duplex - $V_c = 50$ m/min

FONTE: O autor

As FIG. 4.8, 4.9 e 4.10 mostram as superfícies desgastadas e EDS dos pinos sem revestimento, apenas com revestimento à base de AlCr e com tratamento duplex, nessa ordem, na velocidade de deslizamento de 60 m/min.

Na análise do EDS dos três pinos, verifica-se a presença do elemento Fe, que sugere adesão de material do corpo de prova. A presença dos elementos Cr, Al, Si, Ti nos EDS dos pinos com revestimento e com tratamento duplex indica que não houve remoção do revestimento. No pino sem revestimento nota-se ranhuras paralelas na região de desgaste, sugerindo desgaste abrasivo na superfície do pino.

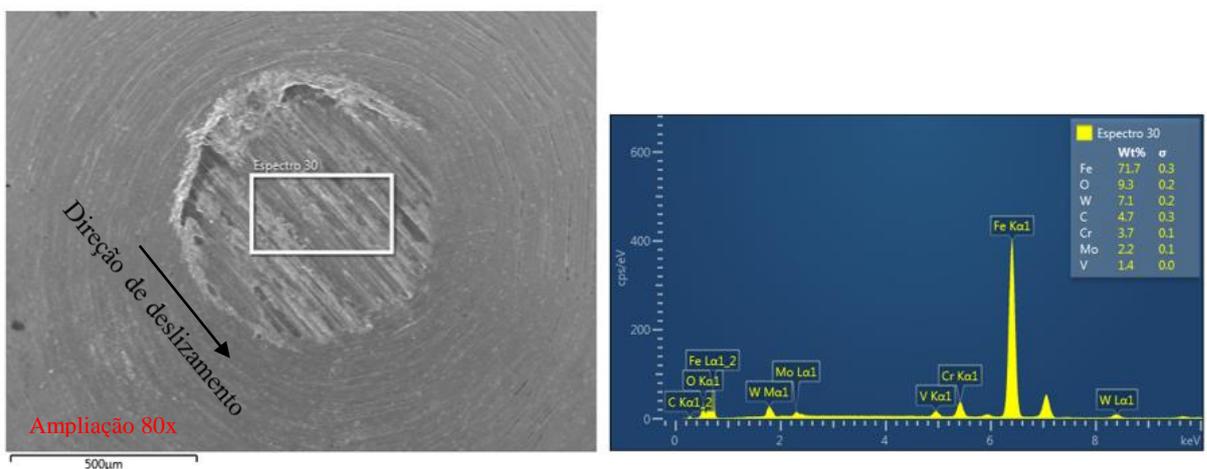


FIGURA 4.8: Imagem e análise EDS do pino sem revestimento - $V_c = 60$ m/min

FONTE: O autor

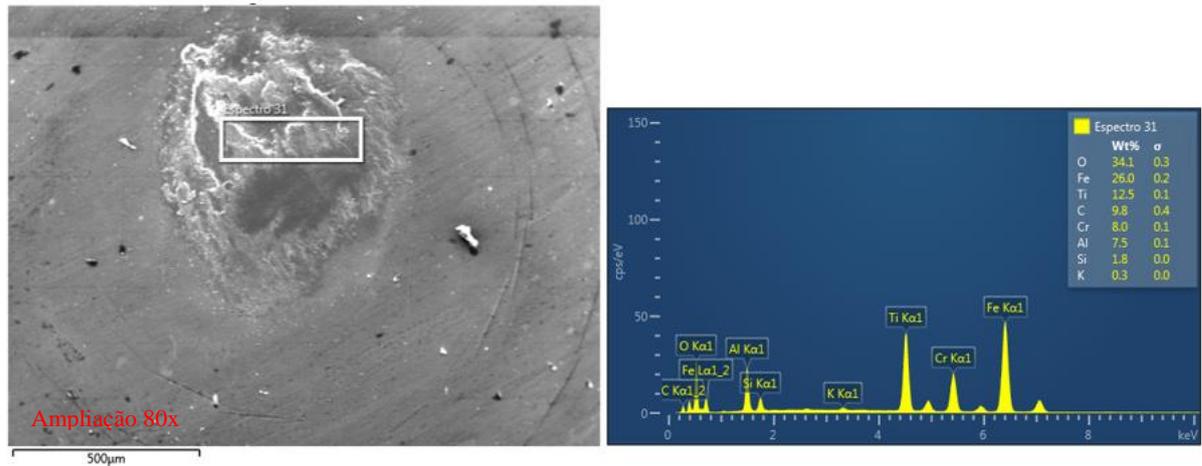


FIGURA 4.9: Imagem e análise EDS do pino revestido à base de AlCr - $V_c = 60$ m/min

FONTE: O autor

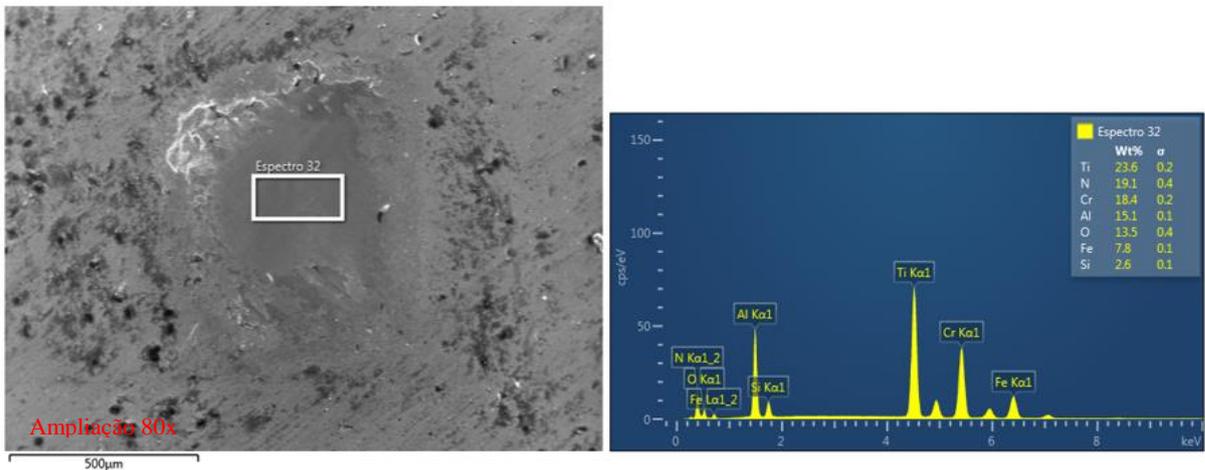


FIGURA 4.10: Imagem e análise EDS do pino com tratamento duplex - $V_c = 60$ m/min

FONTE: O autor

Imagens do desgaste e análise EDS dos pinos sem revestimento, apenas com revestimento à base de AlCr e com tratamento duplex também foram coletados na velocidade de 70 m/min, conforme FIG. 4.11, 4.12 e 4.13.

Por meio da imagem do desgaste e do EDS do pino sem revestimento, observa-se picos dos elementos do ferro fundido cinzento como Fe, C e Si sugerindo que houve um desgaste de adesão proveniente do ferro fundido. Notou-se a ausência dos elementos químicos do aço rápido, fato esse que comprova que ocorreu somente adesão de material na superfície do pino. Já para os pinos com revestimento e com tratamento duplex, foram observados comportamentos semelhantes aos descritos anteriormente para estas condições de pino em todas as velocidades testadas.

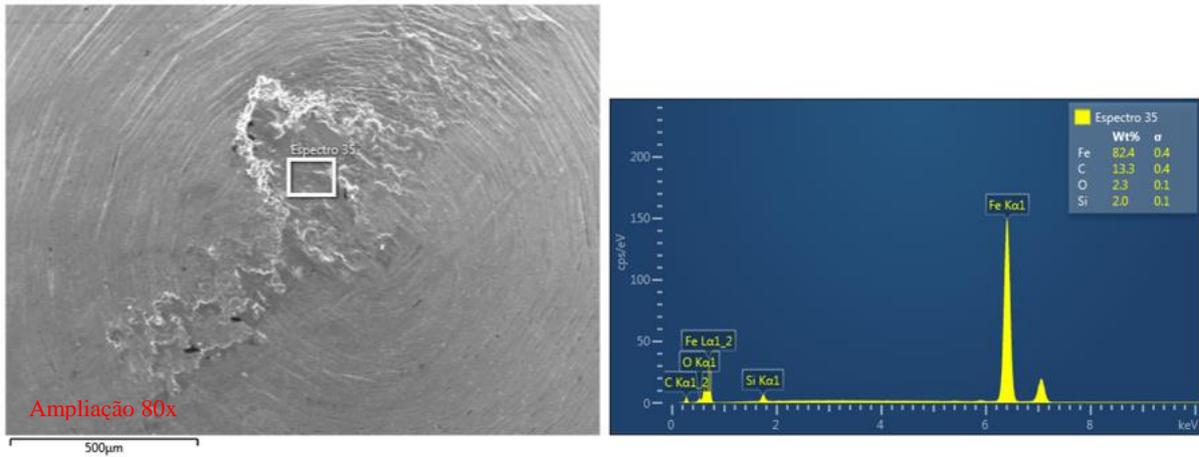


FIGURA 4.11: Imagem e análise EDS do pino sem revestimento - $V_c = 70$ m/min

FONTE: O autor

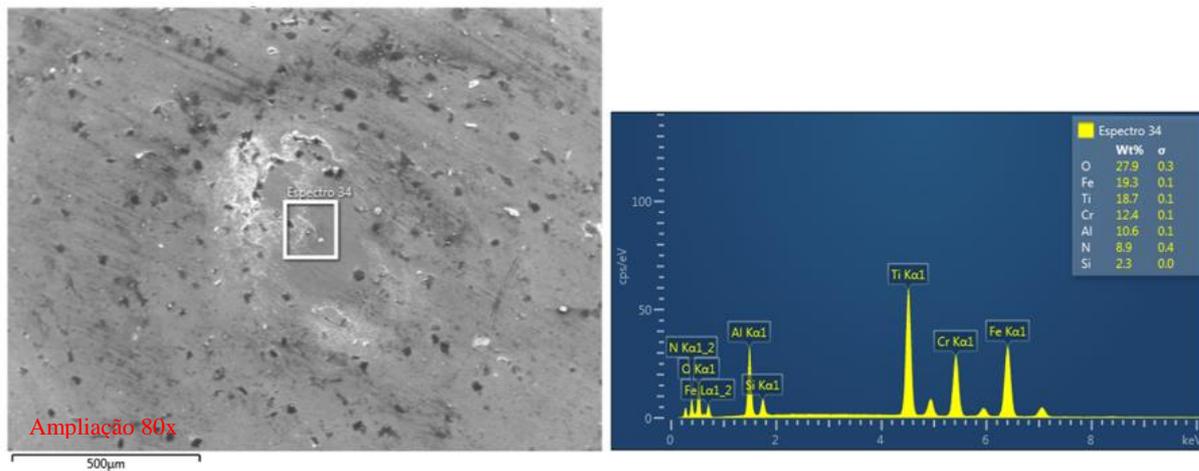


FIGURA 4.12: Imagem e análise EDS do pino revestido à base de AlCr - $V_c = 70$ m/min

FONTE: O autor

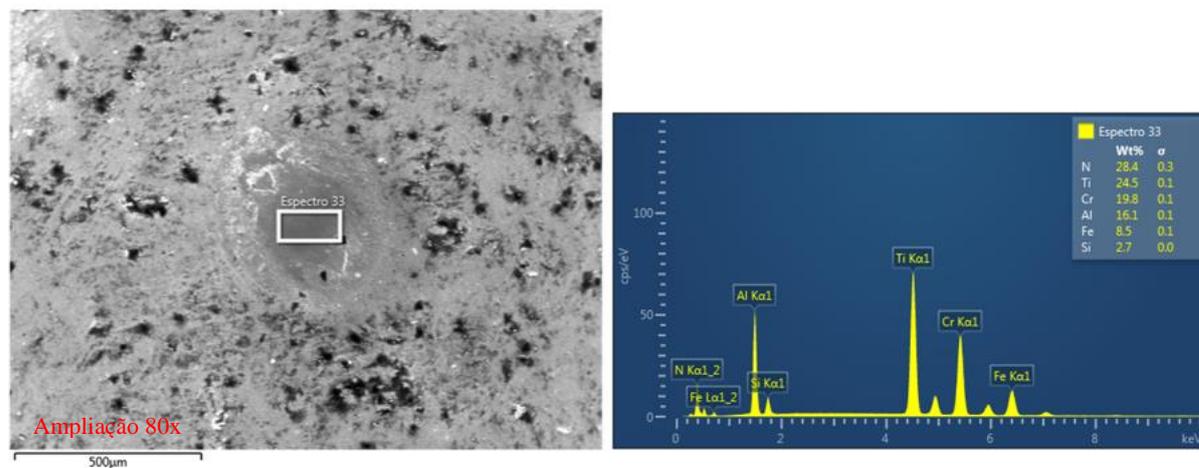


FIGURA 4.13: Imagem e análise EDS do pino com tratamento duplex - $V_c = 70$ m/min

FONTE: O autor

4.2.3 Análise das pistas

O QUADRO (4.1) apresenta as imagens das pistas e suas respectivas larguras considerando todos os testes tribológicos realizados. As maiores larguras foram registradas para os pinos sem revestimento, principalmente para a velocidade de 70 m/min. Além disso, as imagens das pistas destes pinos indicam que houve desgaste abrasivo devido à presença de ranhuras paralelas na direção de deslizamento.

Já as pistas dos pinos apenas com revestimento à base de AlCr e com tratamento duplex apresentam larguras com valores próximos e inferiores aos pinos sem revestimento nas respectivas velocidades de deslizamento.

Estudando a resistência ao desgaste do aço AISI 422 tratado termicamente, nitretado e com revestimentos aspergidos de carboneto de cromo-níquel, Bressan e Comeli (2007) constataram que o aço 422 nitretado também apresentou a menor largura da pista de desgaste e o desgaste da esfera desprezível.

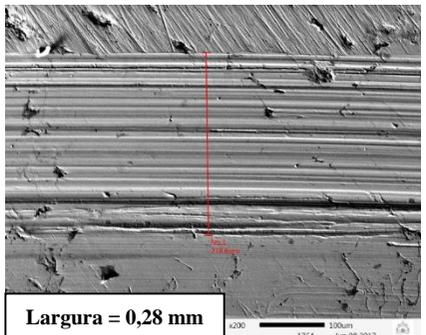
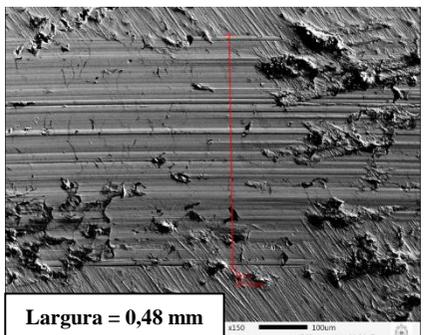
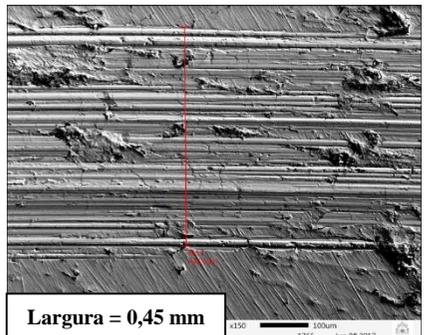
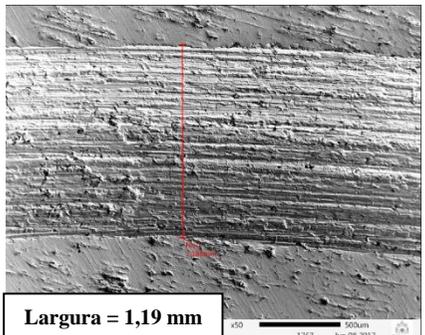
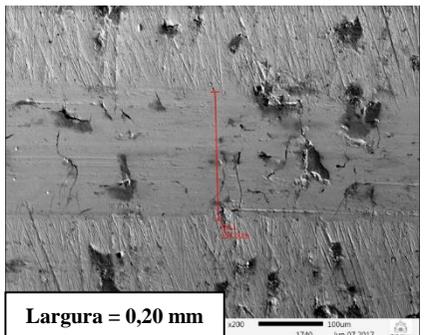
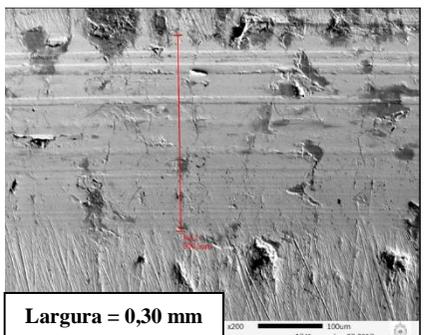
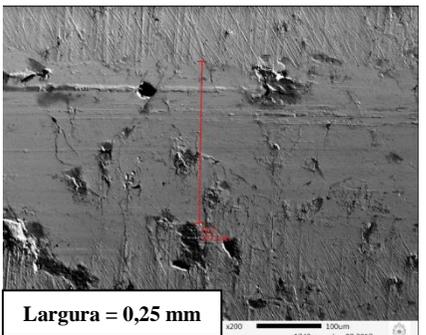
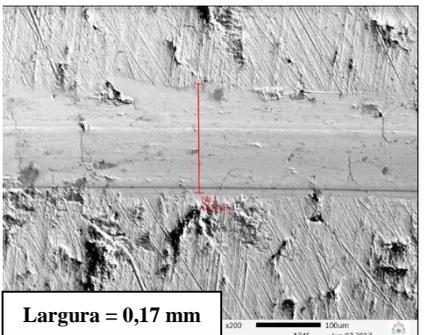
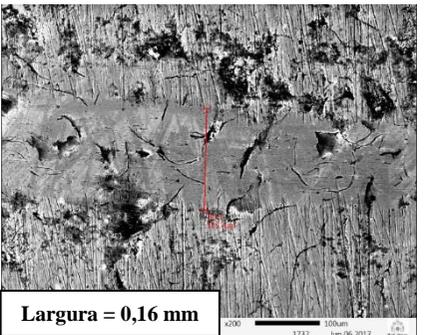
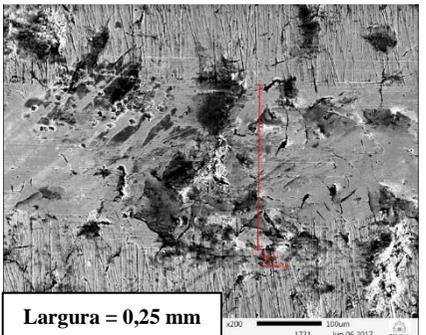
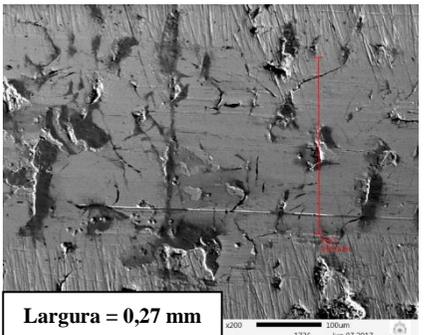
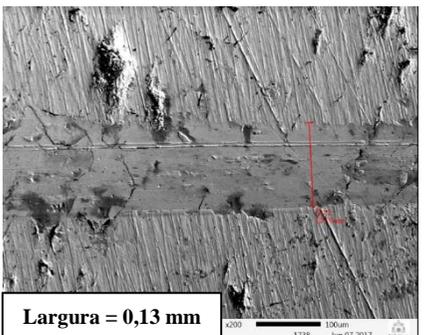
Em geral, a análise tribológica possibilitou avaliar o comportamento do tratamento duplex (nitretação mais revestimento à base de AlCr) depositado em substrato de aço rápido M2 deslizando sobre corpo de prova de ferro fundido cinzento FC 300.

O melhor desempenho pode ser atribuído ao par tribológico composto de pino com tratamento duplex sobre o corpo de prova em ferro fundido cinzento deslizando a uma velocidade de 70 m/min, evidenciado pelo baixo coeficiente de atrito, pelas análises do desgaste do pino e da pista.

Com relação ao revestimento à base de AlCr, apesar da variação da velocidade de deslizamento e os diversos fenômenos envolvidos nos pares tribológicos estudados, os resultados mostram que os revestimentos não foram removidos e apresentam uma boa resistência ao desgaste.

Além disso, é importante ressaltar que, do ponto de vista tribológico, a grafita presente nos ferros fundidos tem uma influência significativa no desgaste, pois age como um lubrificante sólido tanto no sistema lubrificado quanto no sistema a seco (TAKEUCHI *apud* TEIXEIRA, 2011).

QUADRO 4.1 - Imagem e largura das pistas dos testes tribológicos

	Vel. de deslizamento 40 m/min	Vel. de deslizamento 50 m/min	Vel. de deslizamento 60 m/min	Vel. de deslizamento 70 m/min
Pino sem revestimento	 <p>Largura = 0,28 mm</p>	 <p>Largura = 0,48 mm</p>	 <p>Largura = 0,45 mm</p>	 <p>Largura = 1,19 mm</p>
Pino com revestimento à base de AlCr	 <p>Largura = 0,20 mm</p>	 <p>Largura = 0,30 mm</p>	 <p>Largura = 0,25 mm</p>	 <p>Largura = 0,17 mm</p>
Pino com tratamento duplex	 <p>Largura = 0,16 mm</p>	 <p>Largura = 0,25 mm</p>	 <p>Largura = 0,27 mm</p>	 <p>Largura = 0,13 mm</p>

FONTE: O autor

4.3 Torque

A TAB. 4.1 apresenta a quantidade de furos obtidos até que o desgaste da broca se tornasse visivelmente excessivo nas diversas condições de corte utilizadas, exceto na velocidade de corte de 40 m/min. Cabe ressaltar que o avanço foi mantido constante (0,20 mm/rev) e a usinagem foi realizada sem fluido de corte.

TABELA 4.1 – Quantidade de furos usinados

Velocidade de corte	Material da ferramenta de corte		
	HSS	HSS + revestimento à base de AlCr	HSS + tratamento duplex
40 m/min	250	250	250
50 m/min	92	147	142
60 m/min	2	90	94
70 m/min	-	12	106

FONTE: O autor

Conforme descrito na metodologia experimental (seção 3.4) o torque foi adquirido no primeiro e sétimo furo para todas as condições dos testes e, quando o desgaste tornou-se visivelmente excessivo, nova furação foi realizada sobre o dinamômetro para obter o torque final. Sendo assim, a FIG. 4.14 mostra a evolução do torque (Mz) ao longo de todos os testes realizados.

Para a velocidade de corte de 40 m/min nota-se que o valor de torque obtido para cada furo selecionado foi praticamente o mesmo e, além disso, é percebido que este se manteve praticamente constante ao longo do teste para todas as condições da ferramenta.

Na velocidade de corte de 50 m/min observa-se um leve aumento do torque para a condição de broca sem revestimento. Já para as brocas apenas com revestimento à base de AlCr e com tratamento duplex, a diferença notável no torque ocorreu para os últimos furos, isto é, furo de número 147 para a broca apenas com revestimento e furo de número 142 para a broca com tratamento duplex, em que a broca apenas com revestimento apresentou um maior torque. Esse fato pode estar relacionado ao maior desgaste da broca.

A diferença notável no valor do torque obtido para a broca sem revestimento utilizando velocidade de corte de 60 m/min pode ser atribuída às condições de corte mais severas comprovadas pela quantidade de furos usinados nesta condição. Com relação às brocas com revestimento à base de AlCr e com tratamento duplex na mesma velocidade, nota-se,

novamente, que o valor do torque obtido para cada furo selecionado foi praticamente o mesmo e a curva do torque ao longo do teste para cada condição de broca se manteve praticamente constante.

Os testes de furação para a velocidade de corte de 70 m/min foram feitos apenas utilizando brocas com revestimento e com tratamento duplex. A broca sem revestimento foi desconsiderada tendo em vista os resultados obtidos para a velocidade de 60 m/min. Nota-se valores semelhantes de torque para os primeiros furos. Entretanto, a broca com tratamento duplex apresentou um melhor desempenho em termos de quantidade de furos usinados.

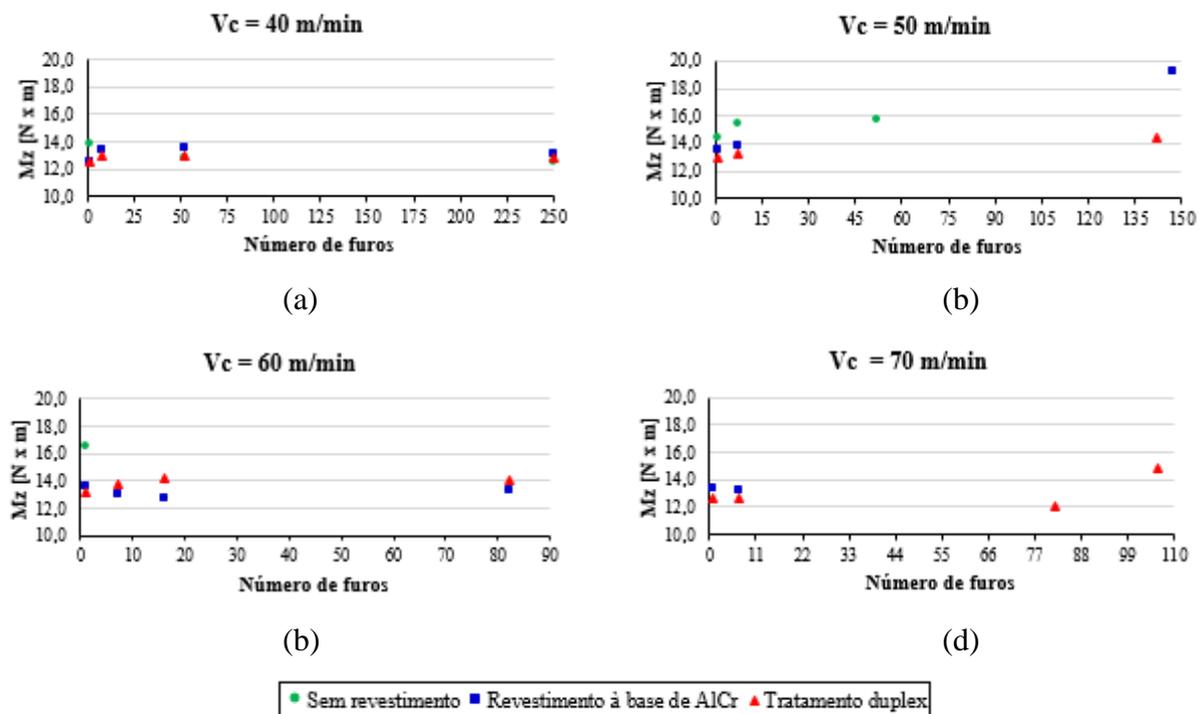


FIGURA 4.14: Evolução do torque (M_z) ao longo dos testes nas diferentes condições de corte estudadas: (a) $V_c = 40 \text{ m/min}$, (b) $V_c = 50 \text{ m/min}$, (c) $V_c = 60 \text{ m/min}$ e (d) $V_c = 70 \text{ m/min}$

FONTE: O autor

Em geral, pode-se deduzir que o aumento da velocidade de corte não contribui de forma significativa para a variação do torque, fato este também enfatizado por Astakhov (2014) e pelos trabalhos de Barbosa *et al.* (2009) em que o torque foi influenciado significativamente apenas pela variação do avanço e Da Silva (2016), o qual relatou, por meio dos testes realizados, que tanto a força de avanço quanto o torque, quando se varia a velocidade de corte, mantêm praticamente constantes, ou seja, a variação da velocidade não influencia significativamente estes parâmetros.

De acordo com Santos e Sales (2007) a força de corte sofre pouca influência da velocidade de corte devido à redução da tensão de cisalhamento resultante da crescente temperatura nas zonas de cisalhamento primária e secundária que, por sua vez, são consequência da taxa de deformação do material da peça. Eles ainda enfatizam que o aumento dos dois fatores, avanço e profundidade de corte, causa um aumento da força de usinagem, numa proporção direta, quase que linear, pois torna maior a área das zonas de cisalhamento primária e secundária.

Para avaliar se houve influência nos valores de torque decorrente do tratamento duplex comparado aos testes realizados com brocas apenas com revestimento à base de AlCr foi utilizado a ANOVA considerando um nível de significância de $\alpha = 0,05$, isto é, um intervalo de confiança de 95%. O resultado completo dessa análise pode ser visto no Apêndice B. A TAB. 4.2 mostra apenas o p-valor para os efeitos principais e os efeitos combinados.

TABELA 4.2 – ANOVA para o torque (velocidade de corte e ferramenta)

Fonte	p-valor
Velocidade de corte	0,078
Ferramenta	0,050
Velocidade de corte * Ferramenta	0,331

FONTE: O autor

Pode-se notar que tanto a velocidade de corte quanto a interação de segunda ordem, apresentaram um p-valor maior comparado ao nível de significância de 0,05, ou seja, não são significativos dentro do intervalo de confiança estudado. Entretanto, a ferramenta apresentou um p-valor que não pode ser rejeitado pois se encontra no limite entre aceitar ou rejeitar a significância desse parâmetro. Sendo assim, o GRA. 4.8 apresenta o efeito principal destacando uma possível influência desse parâmetro no torque.

Ao analisar o valor de R^2 (70,6 %) e R^2 ajustado (44,9%), obtidos por meio da análise de variância, verifica-se uma diferença de aproximadamente 26%, evidenciando que os fatores utilizados para explicar a variação do torque foram insuficientes e que possivelmente a introdução de novos fatores permitirá um maior grau de adequação do modelo ao nível de significância de 5%. Entretanto, o nível de explicação do modelo para a variação do torque foi de 70,6%, o qual não implica necessariamente que o modelo seja ruim, mas sim que ele possa ser melhorado.

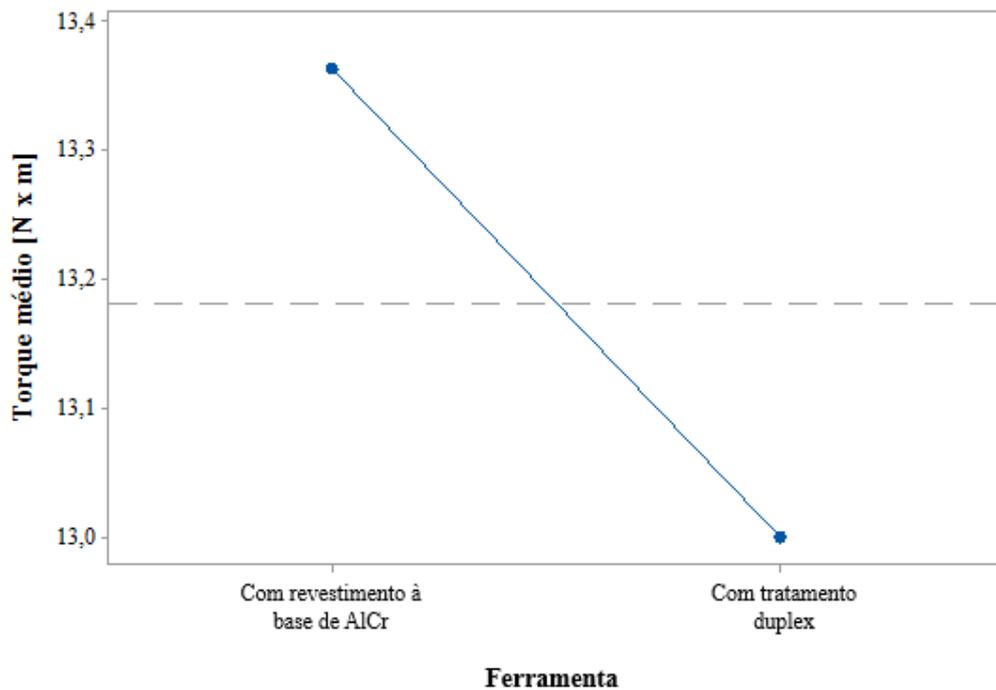


GRÁFICO 4.8: Efeitos principais para o torque

FONTE: O autor

Sendo assim faz-se necessário garantir que a distribuição de probabilidade associada ao conjunto de dados de torque pode ser aproximada pela distribuição normal. Para o teste de normalidade foi utilizado o teste de Anderson-Darling, o qual apresenta as seguintes hipóteses:

- H_0 (hipótese nula): os dados seguem uma distribuição específica;
- H_1 (hipótese alternativa): os dados não seguem uma distribuição específica.

Se o valor de p for menor que o nível de significância (α) escolhido, rejeita-se a hipótese nula de que os dados seguem determinada distribuição. O GRA. 4.9 apresenta o gráfico de probabilidade normal dos resíduos bem como as saídas do teste de Anderson-Darling para os dados de torque. É possível observar que os valores dos resíduos estão distribuídos ao longo da linha reta de distribuição normal. Como o p-valor (0,543) é maior comparado ao nível de significância ($\alpha = 0,05$), aceita-se a hipótese nula confirmando assim que os dados seguem a distribuição normal. Segundo Barros Neto *et al.* (2010), a análise dos resíduos é fundamental para avaliar a qualidade e o grau de ajuste do modelo às observações.

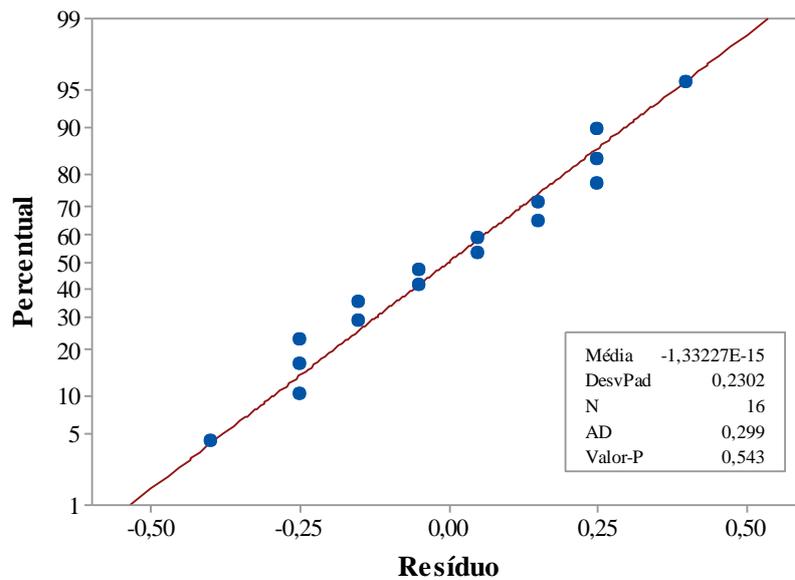


GRÁFICO 4.9: Gráfico de probabilidade normal para o torque

FONTE: O autor

A FIG. 4.15 apresenta os resíduos padronizados para o modelo de regressão gerado. A estimação dos parâmetros do modelo requer a suposição de que os erros sejam variáveis aleatórias, independentes entre si e não correlacionadas. Na FIG. 4.15 (a) nenhuma tendência específica é notada quando se observa a variação dos resíduos ao redor da linha de referência. Apesar da simetria apresentada, este comportamento pode ser 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 (v_c e ferramenta) eram iguais. Já na FIG. 4.15 (b) é possível observar que os resíduos estão distribuídos aleatoriamente em relação ao tempo e não exibem um padrão óbvio.

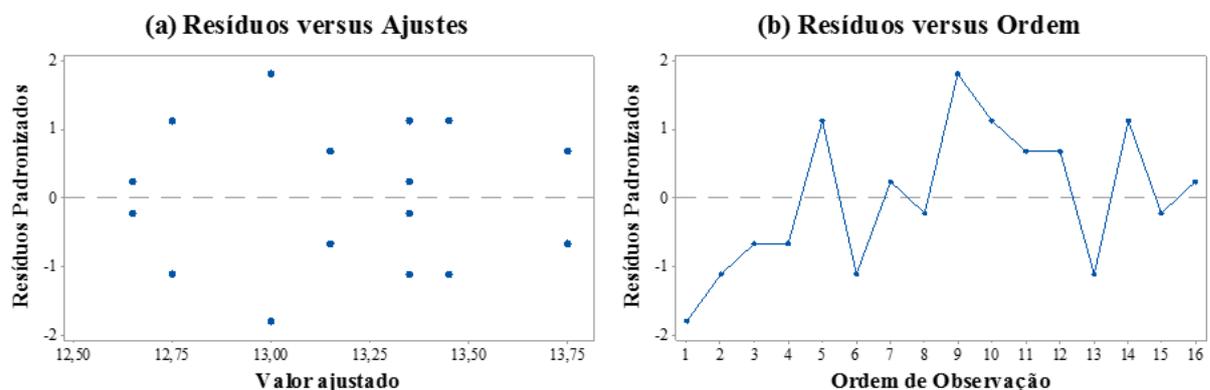


FIGURA 4.15: (a) Resíduos versus valor ajustado e (b) Resíduos versus Ordem

FONTE: O autor

Logo, os gráficos de resíduos apresentados na FIG. 4.15 permitem afirmar que os erros decorrentes do modelo são aleatórios e que a regressão gerada pela ANOVA pode ser confirmada.

4.4 Qualidade dos furos usinados

Com o intuito de avaliar a influência dos parâmetros de entrada na qualidade dos furos usinados, optou-se por utilizar a análise gráfica dos dados referente à rugosidade (R_a), diâmetro médio e erro de circularidade.

4.4.1 Rugosidade – R_a

O GRA. 4.10 apresenta os valores de desvio médio aritmético R_a ao longo dos testes realizados com velocidade de corte de 40 m/min. Nota-se que os valores de rugosidade média mais baixos foram obtidos com as brocas apenas com revestimento à base de AlCr e com tratamento duplex, apresentando curvas semelhantes a partir do comprimento usinado de 3125 mm correspondente a 125 furos. A broca sem revestimento apresentou os piores resultados, em termos de valor de rugosidade mais elevados, até a medição que corresponde a 3750 mm de comprimento usinado.

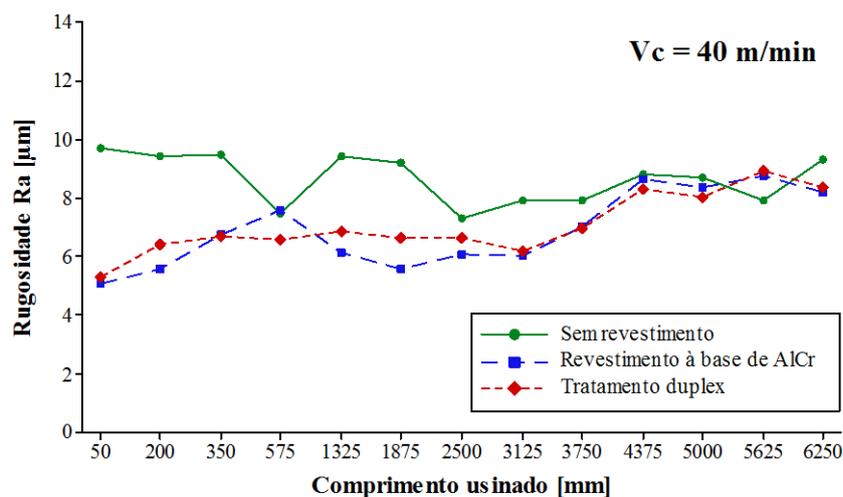


GRÁFICO 4.10: Rugosidade dos furos usinados com $V_c = 40$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev

FONTE: O autor

À velocidade de corte de 50 m/min observa-se, por meio do GRA. 4.11, que os furos usinados com a broca sem revestimento apresentaram valores de rugosidade média R_a mais elevados se comparado aos resultados obtidos com a utilização de brocas apenas com revestimento e com tratamento duplex. O melhor resultado (valores de rugosidade mais baixos) foi conseguido com a broca com tratamento duplex, apresentando uma curva mais estável comparada às demais ao longo do comprimento usinado.

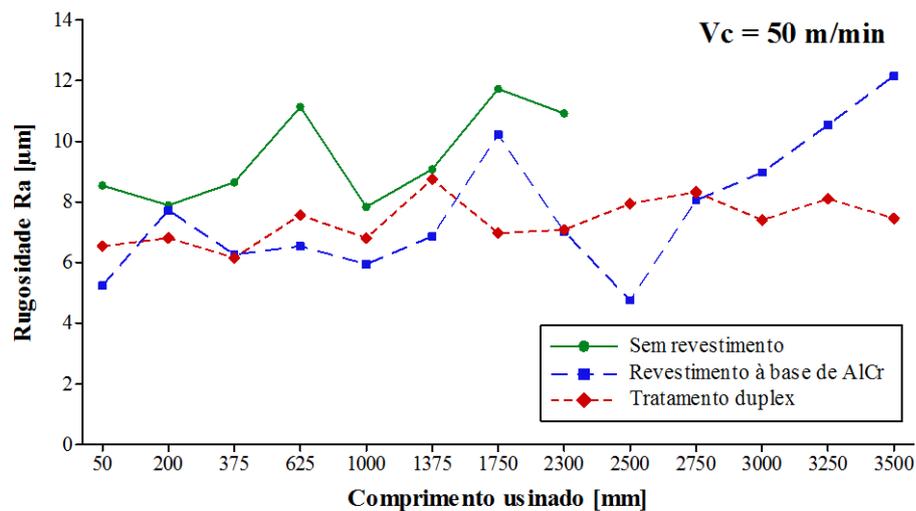


GRÁFICO 4.11: Rugosidade dos furos usinados com $V_c = 50$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev

FONTE: O autor

Os valores de R_a obtidos utilizando velocidade de corte de 60 m/min estão detalhados no GRA. 4.12. Novamente, o maior valor de R_a foi apresentado pelo furo usinado com a broca sem revestimento. Nessa velocidade, os melhores resultados (menores valores de R_a) foram conseguidos por meio da utilização da broca apenas com revestimento à base de AlCr.

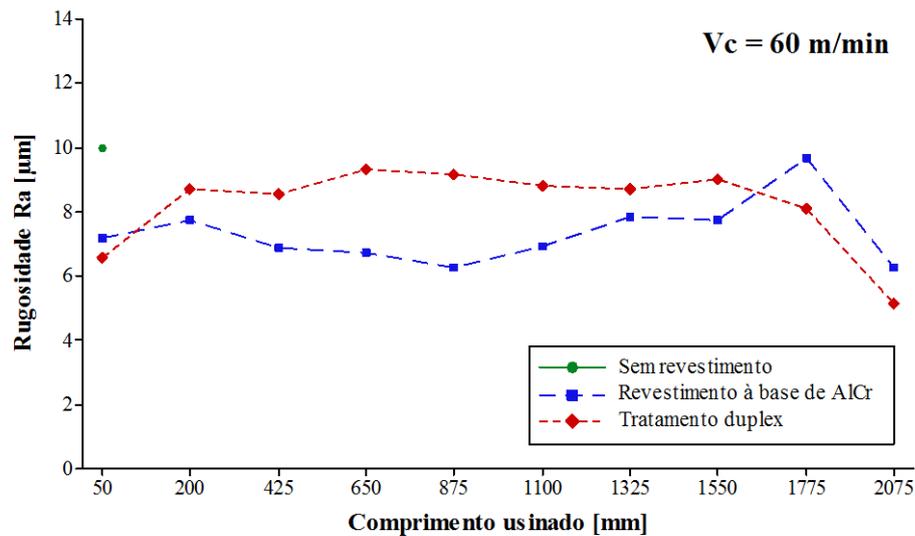


GRÁFICO 4.12: Rugosidade dos furos usinados com $V_c = 60$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev

FONTE: O autor

Já o GRA. 4.13 mostra a evolução da rugosidade média dos furos usinados utilizando brocas com revestimento e com tratamento duplex a uma velocidade de corte de 70 m/min no decorrer do comprimento usinado.

Uma grande diferença nos valores de R_a pode ser constatada entre as duas condições de broca e, apesar do maior comprimento usinado pela broca com tratamento duplex, esta apresentou valores muito elevados de rugosidade superficial comparado aos valores obtidos pela broca apenas com revestimento.

Esperava-se obter melhores resultados, isto é, valores mais baixos de R_a , com a utilização de brocas com tratamento duplex nas maiores velocidades de corte (60 e 70 m/min) uma vez que, por meio das análises tribológicas apresentadas na seção 4.2, menores coeficientes de atrito foram conseguidos utilizando pares de materiais e velocidade de deslizamento semelhantes a esses testes de furação e a expectativa da diminuição do atrito entre o material da peça e a broca também era esperada. Entretanto, esse fato não ocorreu nos testes de furação. De acordo com os estudos de Marmentini (2009), com a diminuição do atrito entre o material da peça e a broca, reduz-se também os esforços de usinagem, diminuindo as vibrações na broca resultando em um melhor acabamento superficial dos furos usinados.

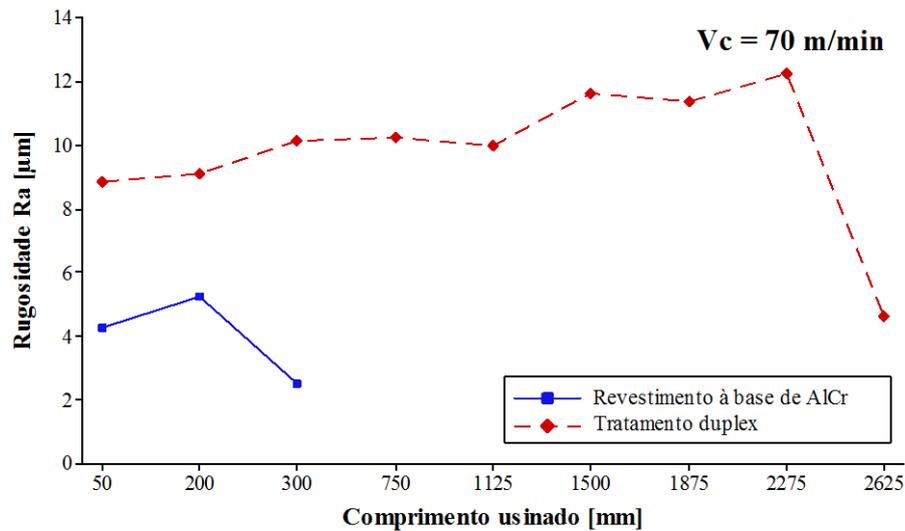
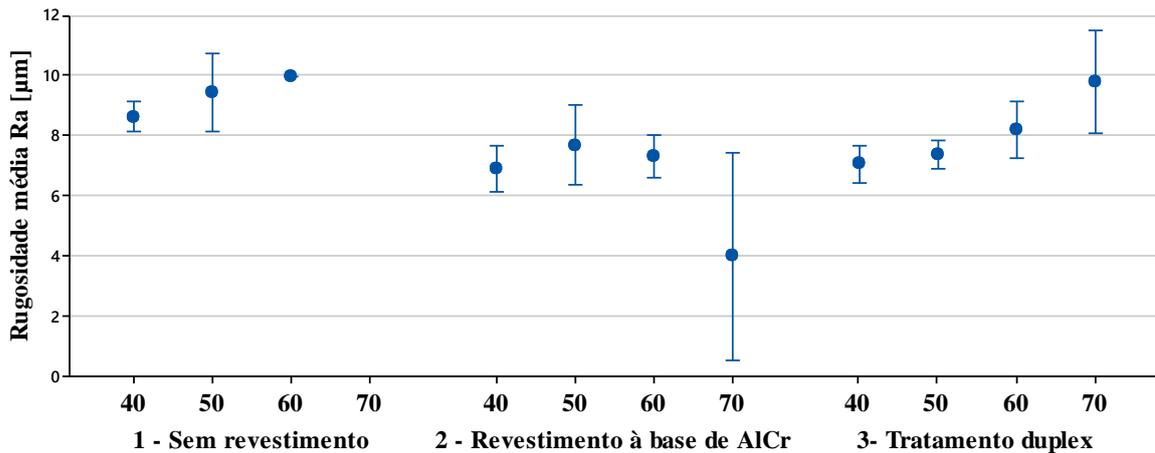


GRÁFICO 4.13: Rugosidade dos furos usinados com $V_c = 70$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev

FONTE: O autor

O GRA. 4.14 resume, de forma sucinta, a variação da rugosidade R_a em função das variáveis velocidade de corte e material da ferramenta. Quando se aumenta a velocidade de corte, espera-se obter um melhor acabamento superficial decorrente, normalmente, pelo desaparecimento da aresta postiça de corte (quando existente sob baixas velocidades de corte) e pela redução da resistência ao cisalhamento do material da peça provocada pela elevação da temperatura, promovendo a redução das forças de usinagem e, conseqüentemente, a melhoria do acabamento. No entanto, os valores de R_a obtidos, de modo geral, não apresentaram tal comportamento.

No que diz respeito à ferramenta, os maiores valores de rugosidade foram encontrados para as brocas sem revestimento. Em contrapartida, as menores rugosidades foram obtidas para as ferramentas revestidas, comprovando que os revestimentos melhoram consideravelmente a qualidade do furo. Com relação ao tratamento duplex, este exibiu um bom desempenho a baixas velocidades de corte (40 e 50 m/min), obtendo rugosidades médias inferiores às superfícies usinadas com brocas apenas revestidas. Resultados semelhantes do uso dos tratamentos duplex (nitretação seguida de revestimento) foram encontrados por Dos Santos (2015) o qual constatou uma redução na rugosidade tanto do parâmetro R_a quanto no R_z quando comparado às amostras somente revestidas.



Os desvios padrão individuais foram usados para calcular os intervalos.

GRÁFICO 4.14: Variação da rugosidade Ra em função da velocidade de corte e da ferramenta

FONTE: O autor

4.4.2 Diâmetro médio dos furos

Os GRA. 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18 mostram a variação do diâmetro médio dos furos ao longo dos testes realizados nos diferentes parâmetros considerados.

No que concerne à ferramenta, as sem revestimento foram as que apresentaram maior variação dimensional nas velocidades de corte de 40 e 50 m/min. Isso pode estar relacionado a uma provável tendência do material da peça de trabalho de se aderir à superfície da broca e, em geral, pelos maiores esforços de corte exigidos para estas condições (usinagem sem revestimento e sem fluido de corte).

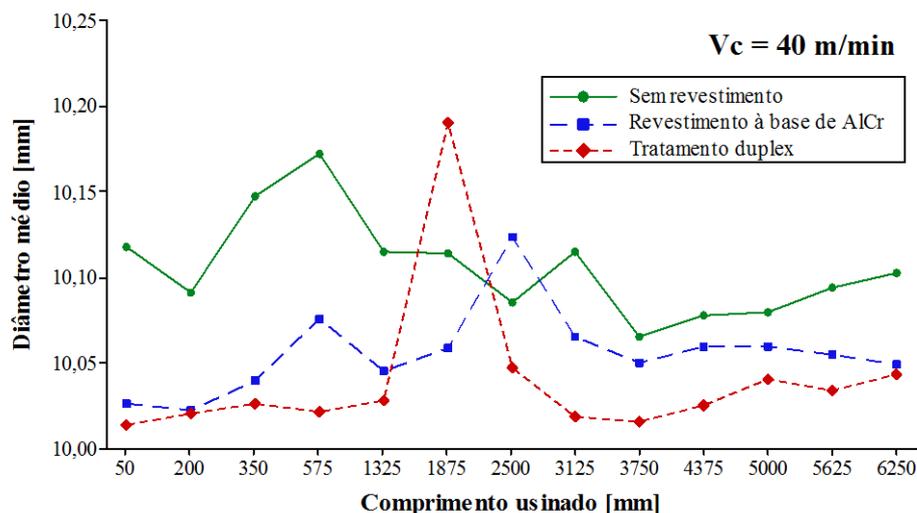


GRÁFICO 4.15: Diâmetro médio dos furos usinados com $V_c = 40$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev

FONTE: O autor

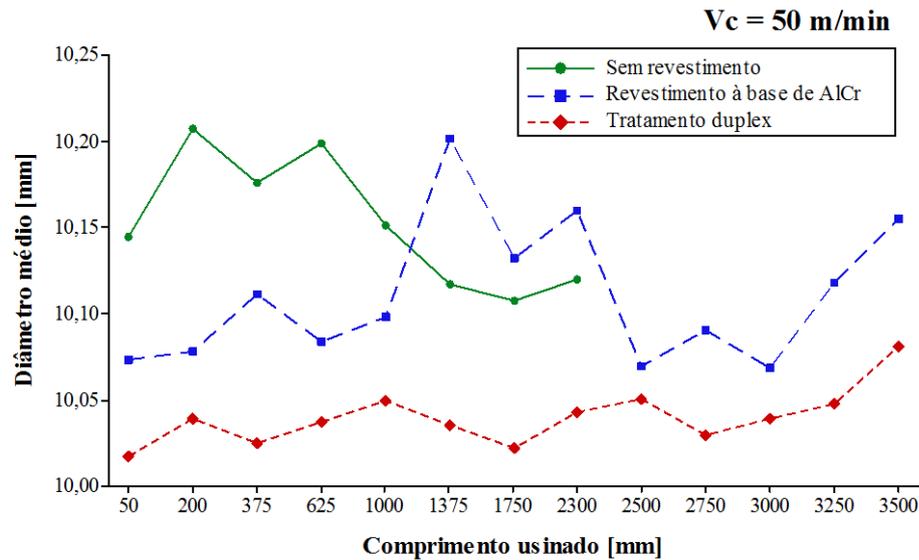


GRÁFICO 4.16: Diâmetro médio dos furos usinados com $V_c = 50$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev

FONTE: O autor

A ausência de dados referente ao diâmetro médio dos furos usinados com brocas sem revestimento nas velocidades de corte de 60 e 70 m/min (GRA. 4.17 e 4.18) pode ser justificada pela alta velocidade de corte empregada a estas ferramentas (sem revestimento e sem a utilização de fluido de corte) que, por serem submetidas a esforços extremamente severos, chegam ao fim de vida muito rapidamente (na velocidade de corte de 70 m/min a broca sem revestimento nem foi testada tendo em vista seu desempenho a 60 m/min).

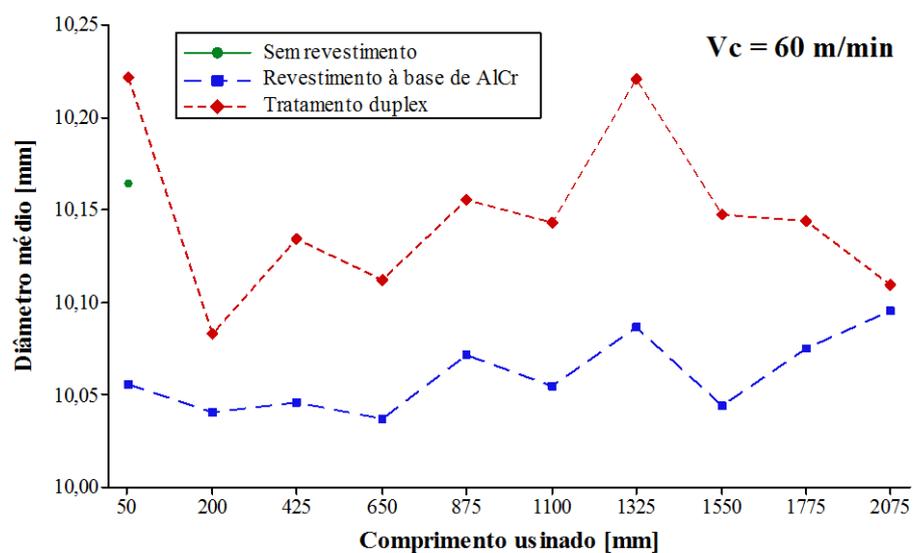


GRÁFICO 4.17: Diâmetro médio dos furos usinados com $V_c = 60$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev

FONTE: O autor

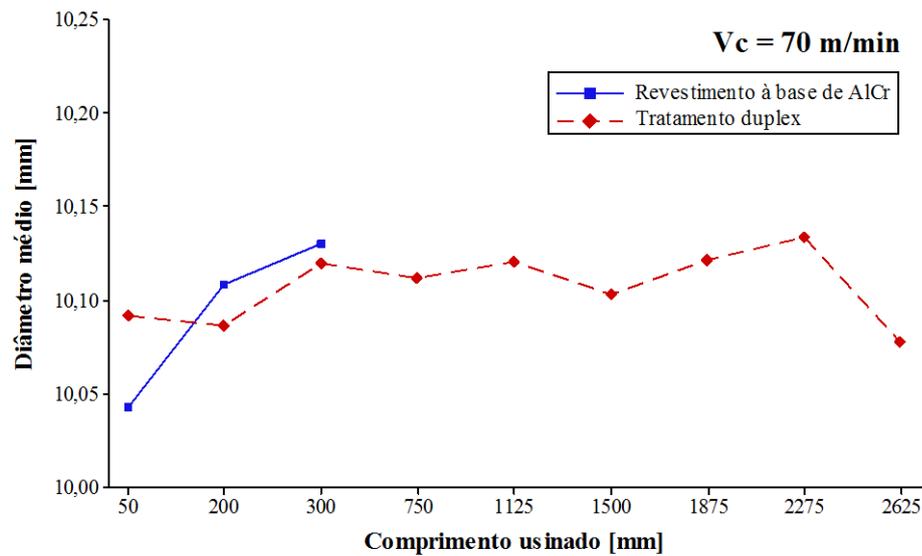


GRÁFICO 4.18: Diâmetro médio dos furos usinados com $V_c = 70$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev

FONTE: O autor

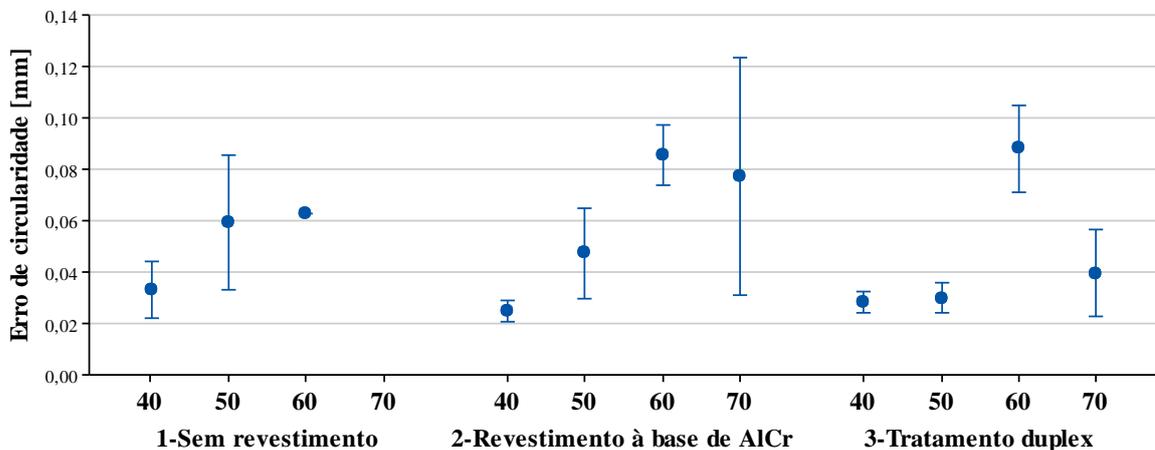
Em geral, a aplicação de revestimentos bem como a utilização de tratamento duplex contribuem para um melhor desempenho das ferramentas de corte, pois diminuem o atrito entre a interface peça de trabalho e ferramenta além de facilitar o escoamento do cavaco, auxiliando na minimização dos esforços de corte e assim, assegurando menores variações dimensionais quando comparadas às ferramentas não revestidas. Segundo Marques (2012), uma possível justificativa para os valores de diâmetro das brocas revestidas serem menores comparado às brocas sem revestimento é a facilidade de escoamento do cavaco pela interface cavaco/ferramenta, além do menor desgaste das ferramentas, que pode ser diferente entre arestas da mesma broca, devido a possíveis inclusões e variações de estrutura metalográfica do corpo de prova. O desgaste desigual das arestas pode ocasionar esforços desiguais da ferramenta durante o corte aumentando assim o diâmetro do furo.

4.4.3 Erro de circularidade

Por meio do GRA. 4.19 referente à variação do erro de circularidade em função da velocidade de corte e ferramenta, as seguintes observações podem ser notadas: nas velocidades de corte de 40 e 50 m/min verifica-se uma melhoria, em termos de menor variação dos desvios, utilizando ferramentas com tratamento duplex comparado às ferramentas sem revestimento e às ferramentas apenas com revestimento à base de AlCr. Na velocidade de corte de 60 m/min a broca sem revestimento não apresenta desvio padrão tendo em vista a quantidade de furos

usinados (2 furos) e mensurados (1 furo). Sendo assim, a análise comparativa foi realizada entre os erros de circularidade dos furos usinados com as brocas apenas revestidas e com tratamento duplex. Observa-se que não há diferença significativa entre os eles. Já na velocidade de corte de 70 m/min, novamente nota-se um desempenho superior, em termos de menor erro dimensional e menor desvio padrão, dos furos usinados com a broca com tratamento duplex comparado aos realizados pelas brocas apenas com revestimento.

Outro ponto importante a ser destacado é o aumento do erro de circularidade com o aumento da velocidade de corte, resultados estes que vão em contradição aos obtidos por Paiva Jr. *et al* (2013) os quais observaram por meio de seus estudos que, em um dado sistema de revestimento, maior a velocidade de corte, melhor a circularidade.



Os desvios padrão individuais foram usados para calcular os intervalos.

GRÁFICO 4.19: Variação do erro de circularidade em função da velocidade de corte e da ferramenta

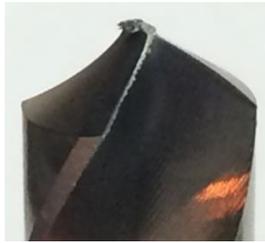
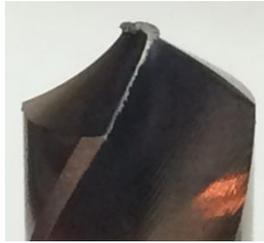
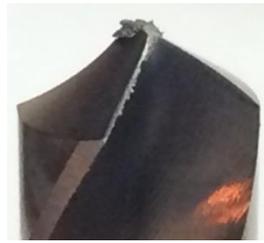
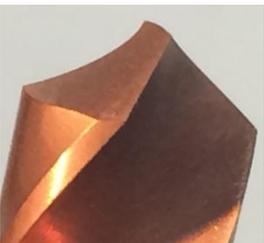
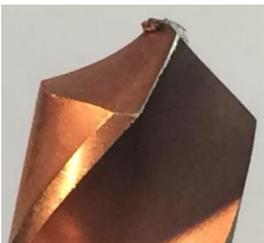
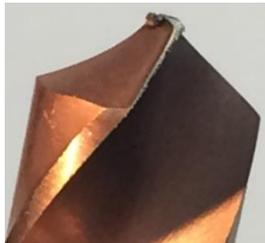
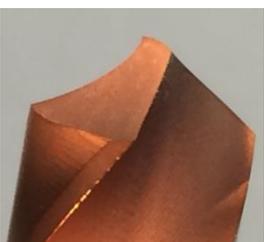
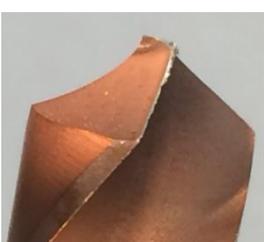
FONTE: O autor

4.5 Desgaste das ferramentas de corte

O desgaste das brocas foi analisado de forma qualitativa e imagens coletadas no decorrer dos testes registraram o desgaste gradativo das mesmas.

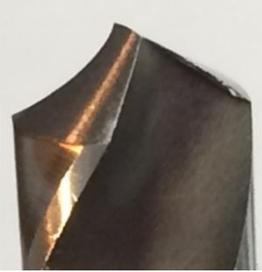
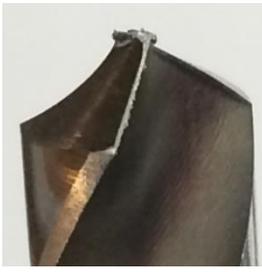
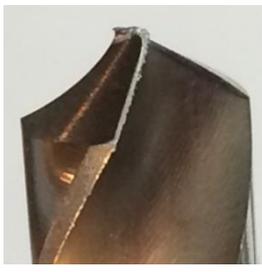
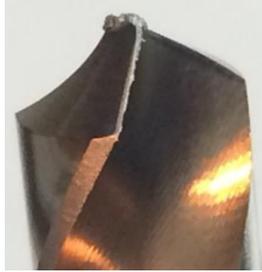
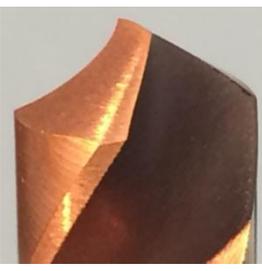
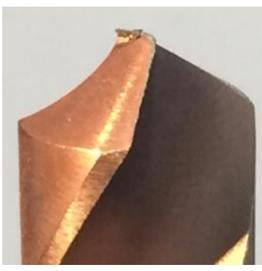
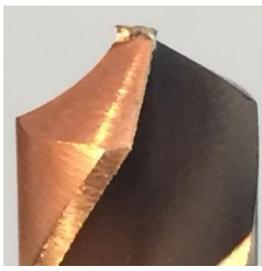
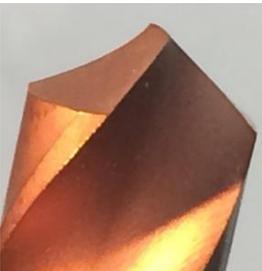
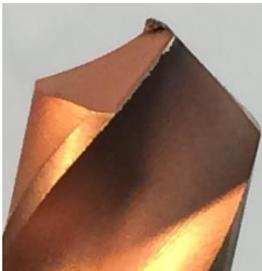
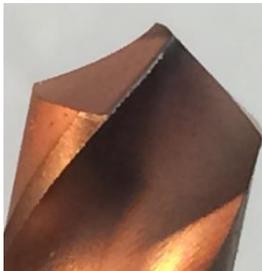
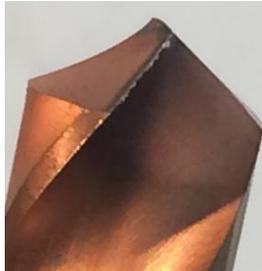
Os QUADRO (4.2), (4.3), (4.4) e (4.5) apresentam as imagens obtidas das pontas das brocas sem revestimento, apenas com revestimento à base de AlCr e com tratamento duplex nas velocidades de corte testadas (40, 50, 60 e 70 m/min).

QUADRO 4.2 – Imagens do desgaste gradativo das brocas $V_c = 40$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev

	Comprimento usinado [mm]					10 mm
	0	1300	2550	3800	5000	6250
Broca sem revestimento						
Broca com revestimento à base de AlCr						
Broca com tratamento duplex						

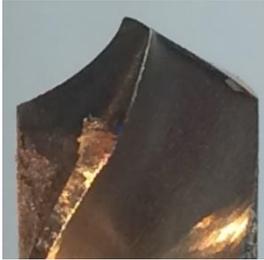
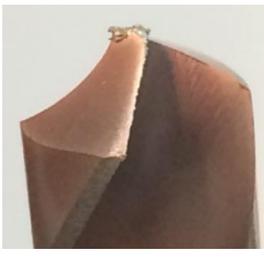
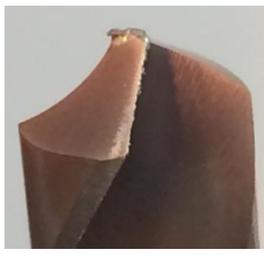
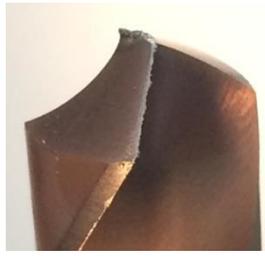
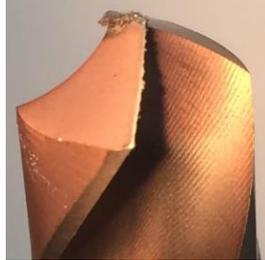
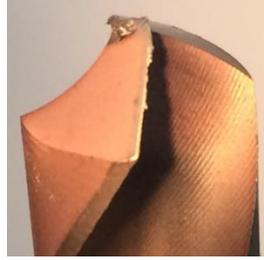
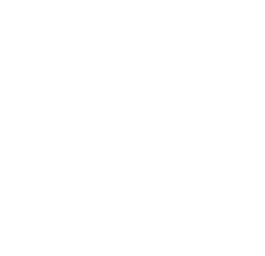
FONTE: O autor

QUADRO 4.3 – Imagens do desgaste gradativo das brocas na $V_c = 50$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev

	Comprimento usinado [mm]					
	0	625	1250	2300	3000	3500
Broca sem revestimento					-	-
Broca com revestimento à base de AlCr						
Broca com tratamento duplex						

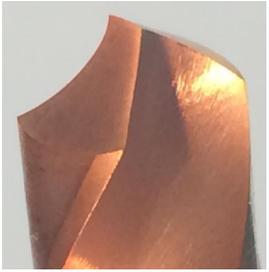
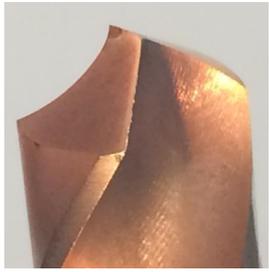
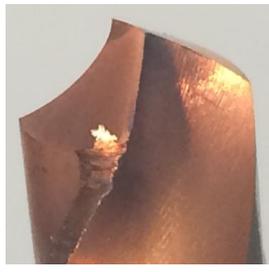
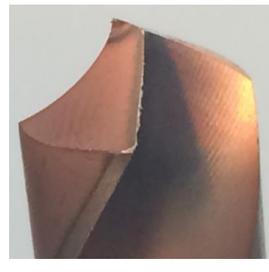
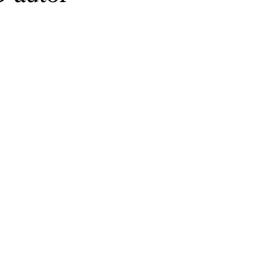
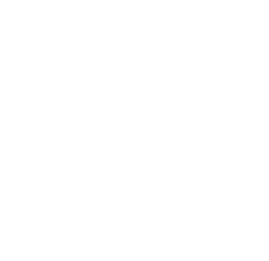
FONTE: O autor

QUADRO 4.4 – Imagens do desgaste gradativo das brocas na $V_c = 60$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev

		Comprimento usinado [mm]					10 mm
		0	25	375	900	1650	2075
Broca sem revestimento				-	-	-	-
							
Broca com revestimento à base de AlCr							
							

FONTE: O autor

QUADRO 4.5 – Imagens do desgaste gradativo das brocas na $V_c = 70$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev

		Comprimento usinado [mm]					
		0	175	300	1125	1875	2625
Broca com revestimento à base de AlCr					-	-	-
							
Broca com tratamento duplex							
							

FONTE: O autor

Para todas as condições de broca testadas na velocidade de corte de 40 m/min observa-se que o nível de desgaste apresentado durante os ensaios não foi significativo ao ponto de interromper os testes, ou seja, não ocorreu nenhum tipo de avaria (quebra, lascamento ou trinca) em nenhuma das ferramentas analisadas para os parâmetros de corte estabelecidos. Nota-se apenas um leve desgaste da aresta principal de corte bem como aderência de material na aresta transversal de todas as brocas (QUADRO [4.2]). De acordo com Marques *et al.* (2014), a presença de material aderido na aresta transversal da ferramenta pode ser caracterizada pelo encruamento do cavaco durante a usinagem, provocado em virtude de não existir pré-furo no ensaio de furação, dificultando a saída de cavacos. Outro fator a ser considerado é baixa velocidade de corte no centro da aresta transversal e a não existência de ângulo de saída de cavacos.

Na velocidade de corte de 50 m/min (QUADRO [4.3]), além do desgaste da aresta principal de corte e da presença de material aderido na aresta transversal, a broca sem revestimento apresenta ainda um pequeno arredondamento da ponta de corte num comprimento de usinagem de 2300 mm e a broca apenas com revestimento à base de AlCr exibe uma tendência a sofrer desgaste das guias (comprimento de usinagem a partir de 3000 mm) proposto por seu esmagamento em função do atrito com a parede do furo. Já a broca com tratamento duplex aponta um desgaste mais acentuado na aresta de corte próximo à ponta no comprimento de usinagem de 3500 mm. Sugere-se, então, que o processo de nitretação seja o responsável por ocasionar a diferença entre os tipos de desgaste apresentados pelas brocas apenas com revestimento e com tratamento duplex, considerando o mesmo comprimento usinado.

Já na velocidade de corte de 60 m/min (QUADRO [4.4]), para a broca sem revestimento, nota-se, por meio das imagens obtidas e pela quantidade de furos (comprimento usinado), que o desgaste foi significativo e pode ser atribuído às severas condições de corte. No comprimento de usinagem de 2075 mm, as brocas com revestimento e com tratamento duplex obtiveram resultados de desgaste semelhantes aos mencionados na velocidade de corte de 50 m/min.

Por fim, na velocidade de corte de 70 m/min (QUADRO [4.5]), novamente nota-se que a broca com revestimento apresentou desgaste da guia (comprimento usinado de 300 mm) e a broca com tratamento duplex exibiu um desgaste acentuado na ponta de corte a partir do comprimento usinado de 1125 mm, sustentando, assim, a ideia de que a nitretação tem influência no tipo de desgaste.

Imagens via microscopia eletrônica de varredura e análise EDS das regiões da aresta principal de corte e aresta transversal das brocas (FIG. 4.16) também foram coletadas a fim de obter melhores informações a respeito do tipo e/ou mecanismo de desgaste.

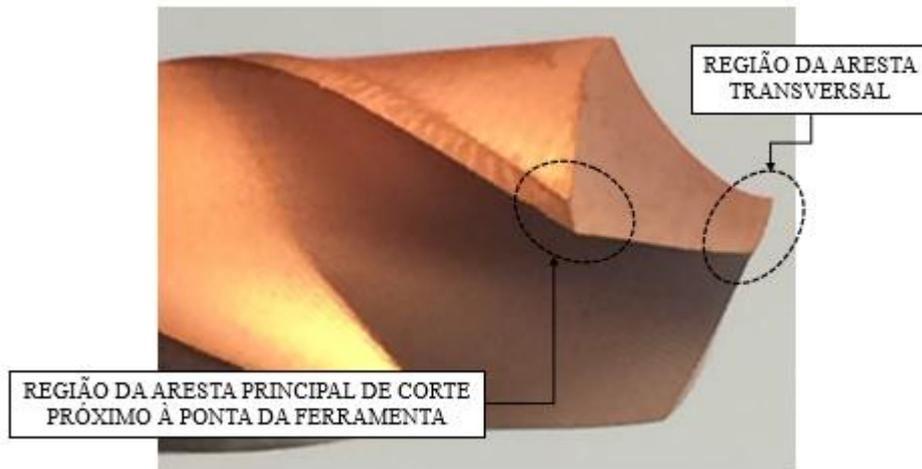


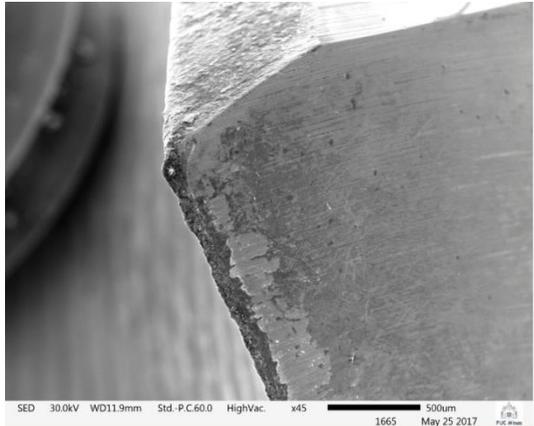
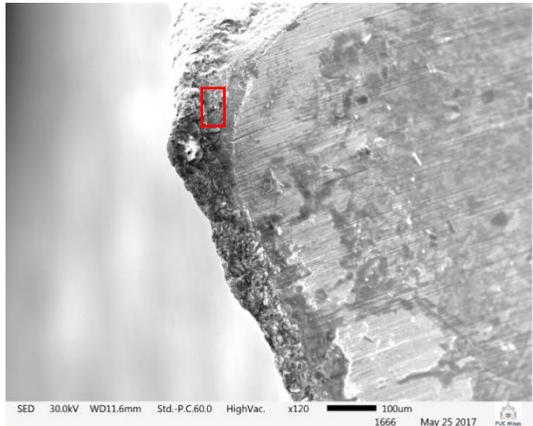
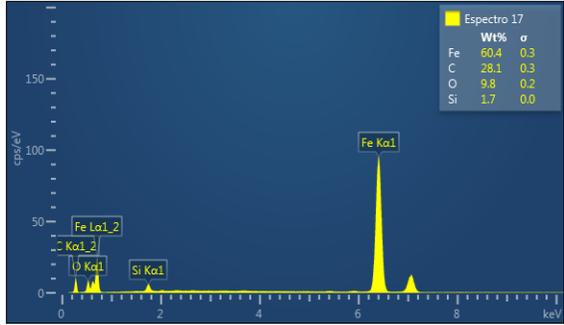
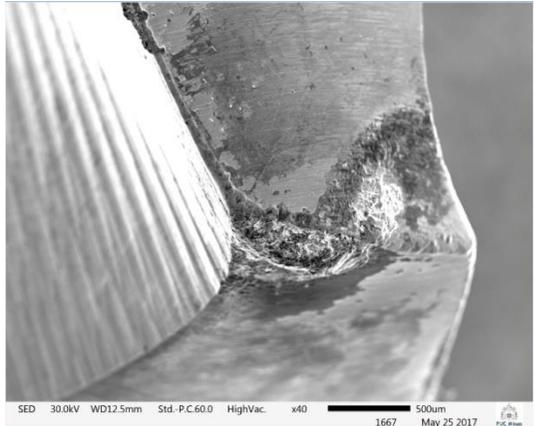
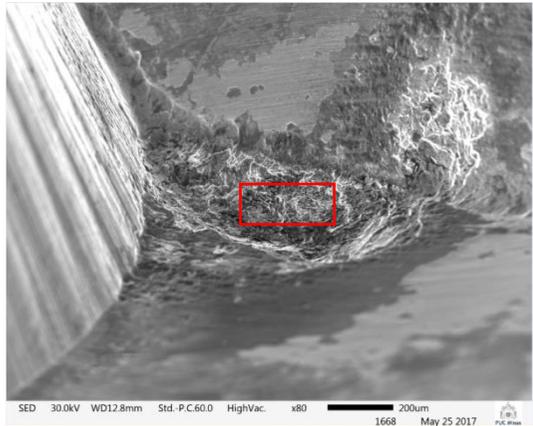
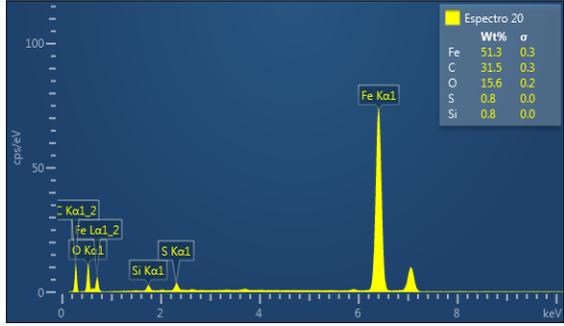
FIGURA 4.16: Região de captura das imagens e análise EDS

FONTE: O autor

Os QUADROS (4.6), (4.7) e (4.8) mostram as imagens das regiões desgastadas e a análise EDS na velocidade de corte de 40 m/min das brocas sem revestimento, apenas com revestimento à base de AlCr e com tratamento duplex, respectivamente.

As imagens demonstram que o desgaste, em geral, aconteceu em maior intensidade na ponta das ferramentas, onde a velocidade de corte atingiu seu valor máximo, e também na aresta transversal. Mesmo com a limpeza ultrassônica realizada após os testes de furação, não foi possível remover todo o material aderido à broca, o qual impediu o detalhamento dos mecanismos de desgaste presentes. Em relação à análise de EDS realizada nas regiões indicadas, nota-se, para a broca sem revestimento, picos dos elementos Fe, C e Si provenientes do ferro fundido cinzento, sugerindo a ocorrência um desgaste de adesão. Já para as brocas apenas com revestimento à base de AlCr e com tratamento duplex, a análise EDS mostrou a presença dos elementos Cr, Al, Ti, Si os quais podem ser atribuídos ao revestimento. Entretanto, outros elementos também foram observados como o C, Mo, V, W que, em geral, podem ser relacionados ao aço rápido, indicando que ocorreu desgaste ou delaminação do revestimento.

QUADRO 4.6 – Imagens das regiões desgastadas e análise EDS da broca sem revestimento na $V_c = 40$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev

	Imagens das regiões desgastadas	Ampliação das imagens das regiões desgastadas	EDS																		
Região da aresta principal de corte	 <p>SED 30.0kV WD11.9mm Std.-P.C.60.0 HighVac. x45 500um 1665 May 25 2017</p>	 <p>SED 30.0kV WD11.6mm Std.-P.C.60.0 HighVac. x120 100um 1666 May 25 2017</p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Wt%</th> <th>σ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fe</td> <td>60.4</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>28.1</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>9.8</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>Si</td> <td>1.7</td> <td>0.0</td> </tr> </tbody> </table>	Element	Wt%	σ	Fe	60.4	0.3	C	28.1	0.3	O	9.8	0.2	Si	1.7	0.0			
Element	Wt%	σ																			
Fe	60.4	0.3																			
C	28.1	0.3																			
O	9.8	0.2																			
Si	1.7	0.0																			
Região da aresta transversal	 <p>SED 30.0kV WD12.5mm Std.-P.C.60.0 HighVac. x40 500um 1667 May 25 2017</p>	 <p>SED 30.0kV WD12.8mm Std.-P.C.60.0 HighVac. x80 200um 1668 May 25 2017</p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Wt%</th> <th>σ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fe</td> <td>51.3</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>31.5</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>15.6</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>S</td> <td>0.8</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>Si</td> <td>0.8</td> <td>0.0</td> </tr> </tbody> </table>	Element	Wt%	σ	Fe	51.3	0.3	C	31.5	0.3	O	15.6	0.2	S	0.8	0.0	Si	0.8	0.0
Element	Wt%	σ																			
Fe	51.3	0.3																			
C	31.5	0.3																			
O	15.6	0.2																			
S	0.8	0.0																			
Si	0.8	0.0																			

FONTE: O autor

QUADRO 4.7 – Imagens das regiões desgastadas e análise EDS da broca apenas com revestimento na $V_c = 40$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev

	Imagens das regiões desgastadas	Ampliação das imagens das regiões desgastadas	EDS																														
Região da aresta principal de corte			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Wt%</th> <th>σ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Fe</td><td>46.5</td><td>0.3</td></tr> <tr><td>C</td><td>21.4</td><td>0.4</td></tr> <tr><td>O</td><td>12.8</td><td>0.2</td></tr> <tr><td>W</td><td>5.9</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>Mo</td><td>4.7</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>Cr</td><td>4.3</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>Al</td><td>2.3</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>V</td><td>1.7</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>Ti</td><td>0.5</td><td>0.0</td></tr> </tbody> </table>	Element	Wt%	σ	Fe	46.5	0.3	C	21.4	0.4	O	12.8	0.2	W	5.9	0.1	Mo	4.7	0.1	Cr	4.3	0.0	Al	2.3	0.0	V	1.7	0.0	Ti	0.5	0.0
Element	Wt%	σ																															
Fe	46.5	0.3																															
C	21.4	0.4																															
O	12.8	0.2																															
W	5.9	0.1																															
Mo	4.7	0.1																															
Cr	4.3	0.0																															
Al	2.3	0.0																															
V	1.7	0.0																															
Ti	0.5	0.0																															
Região da aresta transversal			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Wt%</th> <th>σ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Fe</td><td>67.4</td><td>0.3</td></tr> <tr><td>C</td><td>18.2</td><td>0.3</td></tr> <tr><td>O</td><td>5.8</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>Cr</td><td>3.1</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>Mo</td><td>2.1</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>W</td><td>1.8</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>V</td><td>1.3</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>Si</td><td>0.2</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>Al</td><td>0.1</td><td>0.0</td></tr> </tbody> </table>	Element	Wt%	σ	Fe	67.4	0.3	C	18.2	0.3	O	5.8	0.1	Cr	3.1	0.0	Mo	2.1	0.1	W	1.8	0.1	V	1.3	0.0	Si	0.2	0.0	Al	0.1	0.0
Element	Wt%	σ																															
Fe	67.4	0.3																															
C	18.2	0.3																															
O	5.8	0.1																															
Cr	3.1	0.0																															
Mo	2.1	0.1																															
W	1.8	0.1																															
V	1.3	0.0																															
Si	0.2	0.0																															
Al	0.1	0.0																															

FONTE: O autor

QUADRO 4.8 – Imagens das regiões desgastadas e análise EDS da broca com tratamento duplex na $V_c = 40$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev

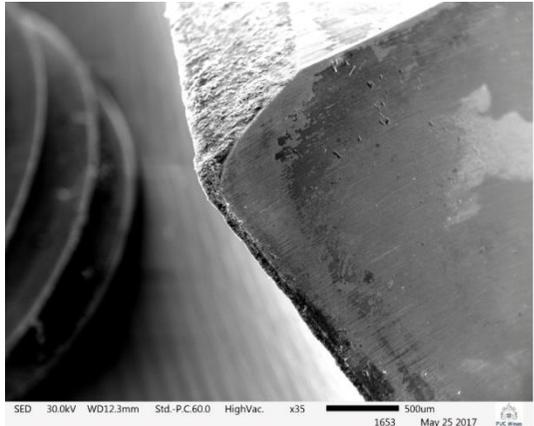
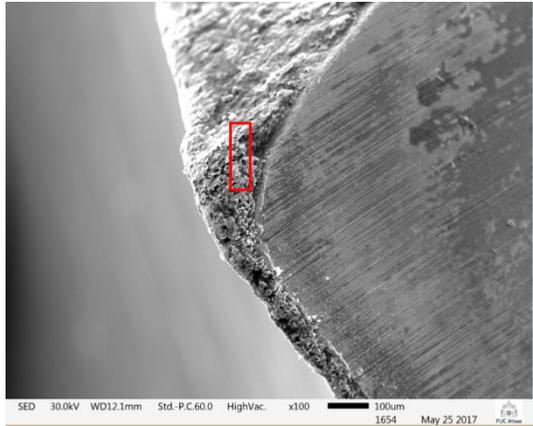
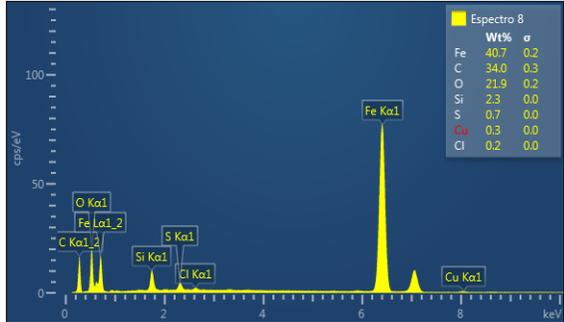
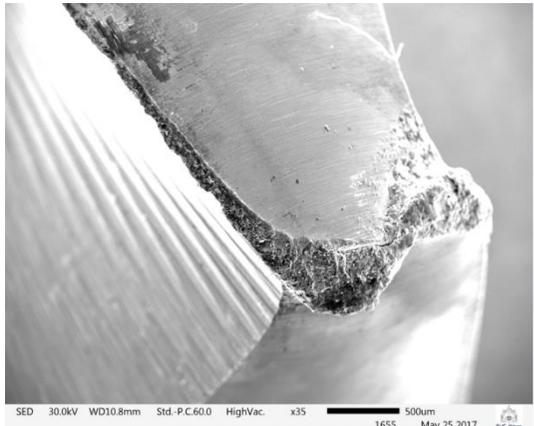
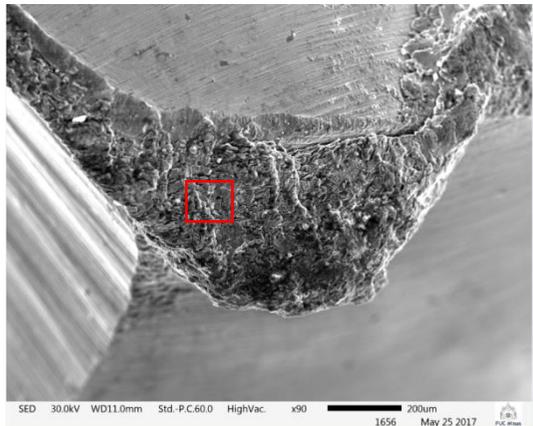
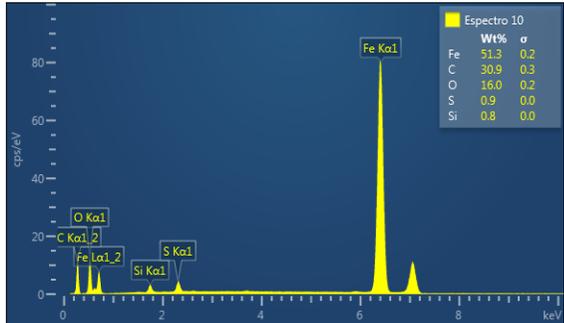
	Imagens das regiões desgastadas	Ampliação das imagens das regiões desgastadas	EDS																																	
Região da aresta principal de corte			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Wt%</th> <th>σ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Fe</td><td>34.1</td><td>0.2</td></tr> <tr><td>C</td><td>18.3</td><td>0.4</td></tr> <tr><td>O</td><td>16.1</td><td>0.2</td></tr> <tr><td>Al</td><td>9.8</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>Cr</td><td>7.7</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>Ti</td><td>7.2</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>Si</td><td>2.1</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>W</td><td>2.0</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>Mo</td><td>1.8</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>V</td><td>0.9</td><td>0.0</td></tr> </tbody> </table>	Element	Wt%	σ	Fe	34.1	0.2	C	18.3	0.4	O	16.1	0.2	Al	9.8	0.1	Cr	7.7	0.1	Ti	7.2	0.1	Si	2.1	0.0	W	2.0	0.1	Mo	1.8	0.1	V	0.9	0.0
Element	Wt%	σ																																		
Fe	34.1	0.2																																		
C	18.3	0.4																																		
O	16.1	0.2																																		
Al	9.8	0.1																																		
Cr	7.7	0.1																																		
Ti	7.2	0.1																																		
Si	2.1	0.0																																		
W	2.0	0.1																																		
Mo	1.8	0.1																																		
V	0.9	0.0																																		
Região da aresta transversal			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Wt%</th> <th>σ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Fe</td><td>30.2</td><td>0.2</td></tr> <tr><td>O</td><td>20.7</td><td>0.3</td></tr> <tr><td>C</td><td>15.6</td><td>0.4</td></tr> <tr><td>Ti</td><td>12.5</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>Al</td><td>8.2</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>Cr</td><td>7.7</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>Si</td><td>1.9</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>Mo</td><td>1.3</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>V</td><td>1.2</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>W</td><td>0.7</td><td>0.0</td></tr> </tbody> </table>	Element	Wt%	σ	Fe	30.2	0.2	O	20.7	0.3	C	15.6	0.4	Ti	12.5	0.1	Al	8.2	0.1	Cr	7.7	0.1	Si	1.9	0.0	Mo	1.3	0.1	V	1.2	0.1	W	0.7	0.0
Element	Wt%	σ																																		
Fe	30.2	0.2																																		
O	20.7	0.3																																		
C	15.6	0.4																																		
Ti	12.5	0.1																																		
Al	8.2	0.1																																		
Cr	7.7	0.1																																		
Si	1.9	0.0																																		
Mo	1.3	0.1																																		
V	1.2	0.1																																		
W	0.7	0.0																																		

FONTE: O autor

Os QUADROS (4.9), (4.10) e (4.11) exibem as imagens das regiões desgastadas e a análise EDS na velocidade de corte de 50 m/min das brocas sem revestimento, apenas com revestimento à base de AlCr e com tratamento duplex, respectivamente.

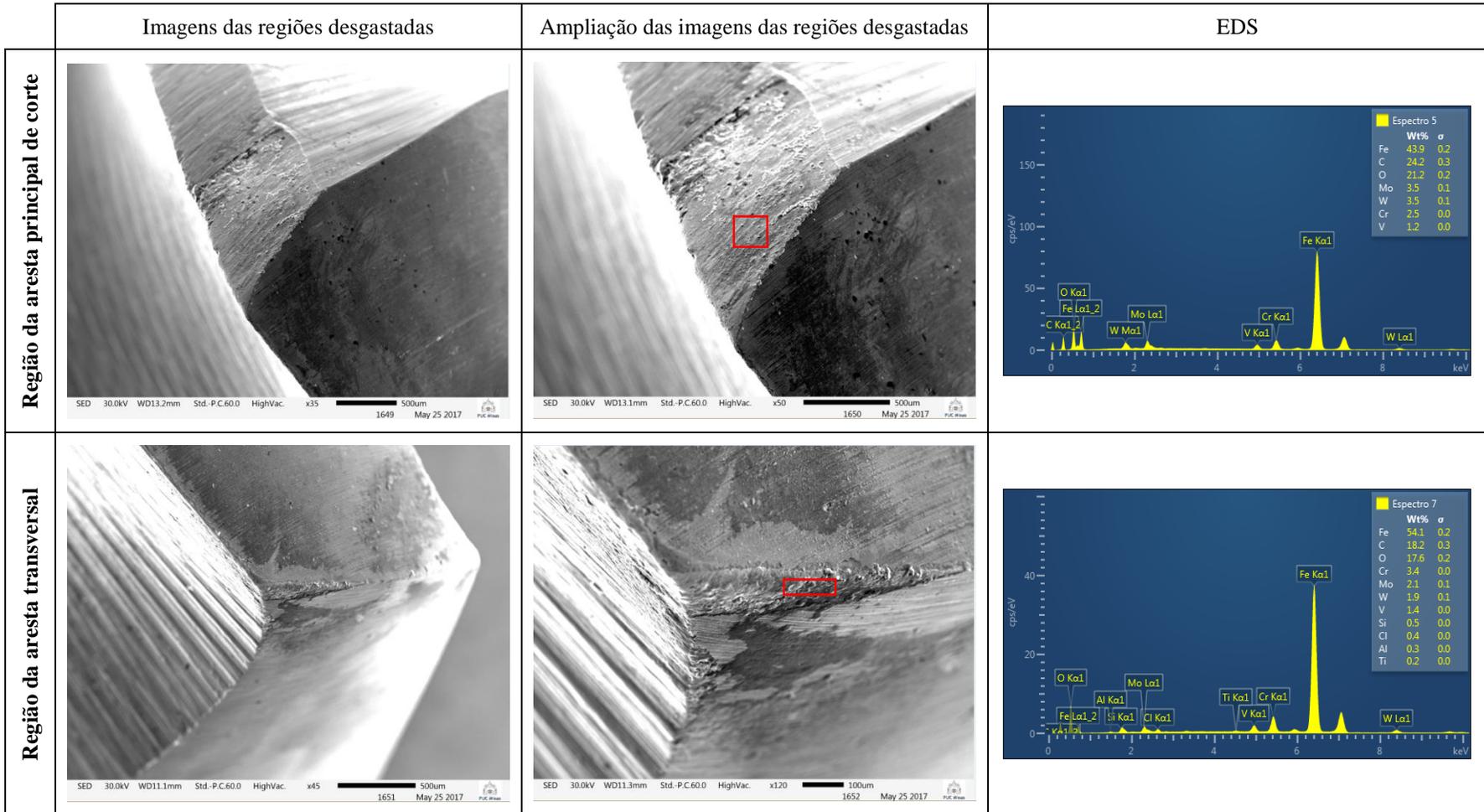
Novamente, o desgaste ocorreu de forma predominante próximo à ponta das ferramentas. Para a broca sem revestimento e pela análise EDS, propõe-se uma possível adesão do ferro fundido cinzento em decorrência da presença dos elementos Fe, C, Si, S e Cu. Em se tratando da broca apenas com revestimento nota-se, pela análise EDS, remoção do revestimento evidenciado pelos elementos C, Mo, V, W, os quais podem ser atribuídos ao aço rápido. Sugere-se ainda que ocorreu o mecanismo de desgaste da difusão na região da guia, dado o aspecto liso da área analisada. Na aresta transversal de corte constata-se a presença dos elementos formadores do revestimento, Al, Cr, Si e Ti. No entanto, também é perceptível a existência dos elementos C, Mo, V e W os quais elucidam uma possível remoção do revestimento nesta região. No que condiz à broca com tratamento duplex, sugere-se, por meio do detalhe B da análise EDS, que o revestimento foi completamente removido nesta região, ficando o substrato exposto. No detalhe A, observa-se a presença dos elementos Fe, Si, S os quais remetem a uma possível adesão do ferro fundido cinzento. Propõe-se ainda, por meio das imagens do desgaste próximo à ponta de corte, que ocorreu perda de material da ferramenta. Na região da aresta transversal, percebe-se tanto a presença dos elementos do revestimento quanto do substrato (aço rápido), indicando que houve remoção do revestimento em determinados pontos.

QUADRO 4.9 – Imagens das regiões desgastadas e análise EDS da broca sem revestimento na $V_c = 50$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev

	Imagens das regiões desgastadas	Ampliação das imagens das regiões desgastadas	EDS																								
Região da aresta principal de corte	 <p>SED 30.0kV WD12.3mm Std.-P.C.60.0 HighVac. x35 500um 1653 May 25 2017</p>	 <p>SED 30.0kV WD12.1mm Std.-P.C.60.0 HighVac. x100 100um 1654 May 25 2017</p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Wt%</th> <th>σ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Fe</td><td>40.7</td><td>0.2</td></tr> <tr><td>C</td><td>34.0</td><td>0.3</td></tr> <tr><td>O</td><td>21.9</td><td>0.2</td></tr> <tr><td>Si</td><td>2.3</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>S</td><td>0.7</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>Cl</td><td>0.3</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>Cu</td><td>0.2</td><td>0.0</td></tr> </tbody> </table>	Element	Wt%	σ	Fe	40.7	0.2	C	34.0	0.3	O	21.9	0.2	Si	2.3	0.0	S	0.7	0.0	Cl	0.3	0.0	Cu	0.2	0.0
Element	Wt%	σ																									
Fe	40.7	0.2																									
C	34.0	0.3																									
O	21.9	0.2																									
Si	2.3	0.0																									
S	0.7	0.0																									
Cl	0.3	0.0																									
Cu	0.2	0.0																									
Região da aresta transversal	 <p>SED 30.0kV WD10.8mm Std.-P.C.60.0 HighVac. x35 500um 1655 May 25 2017</p>	 <p>SED 30.0kV WD11.0mm Std.-P.C.60.0 HighVac. x90 200um 1656 May 25 2017</p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Wt%</th> <th>σ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Fe</td><td>51.3</td><td>0.2</td></tr> <tr><td>C</td><td>30.9</td><td>0.3</td></tr> <tr><td>O</td><td>16.0</td><td>0.2</td></tr> <tr><td>S</td><td>0.9</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>Si</td><td>0.8</td><td>0.0</td></tr> </tbody> </table>	Element	Wt%	σ	Fe	51.3	0.2	C	30.9	0.3	O	16.0	0.2	S	0.9	0.0	Si	0.8	0.0						
Element	Wt%	σ																									
Fe	51.3	0.2																									
C	30.9	0.3																									
O	16.0	0.2																									
S	0.9	0.0																									
Si	0.8	0.0																									

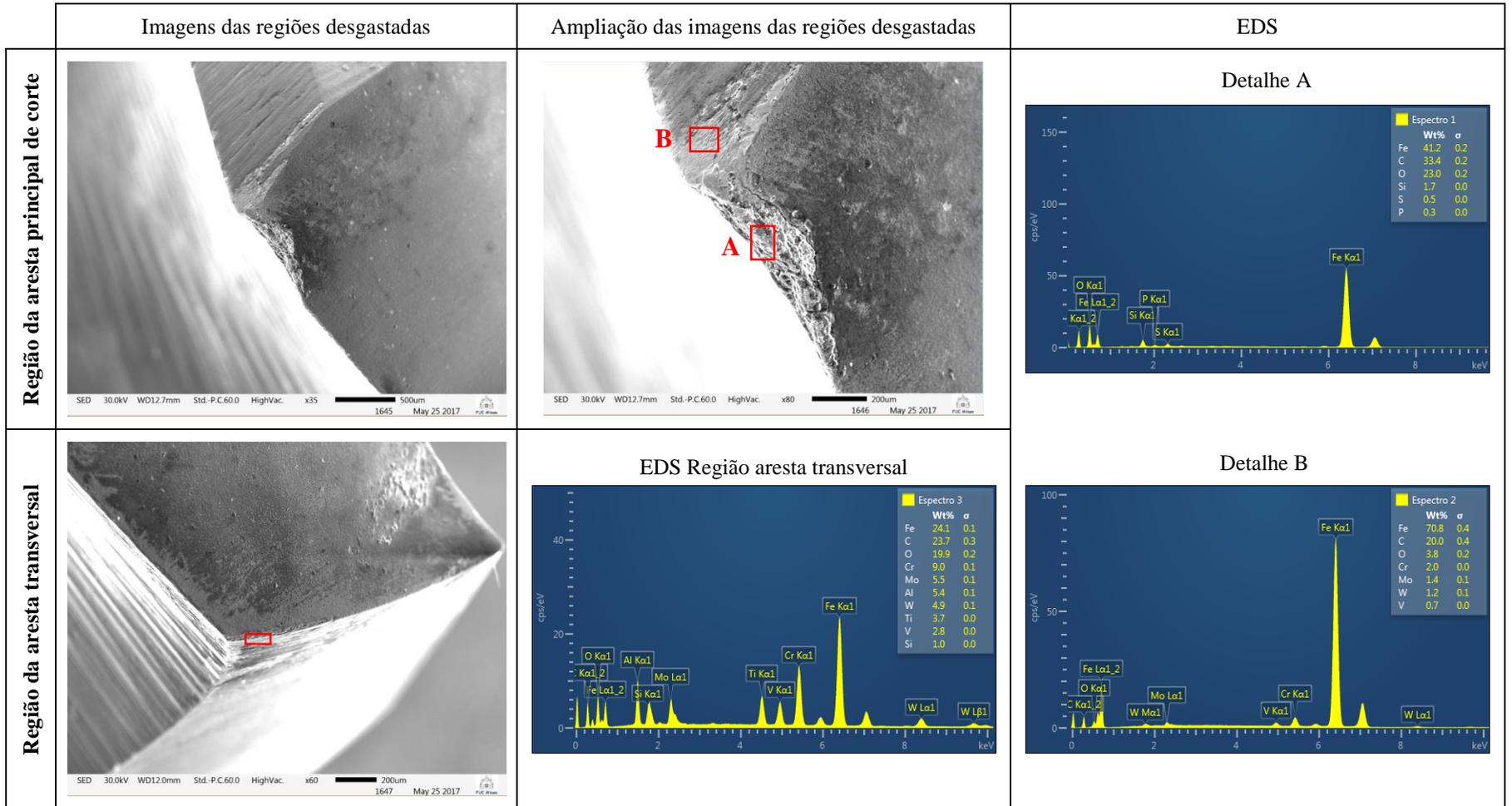
FONTE: O autor

QUADRO 4.10 – Imagens das regiões desgastadas e análise EDS da broca apenas com revestimento na Vc = 50 m/min e f = 0,20 mm/rev



FONTE: O autor

QUADRO 4.11 – Imagens das regiões desgastadas e análise EDS da broca com tratamento duplex na Vc = 50 m/min e f = 0,20 mm/rev



FONTE: O autor

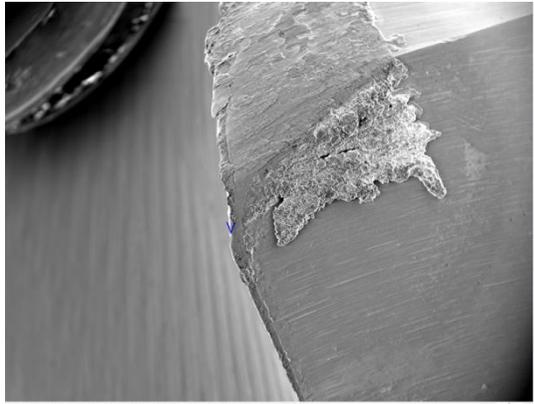
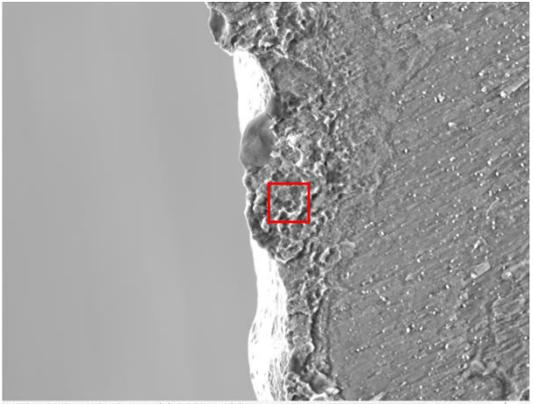
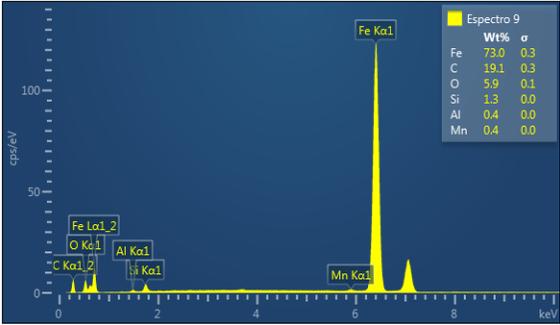
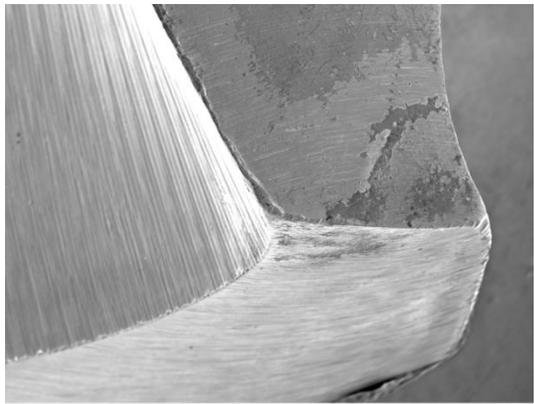
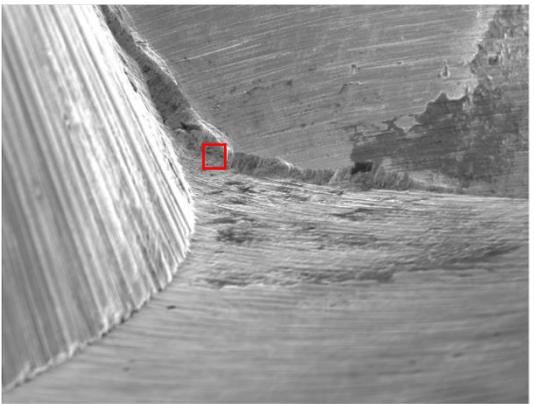
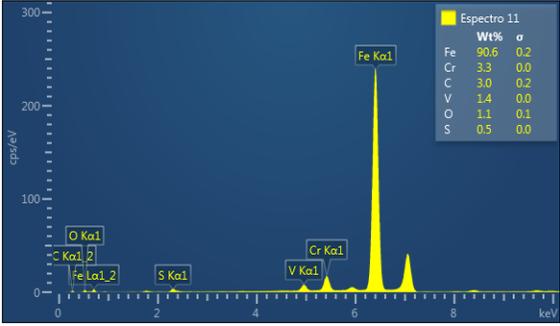
As imagens das regiões desgastadas e a análise EDS das brocas sem revestimento, apenas com revestimento à base de AlCr e com tratamento duplex, na velocidade de corte de 60 m/min, são mostradas nos QUADROS (4.12), (4.13) e (4.14), respectivamente.

Os elementos Fe, C, Si e Mn presentes na análise EDS realizada na ponta de corte da ferramenta sem revestimento elucida uma provável adesão de material da peça de trabalho. Além disso, sugere-se, por meio das imagens obtidas, um arredondamento da ponta cortante e ocorrência de lascamento na aresta principal de corte e na aresta transversal.

Em relação à broca apenas com revestimento, é plausível que os elementos Fe, C, Si sejam do ferro fundido cinzento, indicando que houve adesão de material da peça de trabalho sobre a ferramenta. A presença dos elementos C, Mo, V e W notados na análise EDS realizada na aresta transversal propõe que o revestimento foi removido.

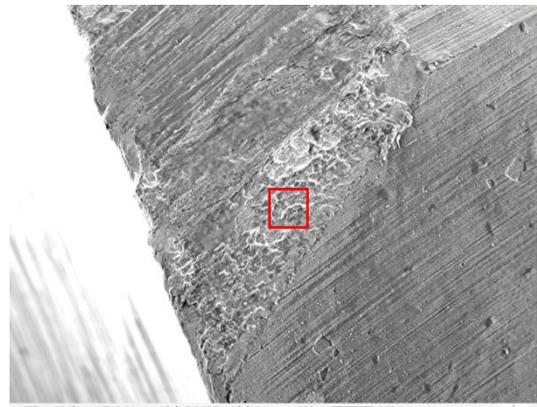
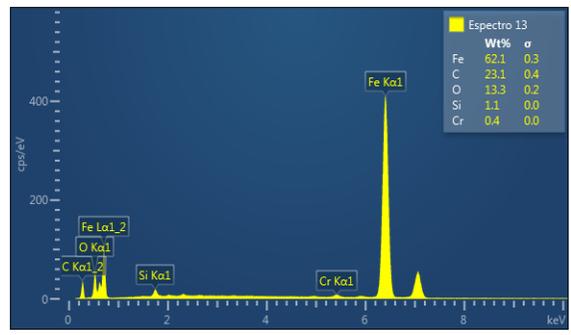
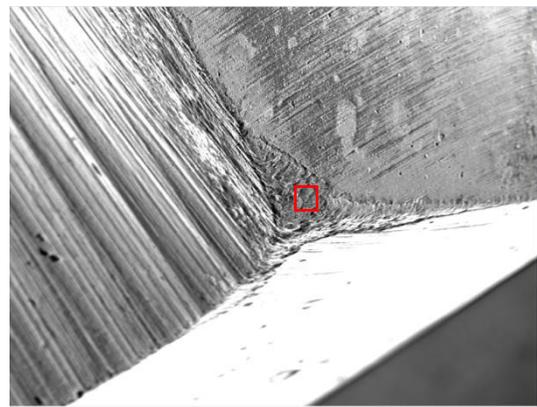
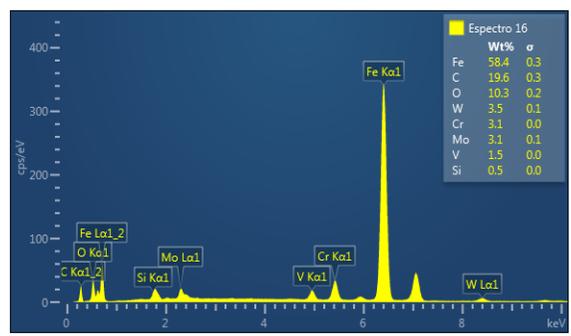
As análises EDS da ferramenta com tratamento duplex indicam a presença dos elementos Al, Cr, Ti e Si, os quais podem ser atribuídos ao revestimento. Entretanto, há outros elementos químicos como o Mo, W e V que instilam remoção do revestimento nessa região.

QUADRO 4.12 – Imagens das regiões desgastadas e análise EDS da broca sem revestimento na $V_c = 60$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev

	Imagens das regiões desgastadas	Ampliação das imagens das regiões desgastadas	EDS														
Região da aresta principal de corte	 <p>SED 30.0kV WD11.4mm High-P.C.70.9 HighVac. x35 500um 1464 May 12 2017</p>	 <p>SED 30.0kV WD11.5mm High-P.C.70.9 HighVac. x500 50um 1465 May 12 2017</p>	 <p>Espectro 9</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Wt%</th> <th>σ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fe 73.0</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>C 19.1</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>O 5.9</td> <td>0.1</td> </tr> <tr> <td>Si 1.3</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>Al 0.4</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>Mn 0.4</td> <td>0.0</td> </tr> </tbody> </table>	Wt%	σ	Fe 73.0	0.3	C 19.1	0.3	O 5.9	0.1	Si 1.3	0.0	Al 0.4	0.0	Mn 0.4	0.0
Wt%	σ																
Fe 73.0	0.3																
C 19.1	0.3																
O 5.9	0.1																
Si 1.3	0.0																
Al 0.4	0.0																
Mn 0.4	0.0																
Região da aresta transversal	 <p>SED 30.0kV WD23.3mm High-P.C.70.9 HighVac. x35 500um 1457 May 12 2017</p>	 <p>SED 30.0kV WD11.3mm Std.-P.C.82.4 HighVac. x100 100um 1466 May 12 2017</p>	 <p>Espectro 11</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Wt%</th> <th>σ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fe 90.6</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>Cr 3.3</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>C 3.0</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>V 1.4</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>O 1.1</td> <td>0.1</td> </tr> <tr> <td>S 0.5</td> <td>0.0</td> </tr> </tbody> </table>	Wt%	σ	Fe 90.6	0.2	Cr 3.3	0.0	C 3.0	0.2	V 1.4	0.0	O 1.1	0.1	S 0.5	0.0
Wt%	σ																
Fe 90.6	0.2																
Cr 3.3	0.0																
C 3.0	0.2																
V 1.4	0.0																
O 1.1	0.1																
S 0.5	0.0																

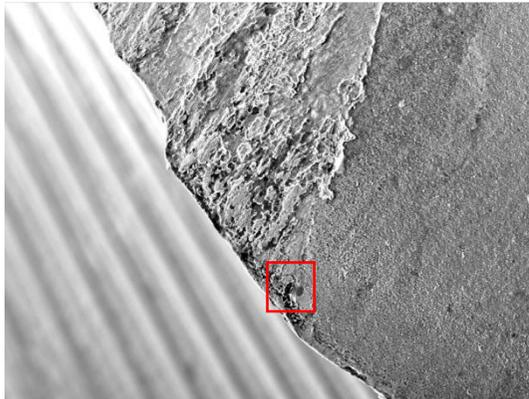
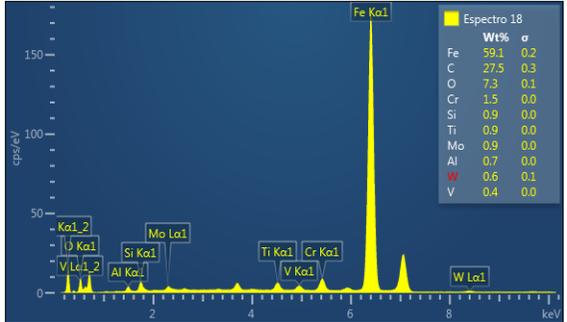
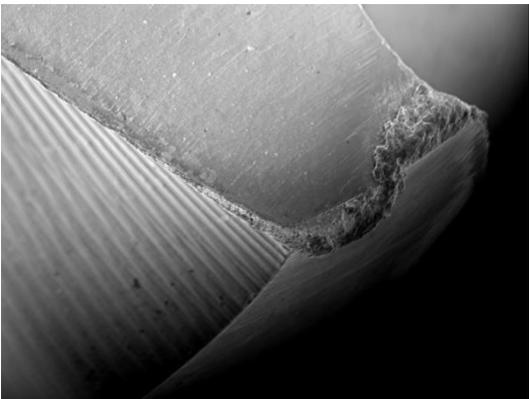
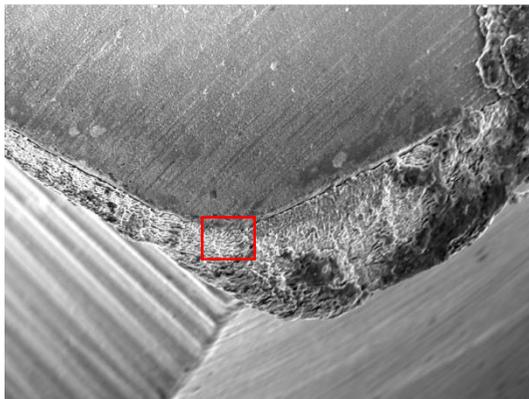
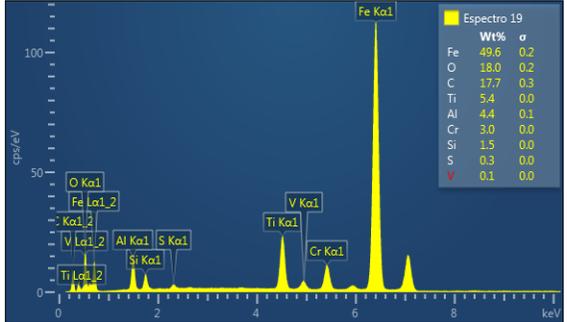
FONTE: O autor

QUADRO 4.13 – Imagens das regiões desgastadas e análise EDS da broca apenas com revestimento na $V_c = 60$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev

	Imagens das regiões desgastadas	Ampliação das imagens das regiões desgastadas	EDS																											
Região da aresta principal de corte	 <p>SED 30.0kV WD13.4mm High-P.C.80.5 HighVac. x35 500um 1458 May 12 2017</p>	 <p>SED 30.0kV WD13.6mm High-P.C.80.5 HighVac. x100 100um 1459 May 12 2017</p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Wt%</th> <th>σ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fe</td> <td>62.1</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>23.1</td> <td>0.4</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>13.3</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>Si</td> <td>1.1</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.4</td> <td>0.0</td> </tr> </tbody> </table>	Element	Wt%	σ	Fe	62.1	0.3	C	23.1	0.4	O	13.3	0.2	Si	1.1	0.0	Cr	0.4	0.0									
Element	Wt%	σ																												
Fe	62.1	0.3																												
C	23.1	0.4																												
O	13.3	0.2																												
Si	1.1	0.0																												
Cr	0.4	0.0																												
Região da aresta transversal	 <p>SED 30.0kV WD15.3mm High-P.C.80.5 HighVac. x35 500um 1461 May 12 2017</p>	 <p>SED 30.0kV WD15.3mm High-P.C.80.5 HighVac. x100 100um 1460 May 12 2017</p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Wt%</th> <th>σ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fe</td> <td>58.4</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>19.6</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>10.3</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>W</td> <td>3.5</td> <td>0.1</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>3.1</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>Mo</td> <td>3.1</td> <td>0.1</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>1.5</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>Si</td> <td>0.5</td> <td>0.0</td> </tr> </tbody> </table>	Element	Wt%	σ	Fe	58.4	0.3	C	19.6	0.3	O	10.3	0.2	W	3.5	0.1	Cr	3.1	0.0	Mo	3.1	0.1	V	1.5	0.0	Si	0.5	0.0
Element	Wt%	σ																												
Fe	58.4	0.3																												
C	19.6	0.3																												
O	10.3	0.2																												
W	3.5	0.1																												
Cr	3.1	0.0																												
Mo	3.1	0.1																												
V	1.5	0.0																												
Si	0.5	0.0																												

FONTE: O autor

QUADRO 4.14 – Imagens das regiões desgastadas e análise EDS da broca com tratamento duplex na $V_c = 60$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev

	Imagens das regiões desgastadas	Ampliação das imagens das regiões desgastadas	EDS																																	
Região da aresta principal de corte	 <p>SED 30.0kV WD19.7mm High-P.C.70.9 HighVac. x35 500um 1462 May 12 2017</p>	 <p>SED 30.0kV WD19.7mm High-P.C.70.9 HighVac. x100 100um 1463 May 12 2017</p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Wt%</th> <th>σ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Fe</td><td>59.1</td><td>0.2</td></tr> <tr><td>C</td><td>27.5</td><td>0.3</td></tr> <tr><td>O</td><td>7.3</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>Cr</td><td>1.5</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>Si</td><td>0.9</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>Ti</td><td>0.9</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>Mo</td><td>0.9</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>Al</td><td>0.7</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>W</td><td>0.6</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>V</td><td>0.4</td><td>0.0</td></tr> </tbody> </table>	Element	Wt%	σ	Fe	59.1	0.2	C	27.5	0.3	O	7.3	0.1	Cr	1.5	0.0	Si	0.9	0.0	Ti	0.9	0.0	Mo	0.9	0.0	Al	0.7	0.0	W	0.6	0.1	V	0.4	0.0
Element	Wt%	σ																																		
Fe	59.1	0.2																																		
C	27.5	0.3																																		
O	7.3	0.1																																		
Cr	1.5	0.0																																		
Si	0.9	0.0																																		
Ti	0.9	0.0																																		
Mo	0.9	0.0																																		
Al	0.7	0.0																																		
W	0.6	0.1																																		
V	0.4	0.0																																		
Região da aresta transversal	 <p>SED 30.0kV WD10.7mm High-P.C.63.7 HighVac. x35 500um 1464 May 12 2017</p>	 <p>SED 30.0kV WD11.8mm High-P.C.63.7 HighVac. x100 100um 1465 May 12 2017</p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Wt%</th> <th>σ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Fe</td><td>49.6</td><td>0.2</td></tr> <tr><td>O</td><td>18.0</td><td>0.2</td></tr> <tr><td>C</td><td>17.7</td><td>0.3</td></tr> <tr><td>Ti</td><td>5.4</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>Al</td><td>4.4</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>Cr</td><td>3.0</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>Si</td><td>1.5</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>S</td><td>0.3</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>V</td><td>0.1</td><td>0.0</td></tr> </tbody> </table>	Element	Wt%	σ	Fe	49.6	0.2	O	18.0	0.2	C	17.7	0.3	Ti	5.4	0.0	Al	4.4	0.1	Cr	3.0	0.0	Si	1.5	0.0	S	0.3	0.0	V	0.1	0.0			
Element	Wt%	σ																																		
Fe	49.6	0.2																																		
O	18.0	0.2																																		
C	17.7	0.3																																		
Ti	5.4	0.0																																		
Al	4.4	0.1																																		
Cr	3.0	0.0																																		
Si	1.5	0.0																																		
S	0.3	0.0																																		
V	0.1	0.0																																		

FONTE: O autor

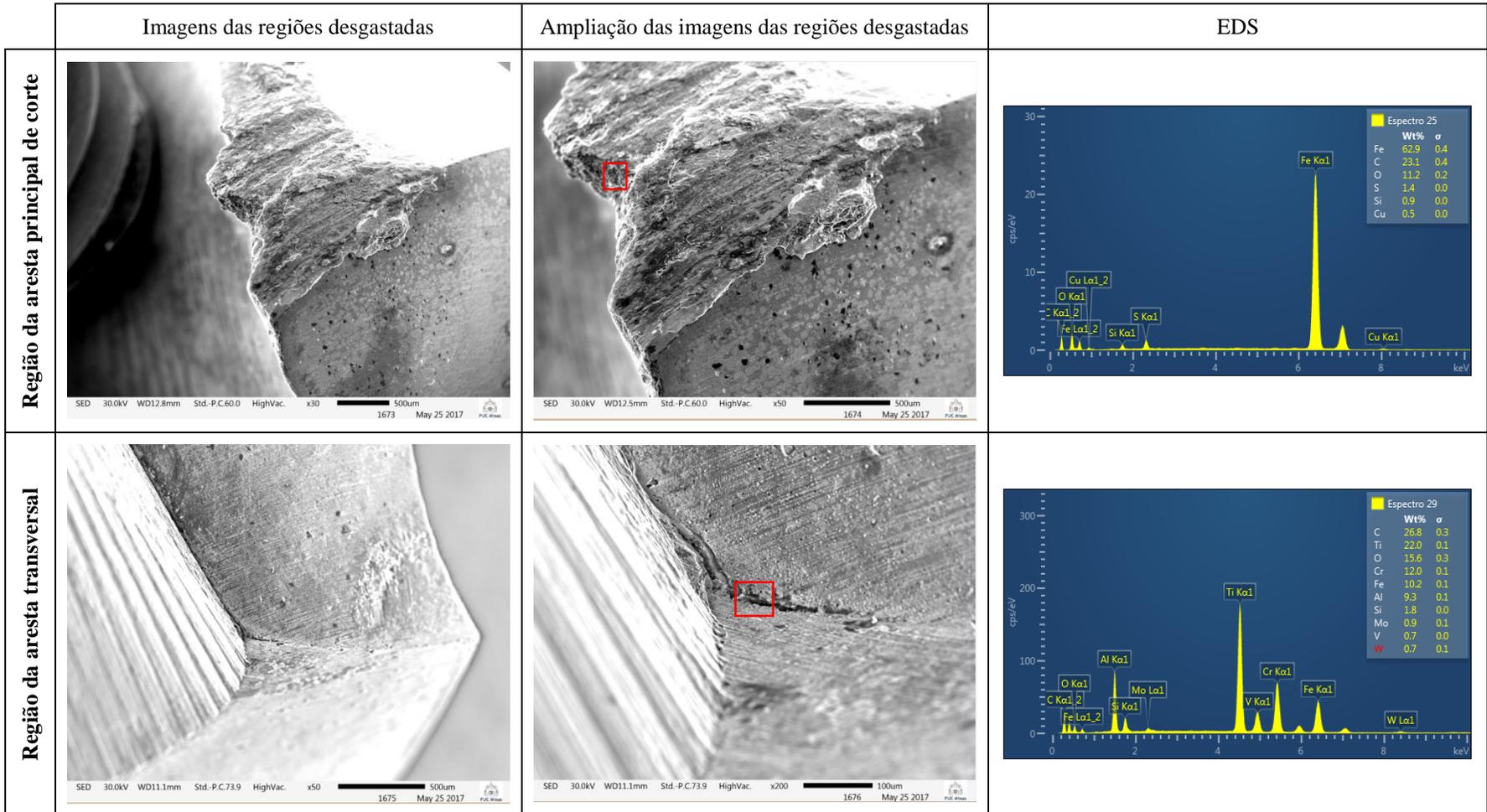
Por fim, as imagens das regiões desgastadas e a análise EDS das brocas apenas com revestimento à base de AlCr e com tratamento duplex, na velocidade de corte de 70 m/min, estão detalhadas nos QUADROS (4.15) e (4.16), nesta ordem.

Em se tratando da ferramenta apenas com revestimento à base de AlCr, é perceptível a presença dos elementos Fe, Si, S e Cu dando a entender que ocorreu adesão do material da peça de trabalho (ferro fundido cinzento) na região da ponta de corte. A aderência de material nessa região impediu o detalhamento do mecanismo de desgaste. Já na aresta transversal, observa-se tanto a presença dos elementos do revestimento (Al, Cr, Si e Ti) quanto do substrato (C, Mo, V e W) sugerindo que o revestimento foi removido.

Para a ferramenta com tratamento duplex nota-se a ocorrência do desgaste da guia ocasionado, provavelmente, pelo atrito da mesma e com a parede do furo. A presença de picos dos elementos Fe, Si e S nessa região elucida uma possível adesão do ferro fundido cinzento. Por meio da análise EDS realizada na aresta transversal, os elementos C, Mo, V e W instilam que houve remoção do revestimento.

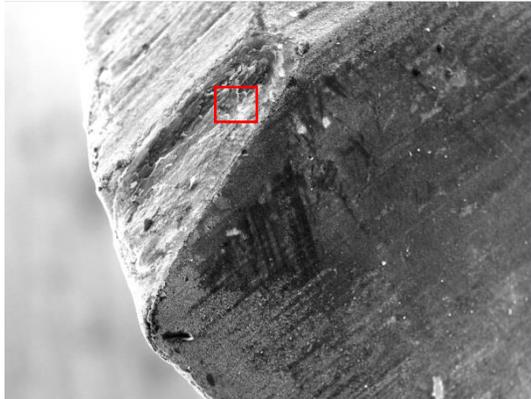
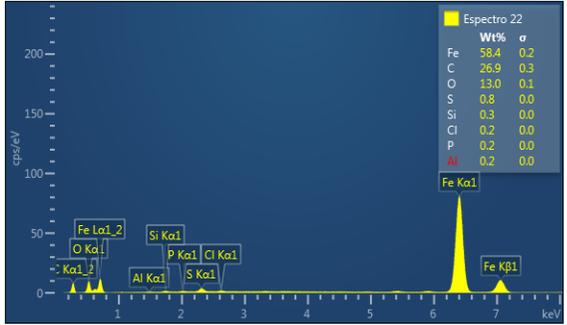
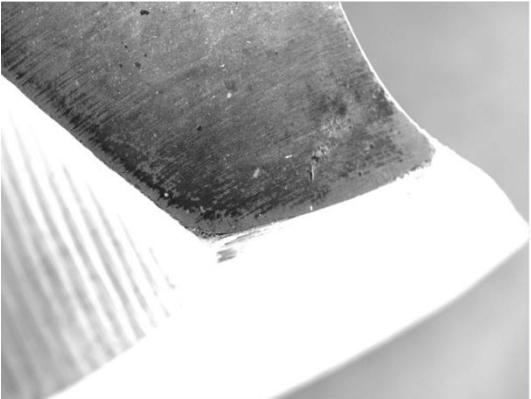
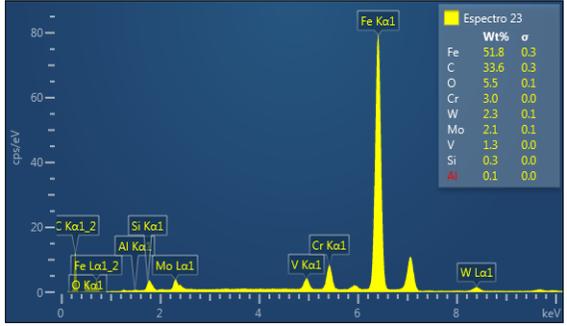
Em geral, pode-se concluir que o desgaste foi predominante na ponta de corte das ferramentas e, em segundo plano, na aresta transversal. Ademais, por meio das análises comparativas praticadas entre as brocas apenas com revestimento e com tratamento duplex, sustenta-se, assim, a concepção de que o processo de nitretação pode influenciar no tipo de desgaste, considerando os mesmos parâmetros de corte.

QUADRO 4.15 – Imagens das regiões desgastadas e análise EDS da broca apenas com revestimento na $V_c = 70$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev



FONTE: O autor

QUADRO 4.16 – Imagens das regiões desgastadas e análise EDS da broca com tratamento duplex na $V_c = 70$ m/min e $f = 0,20$ mm/rev

	Imagens das regiões desgastadas	Ampliação das imagens das regiões desgastadas	EDS																														
Região da aresta principal de corte	 <p>SED 30.0kV WD9.0mm Std.-P.C.60.0 HighVac. x45 500um 1669 May 25 2017</p>	 <p>SED 30.0kV WD9.2mm Std.-P.C.60.0 HighVac. x80 200um 1670 May 25 2017</p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Wt%</th> <th>σ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Fe</td><td>58.4</td><td>0.2</td></tr> <tr><td>C</td><td>26.9</td><td>0.3</td></tr> <tr><td>O</td><td>13.0</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>S</td><td>0.8</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>Si</td><td>0.3</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>Cl</td><td>0.2</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>P</td><td>0.2</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>Al</td><td>0.2</td><td>0.0</td></tr> </tbody> </table>	Element	Wt%	σ	Fe	58.4	0.2	C	26.9	0.3	O	13.0	0.1	S	0.8	0.0	Si	0.3	0.0	Cl	0.2	0.0	P	0.2	0.0	Al	0.2	0.0			
Element	Wt%	σ																															
Fe	58.4	0.2																															
C	26.9	0.3																															
O	13.0	0.1																															
S	0.8	0.0																															
Si	0.3	0.0																															
Cl	0.2	0.0																															
P	0.2	0.0																															
Al	0.2	0.0																															
Região da aresta transversal	 <p>SED 30.0kV WD11.5mm Std.-P.C.60.0 HighVac. x40 500um 1671 May 25 2017</p>	 <p>SED 30.0kV WD11.4mm Std.-P.C.60.0 HighVac. x200 100um 1672 May 25 2017</p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Wt%</th> <th>σ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Fe</td><td>51.8</td><td>0.3</td></tr> <tr><td>C</td><td>33.6</td><td>0.3</td></tr> <tr><td>O</td><td>5.5</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>Cr</td><td>3.0</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>W</td><td>2.3</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>Mo</td><td>2.1</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>V</td><td>1.3</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>Si</td><td>0.3</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>Al</td><td>0.1</td><td>0.0</td></tr> </tbody> </table>	Element	Wt%	σ	Fe	51.8	0.3	C	33.6	0.3	O	5.5	0.1	Cr	3.0	0.0	W	2.3	0.1	Mo	2.1	0.1	V	1.3	0.0	Si	0.3	0.0	Al	0.1	0.0
Element	Wt%	σ																															
Fe	51.8	0.3																															
C	33.6	0.3																															
O	5.5	0.1																															
Cr	3.0	0.0																															
W	2.3	0.1																															
Mo	2.1	0.1																															
V	1.3	0.0																															
Si	0.3	0.0																															
Al	0.1	0.0																															

FONTE: O autor

5 CONCLUSÃO

Por meio do mapeamento da microdureza dos pinos com revestimento e com tratamento duplex, dos resultados dos testes de pino-sobre-disco e dos ensaios de furação utilizando pinos de topo esférico e brocas helicoidais de aço rápido AISI M2 sem revestimento, apenas com revestimento à base de AlCr e com tratamento duplex, como peça de trabalho o ferro fundido cinzento FE 300 e os diferentes parâmetros de deslizamento e de corte selecionados, são descritas algumas considerações a seguir:

Com relação à microdureza , conclui-se que:

- o tratamento duplex ocasionou um aumento de 7% na microdureza do substrato próximo à borda do pino comparada a uma superfície apenas com revestimento.

Com relação aos testes pino-sobre-disco, pode-se concluir que:

- os pinos com revestimento à base de AlCr e os pinos com tratamento duplex propiciaram redução do coeficiente de atrito e melhor resistência ao desgaste quando comparados aos pinos sem revestimento, os quais mostraram-se mais instáveis em todas as velocidades de deslizamento testadas. Com relação ao tratamento termoquímico de nitretação, os resultados sugeriram que este processo apresenta uma pequena melhora no desempenho sob maiores velocidades de deslizamento promovido pelas mudanças na interface e contribuindo para um baixo coeficiente de atrito. O melhor desempenho nos testes de pino-sobre-disco pode ser atribuído ao par tribológico pino com tratamento duplex deslizando contra ferro fundido cinzento FC 300 a uma velocidade de 70 m/min evidenciado pelo baixo coeficiente de atrito e pelas análises do desgaste do pino e da pista.

Com relação ao torque, constatou-se que:

- o aumento da velocidade de corte não teve influência significativa no valor do torque. O planejamento fatorial completo permitiu confirmar que a velocidade de corte e a interação de segunda ordem (velocidade de corte e ferramenta) não afetaram os valores de torque.

Entretanto, a ferramenta apresentou um p-valor que não pôde ser rejeitado pois se encontrou no limite entre aceitar ou rejeitar a significância desse parâmetro.

Com relação à rugosidade superficial dos furos, conclui-se que:

- em geral, o aumento da velocidade de corte contribuiu para um aumento da rugosidade superficial dos furos. Com relação à ferramenta, os maiores valores de rugosidade foram encontrados para as brocas sem revestimento se opondo aos menores valores obtidos pelas brocas com revestimento e com tratamento duplex, comprovando que os revestimentos melhoram consideravelmente a qualidade do furo. O uso do tratamento duplex ganhou destaque a baixas velocidades de corte (40 e 50 m/min), exibindo valores de rugosidade média inferiores às superfícies usinadas com brocas apenas revestidas.

Com relação ao diâmetro médio e o erro de circularidade, pode-se concluir que:

- o tratamento duplex assegurou às ferramentas de corte melhor desempenho, em termos de menor variação dimensional do diâmetro do furo, comparadas às ferramentas apenas com revestimento e às ferramentas sem revestimento.
- o aumento da velocidade de corte resultou em um aumento do erro de circularidade, mesmo com a utilização de revestimento. Entretanto, a utilização do tratamento duplex contribuiu para que as ferramentas obtivessem menor variação dos desvios nas velocidades de corte de 40 e 50 m/min comparadas às ferramentas apenas revestida e sem revestimento e, principalmente à velocidade de corte de 70 m/min, se sobressaindo à ferramenta apenas revestida.

Com relação ao desgaste das ferramentas de corte, constatou-se que:

- o nível de desgaste apresentado para todas as condições de broca na velocidade de corte de 40 m/min não foi significativo ao ponto de interromper os testes. Em geral, o desgaste das ferramentas ocorreu de forma mais acentuada próximo à ponta de corte e, em segundo plano, na aresta transversal. O tratamento duplex modificou o tipo de desgaste, considerando os mesmos parâmetros de corte.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados apresentados neste trabalho representam uma investigação limitada à análise de alguns parâmetros pré-selecionados. Sendo assim, são elencadas algumas sugestões para trabalhos futuros a fim de dar continuidade a essa linha de pesquisa e, questões que tenham ficado pouco esclarecidas possam, de uma forma expedita, serem explicadas.

- avaliar o desempenho das ferramentas com tratamento duplex ao variar o avanço, uma vez que este é um dos principais parâmetros influenciadores nos processos de usinagem.
- analisar o desgaste das ferramentas por meio da medição do desgaste de flanco.
- utilizar um processo de limpeza das brocas que seja mais eficiente, principalmente quando se trabalha com materiais muito dúcteis devido à aderência de material, permitindo, assim, a análise dos mecanismos de desgaste presentes após os testes.
- investigar a influência dos parâmetros de entrada na força de avanço a fim de complementar os resultados já apresentados.

ABSTRACT

The search for new materials and processes for cutting tools so that they become more productive is constantly boosted by the emergence of new alloys with higher hardness and mechanical properties and by industries that aim at productivity and quality of its products as well services to satisfy the final customer. Wear, as one of the most frequent industrial problems, can be minimized and controlled, but it cannot be eliminated. Thus, it is important to study new materials, processes and mechanisms of wear aiming the performance gain with these in service, through laboratory studies. The effect of duplex treatment (low pressure nitriding followed by AlCr-based coating produced by the PVD process) was studied in AISI M2 high speed steel drills in the drilling operation of the FC 300 gray cast iron. The results were compared to those found in tests performed with only coated drills and with uncoated drills. The duplex treatment increased by 7% the microhardness of the substrate compared to a coated surface only. In the pin-on-disc tests (AISI M2 high speed steel pin and FC 300 gray cast iron disc), the highest coefficient of friction values was verified for uncoated tools, presenting abrasive wear on the surface of the pins and discs. The best performance was achieved with the pin with duplex treatment (nitriding followed by coating) with sliding velocity of 70 m/min. Regarding the drilling tests, it was verified, through ANOVA, that the cutting speed and second-order interaction (cut speed and tool) did not affect the torque values. As for the roughness, in general, the increase of the cutting speed contributed to an increase of the surface roughness of the holes. The duplex treatment assured the cutting tools better performance in terms of lower dimensional variation of the bore diameter, and increased cutting speed resulted in an increase in circularity error, even with the use of coating. In general, tool wear occurred more sharply near the cutting tip and, in the background, at the chisel edge. It was also verified that the duplex treatment influenced the type of wear, considering the same cutting parameters.

Keywords: drilling; nitriding, AlCr-based coating; AISI M2 high speed steel; gray cast iron

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ABNT. **Brocas Helicoidais – Termos, definições e tipos.** ABNT NBR ISO 5419, 2009.
- 2 ABNT. **Especificações Geométricas do Produto (GPS) – Rugosidade: Método do Perfil – Termos, Definições e Parâmetros da Rugosidade.** ABNT NBR ISO 4287, 2002.
- 3 ABNT. **Produtos Siderúrgicos – Terminologia.** ABNT NBR 6215, 2011.
- 4 ABNT. **Usinagem – Processos Mecânicos.** ABNT NBR 6175, 2015.
- 5 AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões.** São Paulo: Edgard Blücher, 1977.
- 6 ASTAKHOV, V. P. **Manufacturing Design and Technology - Drills: Science and Technology of Advanced Operations.** New York: CRC Press, 2014.
- 7 ASTM G99-05. **Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus,** 2010.
- 8 BALZERS. **Balinit Helica.** Catálogo Balzers.
- 9 BALZERS. **Nitreção.** Oerlikon Balzers Coating, 2007.
- 10 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.** V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Belo Horizonte – MG, 2009.
- 11 BARROS NETO, B. D.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como Fazer Experimentos.** 4ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

- 12 BELL, T.; DONG, H; SUN, Y. **Realising the Potential of Duplex Surface Engineering.** Tribology International, v. 31, n. 1-3, p. 127-137, 1998.
- 13 BHUSHAN, B. **Introduction to Tribology.** 2ª ed. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2013.
- 14 BLAU, P. J. **Friction Science and Technology: From Concepts to Applications.** 2ª ed. New York: CRC Press, 2009.
- 15 BOEHS, L.; FRIEDRICH, D.; AMBRÓZIO FILHO, F.; DE LIMA, L. F. C. P.; DAS NEVES, M. D. M.; RIBEIRO, O. C. S.; APARECIDA, R. **Metalurgia do Pó Empregada na Fabricação de Ferramentas de Aço Rápido.** Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/conem/2000/HC8764.pdf>. Acesso em 15/06/2017.
- 16 BRESSAN, J. D.; COMELI, F. W. **Estudo da Resistência ao Desgaste de Aço AISI 422 Tratado Termicamente, Nitretado e com Revestimentos Aspergidos de Carboneto de Cromo-Níquel.** 4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação: COBEF, 2007.
- 17 CALLISTER JR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- 18 CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos.** 7ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.
- 19 DA SILVA, A. E. **Furação de Ferros Fundidos de Alta Resistência Aplicados em Cabeçotes de Motores.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2016.
- 20 DA SILVA, H. A. **Influência do Ciclo de Furação na Usinabilidade do Ferro Fundido Cinzento GH190.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2010.

- 21 DE SOUZA, A. J.; MATTES, F. B.; MOGNAGA, G. F. **Análise dos Esforços de Corte Gerados na Furação de Ferro Fundido GGG50 para Brocas de Metal Duro com Diferentes Microgeometrias.** VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Uberlândia, 2014.
- 22 DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** 8ª ed. São Paulo: Artliber Editora, 2013.
- 23 DOS SANTOS, G. R. **Caracterização e Avaliação do Comportamento Tribológico do Aço DIN X100CrMoV8-1-1 com Tratamento Duplex.** Tese de Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.
- 24 EVANS, R.; HOOGENDOORN, F.; PLATT, E. **Lubrication & Machining of Compacted Graphite Iron.** Metal Working Division Laboratory, 2013.
- 25 FRANCO JR, A. R.; PINEDO, C. E.; TSCHIPTSCHIN, A. P. **Utilização da Nitretação sob Plasma como Pré-Tratamento ao Revestimento TiN-PVD na Geração de Superfícies Duplex no Aço AISI H13.** Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v. 5, n. 3, p. 179-185, 2009.
- 26 FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais.** São Paulo: Edgard Blücher, 1970.
- 27 HOLMBERG, K.; MATTHEWS, A. **Coatings Tribology: Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering.** Amsterdam: Elsevier, 2009.
- 28 HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials.** CRC Press, 1992.
- 29 ICHIMURA, H.; ISHII, Y.; RODRIGO, A. **Hardness Analysis of Duplex Coating.** Surface and Coatings Technology 169-170 (2003) 735-738.
- 30 KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1: Cutting.** RWTH ed. Berlin: Springer, 2011.

- 31 KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Tecnologia da Usinagem com Ferramenta de Corte de Geometria Definida: Parte 1**. Traduzido por Prof. Dr. Ing. Walter Lindolfo Weingaertner e Prof. Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter, do livro “Fertigungsverfahren – Drehen, Bohren, Fräsen”. Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- 32 KWIETNIEWSKI, C.; FONTANA, W. A.; MORAES, C. A. M.; HECK, N. C.; STROHAECKER, T. R. **Estudo da Fragilização da Camada Nitretada de um Aço Rápido AISI M2 Recoberto por TiN pela Precipitação de Carbonetos**. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v. 2, n. 2, p. 33-38, 2005.
- 33 LE BOURHIS, E.; GOUDEAU, P.; STAIA, M. H.; CARRASQUERO, E.; PUCHI-CABRERA, E. S. **Mechanical Properties of Hard AlCrN-Based Coated Substrates**. Surface & Coatings Technology 203 (2009) 2961-2968.
- 34 MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2ª ed. São Paulo: Blucher, 2011.
- 35 MARMENTINI, M. M. **Análise da Furação do Ferro Fundido Nodular Utilizando Brocas Helicoidais de M2 Nitretadas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2009.
- 36 MARQUES, F. M. **Avaliação do Desempenho de Brocas Helicoidais de Aço Rápido Revestidas na Usinagem de Ferro Fundido Nodular GGG50**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
- 37 MARQUES, F. M.; ROCHA, A. S.; CAVALER, L. C. C.; CURI, E. I. M. **Caracterização de Desgaste de Brocas de HSS Revestidas com AlCrN e não Revestidas, em Ensaios de Furação, na Usinagem de Ferro Fundido Nodular DIN GGG50**. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. Vol. 19, Nº 1, pp. 87-104, 2014).
- 38 MATTHEWS, A.; LEYLAND, A. **Hybrid Techniques in Surface Engineering**. Surface and Coatings Technology 71 (1995) 88-92.

- 39 MATTOX, D. M. **Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing: Film Formation, Adhesion, Surface Preparation and Contamination Control.** New Jersey, USA: Noyes Publications, 1998.
- 40 MINITAB. **Suporte ao Minitab 18.** Disponível em <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/how-to/paired-t/before-you-start/overview/>. Acesso em: 16/10/2017.
- 41 MITSUBISHI. **Tooling Technology – Level 2.** Mitsubishi Materials.
- 42 MO, J. L.; ZHU, M. H. **Sliding Tribological Behavior of AlCrN Coating.** Tribology International 41 (2008) 1161-1168.
- 43 MO, J. L.; ZHU, M. H.; LEI, B.; LENG, Y. X.; HUANG, N. **Comparison of Tribological Behaviours of AlCrN and TiAlN Coatings – Deposited by Physical Vapor Desposition.** ScienceDirect, Wear 263 (2007) 1423-1429.
- 44 NICKEL, J.; SHUAIB, A. N.; YILBAS, B. S.; NIZAM, S. M. **Evaluation of the Wear of Plasma-Nitrided and TiN-Coated HSS Drills Using Conventional and Micro-Pixe Techniques.** Wear 239 (2000) 155-167.
- 45 NOVASKI, O. **Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica.** 2ª ed. São Paulo: Blucher, 2013.
- 46 PAIVA JR, J. M. F.; 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, 22:3155-3160.
- 47 PESSIN, M. A.; TIER, M. D.; STROHAECKER, T. R.; BLOYCE, A.; SUN, Y.; BELL, T. **The Effects of Plasma Nitriding Process Parameters on the Wear Characteristics of AISI M2 Tool Steel.** Tribology Letters 8 (2000) 223-228.
- 48 RABINOWICZ, E. **Friction and Wear of Materials.** 2ª ed. Canadá: John Wiley & Sons, 1995.

- 49 REZENDE, J. L. T. L. **Análise Tribológica de Conjugados (CrAl)N Depositados por PAPVD sobre Ferramentas de Metal Duro com Diferentes Rugosidades Superficiais.** Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
- 50 ROUSSEAU, A. F.; PARTRIDGE, J. G.; MAYES, E. L. H.; TOTON, J. T.; KRACICA, M.; MCCULLOCH, D. G.; DOYLE, E. D. **Microstructural and Tribological Characterisation of a Nitriding/TiAlN PVD Coating Duplex Treatment Applied to M2 High Speed Steel Tools.** Surface & Coatings Technology 272 (2015) 403-408.
- 51 SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais.** São Paulo: Artliber Editora, 2007.
- 52 SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles.** 2ª ed. New York: Oxford University Press, 2005.
- 53 SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais.** 3ª ed. São Paulo: Blucher, 2010.
- 54 SPAI, E.; BATISTA, J. C. A.; LETCH, M.; HOUSDEN, J.; LERGA, B. **Characterisation and Applications of Cr–Al–N Coatings.** Surface & Coatings Technology 200 (2005) 1507-1513.
- 55 TEIXEIRA, C. R. **Redução e Eliminação de Fluidos de Corte nos Processos de Usinagem com Ferramentas de Corte de Geometria Definida.** Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- 56 TEIXEIRA, K. D. **Influência da Velocidade de Deslizamento no Desgaste do Par Tribológico Ferro Fundido Cinzento (MC 12 e MC 13) – Ferro Fundido Cinzento Centrifugado.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, 2011.
- 57 TRENT, E.; WRIGHT, P. **Metal Cutting.** 4ª ed. Estados Unidos da América: Butterworth Heinemann, 2000.

58 WANKE, C. H. **Influência da Temperatura e da Atmosfera do Plasma na Nitretação Iônica do Aço Rápido M2 Convencional e Sinterizado.** Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais e Processos Avançados, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2003.

APÊNDICE A

A.1 Calibração do dinamômetro

TABELA A.1 – Dados da calibração

Massa	Tensão (V)			Força (N)	Distância (metros)	Torque (Nm)
	Valor Inicial	Valor Final	Diferença			
0,000	0,218	0,216	-0,002	0,000	0,040	0,000
0,412	0,216	0,224	0,008	4,042	0,040	0,162
0,712	0,214	0,232	0,018	6,985	0,040	0,279
1,508	0,213	0,241	0,028	14,793	0,040	0,592
2,050	0,213	0,245	0,032	20,111	0,040	0,804
2,598	0,211	0,255	0,044	25,486	0,040	1,019
3,250	0,210	0,271	0,061	31,883	0,040	1,275
4,042	0,210	0,280	0,070	39,652	0,040	1,586
4,694	0,209	0,297	0,088	46,048	0,040	1,842
5,046	0,210	0,309	0,099	49,501	0,040	1,980
6,014	0,210	0,346	0,136	58,997	0,040	2,360
6,666	0,209	0,354	0,145	65,393	0,040	2,616
8,000	0,209	0,371	0,162	78,480	0,040	3,139
8,652	0,209	0,380	0,171	84,876	0,040	3,395
9,984	0,209	0,408	0,199	97,943	0,040	3,918
10,636	0,209	0,417	0,208	104,339	0,040	4,174
11,970	0,209	0,431	0,222	117,426	0,040	4,697
12,622	0,209	0,474	0,265	123,822	0,040	4,953

FONTE: O autor

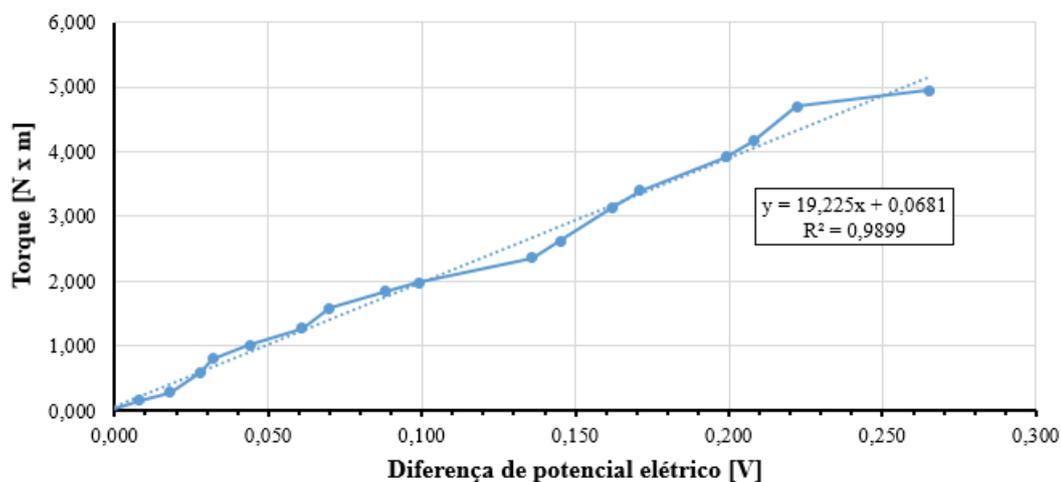


GRÁFICO A.1: Curva de calibração e equação de regressão do torque x tensão

FONTE: O autor

APÊNDICE B

B.1 Resultados das medições de torque

Ferramenta	Velocidade de corte [m/min]	Comprimento usinado [mm]	Torque [N x m]
Sem revestimento	40	25	13,9
		175	13,4
		1300	12,9
		6250	12,6
	50	25	14,4
		175	15,5
		1300	14,7
60	25	16,6	
Com revestimento à base de AlCr	40	25	12,6
		175	13,4
		550	13,6
		6250	13,1
	50	25	13,6
		175	13,9
		3675	19,3
	60	25	13,6
		175	13,1
		400	12,7
		2050	13,3
	70	25	13,4
175		13,3	
Com tratamento duplex	40	25	12,5
		175	13,0
		325	13,8
		550	13,0
		6250	12,8
	50	25	13,0
		175	13,3
		3550	14,4
	60	25	13,2
		175	13,7
		400	14,2
		2050	14,0
	70	25	12,6
175		12,7	
2050		12,1	
2650		14,8	

APÊNDICE C

C.1 Resultado das medições de rugosidade média R_a [μm] dos furos

	Comprimento usinado [mm]	Ferramenta sem revestimento		Ferramenta apenas com revestimento à base de AlCr		Ferramenta com tratamento duplex	
		Rugosidade média [R_a]	Desvio padrão	Rugosidade média [R_a]	Desvio padrão	Rugosidade média [R_a]	Desvio padrão
Velocidade de corte 40 m/min	50	9,7	0,870	5,1	0,577	5,3	0,663
	200	9,4	0,998	5,6	0,632	6,4	0,589
	350	9,5	1,519	6,8	0,443	6,7	0,529
	575	7,5	0,870	7,6	1,826	6,6	0,589
	1325	9,4	2,357	6,1	0,725	6,9	0,473
	1875	9,2	1,784	5,6	0,522	6,7	0,719
	2500	7,3	0,300	6,1	0,463	6,7	0,597
	3125	7,9	0,443	6,0	1,075	6,2	0,833
	3750	7,9	0,600	7,0	0,519	7,0	0,342
	4375	8,8	1,558	8,7	0,755	8,3	0,383
	5000	8,7	0,900	8,4	0,998	8,1	0,839
5625	7,9	0,775	8,8	0,700	8,9	1,322	
6250	9,3	1,013	8,2	0,864	8,4	1,436	
Velocidade de corte 50 m/min	50	8,6	0,500	5,3	0,957	6,5	0,706
	200	7,9	0,115	7,8	1,636	6,8	1,393
	375	8,7	1,226	6,3	1,159	6,2	1,093
	625	11,2	1,320	6,6	0,443	7,6	1,310
	1000	7,9	1,886	6,0	0,823	6,8	2,219
	1375	9,1	0,959	6,9	1,570	8,8	0,522
	1750	11,8	1,215	10,2	1,166	7,0	1,797
	2300	10,9	0,959	7,0	0,462	7,1	0,662
	2500	-	-	4,8	1,237	8,0	0,525
	2750	-	-	8,1	1,310	8,3	0,895
	3000	-	-	9,0	0,870	7,4	1,027
	3250	-	-	10,6	0,915	8,1	1,320
	3500	-	-	12,2	1,269	7,5	1,093
Velocidade de corte 60 m/min	50	10,0	1,774	7,2	0,966	6,6	0,443
	200	-	-	7,8	0,885	8,7	0,663
	425	-	-	6,9	0,574	8,6	0,473
	650	-	-	6,7	1,519	9,3	0,931
	875	-	-	6,3	0,719	9,2	1,112
	1100	-	-	6,9	0,739	8,8	0,566
	1325	-	-	7,9	1,552	8,7	1,571
	1550	-	-	7,8	0,300	9,0	1,296
	1775	-	-	9,7	0,755	8,1	0,808
2075	-	-	6,3	0,755	5,2	1,526	
Velocidade de corte 70 m/min	50	-	-	4,3	0,755	8,9	0,998
	200	-	-	5,3	0,755	9,1	1,778
	300	-	-	2,5	0,622	10,2	0,957
	750	-	-	-	-	10,3	1,050
	1125	-	-	-	-	10,0	1,451
	1500	-	-	-	-	11,7	1,455
	1875	-	-	-	-	11,4	1,708
	2275	-	-	-	-	12,3	1,595
2625	-	-	-	-	4,7	0,661	

C. 2 Resultados das medições do diâmetro médio [mm] dos furos

	Comprimento usinado [mm]	Ferramenta sem revestimento		Ferramenta apenas com revestimento à base de AlCr		Ferramenta com tratamento duplex	
		Diâmetro médio	Desvio padrão	Diâmetro médio	Desvio padrão	Diâmetro médio	Desvio padrão
Velocidade de corte 40 m/min	50	10,1174	0,0138	10,0267	0,018	10,0138	0,0127
	200	10,0910	0,0147	10,0229	0,017	10,0206	0,0122
	350	10,1478	0,0027	10,0395	0,017	10,0263	0,0193
	575	10,1723	0,0158	10,0756	0,011	10,0219	0,0022
	1325	10,1149	0,0243	10,0457	0,006	10,0287	0,0051
	1875	10,1140	0,0212	10,0588	0,004	10,1898	0,2687
	2500	10,0853	0,0037	10,1240	0,017	10,0475	0,0034
	3125	10,1153	0,0134	10,0656	0,013	10,0191	0,0071
	3750	10,0658	0,0087	10,0508	0,012	10,0162	0,0019
	4375	10,0777	0,0124	10,0600	0,003	10,0259	0,0107
	5000	10,0799	0,0172	10,0602	0,011	10,0405	0,0209
	5625	10,0943	0,0077	10,0556	0,007	10,0345	0,0057
6250	10,1026	0,0166	10,0491	0,003	10,0440	0,0137	
Velocidade de corte 50 m/min	50	10,1441	0,0800	10,0730	0,0117	10,0171	0,0055
	200	10,2076	0,0392	10,0776	0,0181	10,0385	0,0206
	375	10,1757	0,0345	10,1108	0,0201	10,0244	0,0081
	625	10,1989	0,0313	10,0835	0,0263	10,0374	0,0112
	1000	10,1508	0,0150	10,0976	0,0533	10,0495	0,0017
	1375	10,1170	0,0047	10,2015	0,0342	10,0348	0,0128
	1750	10,1074	0,0128	10,1317	0,0315	10,0221	0,0031
	2300	10,1201	0,0137	10,1594	0,0383	10,0426	0,0113
	2500	-	-	10,0696	0,0137	10,0505	0,0106
	2750	-	-	10,0905	0,0097	10,0291	0,0035
	3000	-	-	10,0685	0,0090	10,0393	0,0076
	3250	-	-	10,1179	0,0114	10,0477	0,0226
3500	-	-	10,1547	0,0114	10,0807	0,0128	
Velocidade de corte 60 m/min	50	10,1647	0,0487	10,0559	0,0049	10,2220	0,0207
	200	-	-	10,0410	0,0123	10,0833	0,0181
	425	-	-	10,0458	0,0079	10,1342	0,0463
	650	-	-	10,0373	0,0251	10,1122	0,0329
	875	-	-	10,0712	0,0071	10,1555	0,0100
	1100	-	-	10,0547	0,0166	10,1428	0,0288
	1325	-	-	10,0868	0,0295	10,2208	0,0826
	1550	-	-	10,0442	0,0089	10,1480	0,0280
	1775	-	-	10,0750	0,0196	10,1439	0,0550
	2075	-	-	10,0957	0,0350	10,1097	0,0237
Velocidade de corte 70 m/min	50	-	-	10,0427	0,0239	10,0922	0,0289
	200	-	-	10,1087	0,0150	10,0863	0,0050
	300	-	-	10,1306	0,0106	10,1194	0,0284
	750	-	-	-	-	10,1122	0,0225
	1125	-	-	-	-	10,1210	0,0033
	1500	-	-	-	-	10,1035	0,0295
	1875	-	-	-	-	10,1213	0,0202
	2275	-	-	-	-	10,1338	0,0179
	2625	-	-	-	-	10,0782	0,0454

C.3 Resultados das medições do erro de circularidade [mm] dos furos

	Comprimento usinado [mm]	Ferramenta sem revestimento		Ferramenta apenas com revestimento à base de AICr		Ferramenta com tratamento duplex	
		Erro de circularidade	Desvio padrão	Erro de circularidade	Desvio padrão	Erro de circularidade	Desvio padrão
Velocidade de corte 40 m/min	50	0,0610	0,0138	0,0228	0,005	0,0260	0,0007
	200	0,0400	0,0113	0,0205	0,004	0,0236	0,0075
	350	0,0472	0,0101	0,0290	0,011	0,0236	0,0032
	575	0,0283	0,0012	0,0393	0,014	0,0195	0,0063
	1325	0,0739	0,0178	0,0156	0,003	0,0200	0,0037
	1875	0,0217	0,0065	0,0246	0,011	0,0264	0,0020
	2500	0,0171	0,0067	0,0305	0,024	0,0329	0,0032
	3125	0,0384	0,0004	0,0209	0,007	0,0347	0,0043
	3750	0,0188	0,0125	0,0201	0,005	0,0273	0,0087
	4375	0,0196	0,0012	0,0264	0,017	0,0205	0,0006
	5000	0,0177	0,0065	0,0367	0,023	0,0344	0,0125
	5625	0,0198	0,0065	0,0182	0,005	0,0418	0,0072
6250	0,0282	0,0136	0,0199	0,006	0,0332	0,0052	
Velocidade de corte 50 m/min	50	0,0434	0,0102	0,0605	0,0174	0,0414	0,0022
	200	0,0356	0,0119	0,0489	0,0053	0,0337	0,0054
	375	0,1171	0,0329	0,0536	0,0067	0,0444	0,0021
	625	0,0883	0,0060	0,0357	0,0064	0,0227	0,0071
	1000	0,0760	0,0242	0,0719	0,0030	0,0254	0,0076
	1375	0,0468	0,0271	0,1307	0,0149	0,0189	0,0013
	1750	0,0396	0,0117	0,0363	0,0066	0,0263	0,0033
	2300	0,0276	0,0074	0,0442	0,0143	0,0191	0,0040
	2500	-	-	0,0250	0,0020	0,0296	0,0026
	2750	-	-	0,0223	0,0106	0,0304	0,0077
	3000	-	-	0,0243	0,0070	0,0267	0,0107
	3250	-	-	0,0340	0,0021	0,0213	0,0039
3500	-	-	0,0287	0,0089	0,0494	0,0032	
Velocidade de corte 60 m/min	50	0,0631	0,0140	0,0867	0,0169	0,1325	0,0191
	200	-	-	0,0688	0,0132	0,0869	0,0275
	425	-	-	0,0854	0,0233	0,0835	0,0049
	650	-	-	0,0720	0,0183	0,0826	0,0182
	875	-	-	0,0983	0,0218	0,0964	0,0194
	1100	-	-	0,0960	0,0308	0,0893	0,0036
	1325	-	-	0,0855	0,0071	0,0832	0,0108
	1550	-	-	0,1208	0,0301	0,1134	0,0209
	1775	-	-	0,0790	0,0166	0,0638	0,0288
2075	-	-	0,0643	0,0131	0,0487	0,0062	
Velocidade de corte 70 m/min	50	-	-	0,0568	0,0101	0,0642	0,0197
	200	-	-	0,0927	0,0030	0,0494	0,0061
	300	-	-	0,0831	0,0077	0,0145	0,0070
	750	-	-	-	-	0,0191	0,0040
	1125	-	-	-	-	0,0226	0,0033
	1500	-	-	-	-	0,0262	0,0049
	1875	-	-	-	-	0,0280	0,0106
	2275	-	-	-	-	0,0551	0,0030
	2625	-	-	-	-	0,0763	0,0073

APÊNDICE D

D.1 Resultados da análise de variância: Torque (Ferramenta x Velocidade de corte)

Informações dos Fatores

Fator	Tipo	Níveis	Valores
Velocidade de corte	Fixo	4	40; 50; 60; 70
Ferramenta	Fixo	2	Revestida; Nitretada

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Velocidade de corte	3	0,9869	0,32896	3,31	0,078
Ferramenta	1	0,5256	0,52563	5,29	0,050
Velocidade de corte*Ferramenta	3	0,3969	0,13229	1,33	0,331
Erro	8	0,7950	0,09938		
Total	15	2,7044			

Sumário do Modelo

S	R2	R2 (aj)	R2 (pred)
0,315238	70,60%	44,88%	0,00%

Coefficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor T	Valor-P	VIF
Constante	13,1813	0,0788	167,25	0,000	
Velocidade de corte					
40	-0,306	0,137	-2,24	0,055	1,50
50	0,269	0,137	1,97	0,084	1,50
60	0,219	0,137	1,60	0,148	1,50
Ferramenta					
Revestida	0,1813	0,0788	2,30	0,050	1,00
Velocidade de corte*Ferramenta					
40 Revestida	-0,056	0,137	-0,41	0,691	1,50
50 Revestida	0,119	0,137	0,87	0,410	1,50
60 Revestida	-0,231	0,137	-1,69	0,129	1,50

Equação de Regressão

$$\begin{aligned}
 \text{Torque} = & 13,1813 - 0,306 \text{ Velocidade de corte}_{40} + 0,269 \text{ Velocidade de corte}_{50} \\
 & + 0,219 \text{ Velocidade de corte}_{60} - 0,181 \text{ Velocidade de corte}_{70} \\
 & + 0,1813 \text{ Ferramenta}_{\text{Revestida}} - 0,1813 \text{ Ferramenta}_{\text{Nitretada}} \\
 & - 0,056 \text{ Velocidade de corte}_{40} \text{ Ferramenta}_{\text{Revestida}} \\
 & + 0,056 \text{ Velocidade de corte}_{40} \text{ Ferramenta}_{\text{Nitretada}} \\
 & + 0,119 \text{ Velocidade de corte}_{50} \text{ Ferramenta}_{\text{Revestida}} \\
 & - 0,119 \text{ Velocidade de corte}_{50} \text{ Ferramenta}_{\text{Nitretada}} \\
 & - 0,231 \text{ Velocidade de corte}_{60} \text{ Ferramenta}_{\text{Revestida}} \\
 & + 0,231 \text{ Velocidade de corte}_{60} \text{ Ferramenta}_{\text{Nitretada}} \\
 & + 0,169 \text{ Velocidade de corte}_{70} \text{ Ferramenta}_{\text{Revestida}} \\
 & - 0,169 \text{ Velocidade de corte}_{70} \text{ Ferramenta}_{\text{Nitretada}}
 \end{aligned}$$

Ajustados e Diagnósticos para Todas as Observações

Obs.	Torque	Ajuste	Resid	Resid Pad
1	12,600	13,000	-0,400	-1,79

2	12,500	12,750	-0,250	-1,12
3	13,600	13,750	-0,150	-0,67
4	13,000	13,150	-0,150	-0,67
5	13,600	13,350	0,250	1,12
6	13,200	13,450	-0,250	-1,12
7	13,400	13,350	0,050	0,22
8	12,600	12,650	-0,050	-0,22
9	13,400	13,000	0,400	1,79
10	13,000	12,750	0,250	1,12
11	13,900	13,750	0,150	0,67
12	13,300	13,150	0,150	0,67
13	13,100	13,350	-0,250	-1,12
14	13,700	13,450	0,250	1,12
15	13,300	13,350	-0,050	-0,22
16	12,700	12,650	0,050	0,22