

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE
DO SUL

CLEDERSON BARRO

**DESEMPENHO DE REVESTIMENTOS DE POLITETRAFLUOROETILENO E
DISSULFETO DE MOLIBDÊNIO EM BROCAS PARA FURAÇÃO DE MADEIRA**

Caxias do Sul,
2023.

CLEDERSON BARRO

**DESEMPENHO DE REVESTIMENTOS DE POLITETRAFLUOROETILENO E
DISSULFETO DE MOLIBDÊNIO EM BROCAS PARA FURAÇÃO DE MADEIRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Rio Grande do Sul, para a obtenção do grau de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Tecnologia e Engenharia de Materiais.

Linha de Pesquisa: Aplicação de revestimentos em ferramentas de corte.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Luís Gasparin

Caxias do Sul,

2023.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

B277d Barro, Clederson

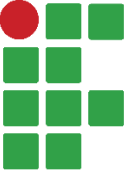

Desempenho de revestimentos de politetrafluoroetileno e dissulfeto de molibdênio em brocas para furação de madeira / Clederson Barro; orientador Alexandre Luís Gasparin. – Caxias do Sul, 2023.

78 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Caxias do Sul. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais. Mestrado Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais. Caxias do Sul, 2023.

1. Ciência dos materiais. 2. Brocas (Ferramenta). 3. Propriedades mecânicas. 4. Revestimentos. 5. Politetrafluoroetileno. 6. Dissulfeto de molibdênio. I. Gasparin, Alexandre Luís. II. Título.

CDU 620.17

	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul.	
	Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais.	

Dissertação intitulada Desempenho de revestimento de Politetrafluoroetileno e Dissulfeto de Molibdênio em brocas para furação de madeira, de autoria de Clederson Barro, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Cinthia Gabriely Zimmer
IFRS campus Feliz

Prof. Dr. Daniel Amoretti Gonçalves
IFRS campus Caxias do Sul

Prof. Dr. Leandro Luís Corso
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Luís Gasparin
IFRS campus Caxias do Sul

Profa. Dra. Cinthia Gabriely Zimmer
Coordenadora do PPG-TEM

Data de apresentação: 05 de junho de 2023

DEDICATÓRIA

A minha esposa Raquel, e a minha família pelo incentivo, compreensão, carinho, e por despertar em mim o desejo de ser uma pessoa vencedora e cada vez melhor.

Aos meus pais Ariberto e Teresinha que nunca desistiram e sempre lutaram para me dar as condições de estudar e alcançar meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a minha família, especialmente ao meu pai e minha mãe que me deram suporte e estrutura para chegar até este importante momento profissional e pessoal. Agradecimento também muito especial a minha esposa Raquel Moro Gallon Barro pelos inúmeros momentos de compreensão, cuidando do lar e dos filhos Miguel e Luiza, enquanto estive dedicando meu tempo nestes estudos, pelo incentivo e pela força nos momentos difíceis. Sem ela este momento não seria possível.

Ao meu professor orientador Alexandre Luís Gasparin pela sua ajuda, empenho e principalmente por acreditar em mim e me dar a oportunidade, juntamente com a professora Cinthia G. Zimmer, de ingressar neste curso me dando a possibilidade de alcançar um sonho. A todos os professores pela dedicação e esforço em transmitir os conhecimentos.

A empresa que trabalho e ao meu gestor Ricardo Dendena, por acreditar em mim e me proporcionar as condições de realização o estudo

RESUMO

O presente estudo mostra a performance de dois revestimentos de brocas de aço AISI 1060 do tipo *Auger Bits* para a furação de madeira. Foram avaliados os seguintes tipos de revestimentos: politetrafluoroetileno (PTFE) e dissulfeto de molibdênio (MoS_2). A caracterização química dos revestimentos foi feita por espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). Já a avaliação da vida da ferramenta, através de testes de bancada, medindo-se o torque e potência durante o processo de furação. A medição de dureza dos corpos de prova de madeira foi feita na escala Shore D, e para a medição de dureza dos revestimentos e do substrato foi utilizada a escala Vickers. Através da metalografia foram determinadas a microestrutura da broca e a espessura de camada dos revestimentos. Todas as análises foram realizadas de forma comparativa entre as amostras com PTFE, MoS_2 e a amostra sem revestimento (referência). As brocas com PTFE em relação à referência obtiveram reduções do torque de furação na ponta da broca de 34,6 % e na região do canal de saída do cavaco de 4,3 %, reduzindo-se o consumo de energia durante as furações. Já as amostras de MoS_2 obtiveram além de um aumento do torque de furação de 28 %, um consumo de energia de 18 % superior ao da amostra referência. O revestimento de MoS_2 deslocou-se totalmente na região das arestas de corte. O torque nas amostras com PTFE foi menor em 49 % em comparação com MoS_2 na região da ponta e em 30 % no canal. Testes complementares de furação mostraram resultados positivos em todos os aspectos para as amostras de PTFE em comparação com a referência enquanto houve baixa remoção da camada de revestimento. Observou-se um revenimento da têmpera nas microestruturas dos substratos de ambos os revestimentos e redução da dureza devido a exposição ao aquecimento durante o processo de deposição dos revestimentos, no entanto, os resultados apontaram a viabilidade das brocas com revestimentos de PTFE em detrimento ao MoS_2 , além da melhor performance quando comparadas com as amostras referência. As melhorias podem proporcionar aos usuários maior número de furos por carga de bateria e melhor controle na furação devido ao baixo torque.

Palavras-chave: Broca para madeira, politetrafluoroetileno, dissulfeto de molibdênio, revestimentos finos.

ABSTRACT

The present study shows the performance of two coatings for AISI 1060 steel drills bits of the *Auger Bits* type for wood drilling. The following types of coatings were evaluated: polytetrafluoroethylene (PTFE) and molybdenum disulfide (MoS_2). The chemical characterization of the coatings was performed by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The evaluation of the useful life of the tool, through bench tests, measuring the torque and power during the drilling process. The hardness measurement of the wooden specimens was made in the Shore D scale, and for the measurement of the hardness of the films and the substrate the Vickers scale was used. Through metallography, the microstructure of the drill bit and the layer thickness of the films were determined. All analyses were performed comparatively between the samples with PTFE, MoS_2 and the sample without coating (standard). The drills with PTFE in relation to the standard ones obtained reductions of the drilling torque at the tip of the drill 34,6 % and in the region of the chip output in the flute of up to 4,3 %, reducing the expenditure of electrical power during the drilling. The MoS_2 samples, on the other hand, obtained an increase in drilling torque of 28 %, an energy consumption of 18 % higher than that of the standard sample. In addition to the MoS_2 film totally deflated in the region of the cutting edges. Torque in PTFE samples was 49 % lower compared to MoS_2 in the tip region and 30 % in the flute. Complementary drilling tests showed positive results in all aspects for the PTFE samples compared to the standard as long as the coating layer did not deflate. It was observed a tempering in the microstructures of the substrates of both films and reduction of hardness due to exposure to heating during the coatings deposition process, however, the results showed the viability of the drills with PTFE films to the detriment of MoS_2 , in addition to the better performance when compared to the standard samples. Improvements can provide to the users more holes per battery charge and better drilling control due to low torque.

Keywords: Wood drill, polytetrafluoroethylene, molybdenum disulfide, thin films.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Broca <i>Auger Bits</i> utilizada para furação em madeira.....	16
Figura 2 – Movimentos de corte na furação	20
Figura 3 – Elementos e tipos das brocas helicoidais	21
Figura 4 – Elementos da broca helicoidal	22
Figura 5 – Ângulos das arestas de corte conforme normas DIN 1412 e DIN 6581	23
Figura 6 – Trabalho de dobramento em função do ângulo de saída e saída do cavaco.....	24
Figura 7 – Desgaste de uma broca helicoidal	27
Figura 8 – Parâmetros de corte (a) e ação da força principal de corte (b).....	29
Figura 9 – Resultantes das forças de corte (a), furação em cheio com broca simétrica (b)	31
Figura 10 – Cápsula dinamométrica de quartzo fabricação Zeiss-Ikon A. G. (esq.) e dinamômetro para medida da força de corte no torneamento segundo Mauzin (dir.)	33
Figura 11 – Esquema das modificações polimórficas nas fases 2H, 3R e 1T das estruturas cristalinas do MoS ₂	38
Figura 12 – (a) Broca sem revestimento; (b) Com revestimento de dissulfeto de molibdênio; (c) Com revestimento de PTFE	43
Figura 13 – Equipamento para ensaios de furação com deslocamento nos eixos X, Y e Z, composto por sua estrutura, furadeira com bateria, célula de carga e os caibros de madeira utilizados na furação.	45
Figura 14 – Software utilizado na aquisição dos dados.....	46
Figura 15 – Plataforma piezoelétrica utilizada nos testes, gabarito de fixação e corpo de prova de <i>Pinus Elliottii</i> : a) antes da furação e b) durante os testes de furação.	47
Figura 16 – Medição de rugosidade: (a) posição do ângulo de saída da aresta de corte, (b) superfície externa do canal da broca, (c) superfície do alívio radial, (d) visão geral dos equipamentos utilizados.	48
Figura 17 – Rugosidade das brocas.	52
Figura 18 – Esforços axiais de corte: Máxima carga na ponta e no canal.....	53
Figura 19 – Esforços axiais de corte: Máxima carga na ponta e no canal ao longo dos testes de furação	54
Figura 20 – Esforços de corte: Máximo torque na ponta e no canal.	55
Figura 21 – Esforços de corte: Torque na ponta e no canal ao longo dos testes de furação	56
Figura 22 – Potência consumida na furação	57

Figura 23 – Potência consumida ao longo dos testes de furação.....	58
Figura 24 – Energia consumida comparada com tempo por furação.	59
Figura 25 – Energia consumida comparada com tempo ao longo de todos os testes de furação	60
Figura 26 – Comparação de deslocamento do revestimento: (a) PTFE com 5 furos (b) MoS ₂ com 5 furos (c) PTFE com 55 furos (d) MoS ₂ com 55 furos.....	61
Figura 27 – Amostras de PTFE com 200 furos	62
Figura 28 – Gráficos de FTIR: (a) revestimento de PTFE (b) revestimento de MoS ₂	63
Figura 29 – Microestrutura martensítica do aço da broca AISI SAE 1060: (a) condição temperado antes de aplicar os revestimentos (b) condição temperado e revenido após a aplicação dos revestimentos.	64
Figura 30 – Microestrutura da amostra de PTFE: (a, b, c) microestrutura e revestimento na região da ponta (d, e, f) microestrutura e revestimento no aresta de corte (g, h, i) microestrutura e revestimento na região do canal.	64
Figura 31 – Microestrutura da amostra de MoS ₂ : (a, b, c) microestrutura e revestimento na região da ponta (d, e, f) microestrutura e revestimento no aresta de corte (g, h, i) microestrutura e revestimento na região do canal.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de dureza Shore D do Pinus Elliottii.	56
Tabela 2 – Espessura de camada de revestimento em cada região da peça analisada comparando os valores previstos pelo fornecedor e após os testes realizados.	65
Tabela 3 – Comparativo de dureza Vickers nas amostras analisadas.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampère
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>The American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CFRP	Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono
CFRP	Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono
Cu	Cobre
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
e-PTFE	Politetrafluoroetileno Expandido
EUV	Radiação Ultravioleta Extrema
FEA	Análise de Elementos Finitos
FEA	Análise de Elementos Finitos
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier
HB	<i>Dureza Brinell</i>
HRc	Dureza Rockwell C
HV	Dureza Vickers
Mo	Molibdênio
MoS ₂	Dissulfeto de Molibdênio
mV/A	Milivolts/Ampère
N	Newton
N.m	Newton.Metros
NBR	Norma Brasileira
PBAT	Poli (Butileno Adipato-Co-Tereftalato)
PDA	Polidopamina
PLLA	Poli-L(Ácido Láctico)
PTFE	Politetrafluoroetileno
PVC	Policloreto de Vinila
PVDF	Poli(Fluoreto de Vinilideno)
RPM	Rotação por minuto
S	Enxofre
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> – EUA

SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
Shore D	Dureza Shore tipo D
TiAlN	<i>Titanium aluminium nitride</i>
TiN	Nitreto de Titânio
TiN	<i>Nitreto de titânio</i>
TMDs	Dicalcogenados de Metais de Transição
UTFPR	Central de Análises da Universidade Tecnológica Federal do Paraná
V	Volts
VB	<i>Largura média de desgaste do flanco</i>
VBmáx	<i>Largura máxima de desgaste do flanco</i>
W	Watts
ZrN	Nitreto de Zircônio

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Percentual
γ	Gama
γ_x	Ângulo de saída
ap	Profundidade de Corte [mm]
ax	Ângulo de folga lateral
b	largura de corte [mm]
bF e bM	Expoentes que caracterizam a influência do diâmetro da broca
Bx	Ângulo de cunha da ferramenta
CF e CM	Constantes derivadas de testes experimentais
d	diâmetro do furo [mm]
F	Força de corte [kg]
Fcz	Força de corte principal por aresta de corte [N]
Ff	Força de avanço [N]
h	Espessura de corte [mm]
hz	Espessura de corte por aresta [mm]
kgf/cm ²	Quilograma Força por Centímetro Quadrado
KH	Coeficiente de correção do material da peça a ser usinada
ks	Força específica de corte
M	Torque [kg.mm]
n	Velocidade angular [rpm]
°C	Graus Celsius
P	Potência de entrada [kW]
s	Avanço [mm/rev]
sz	Avanço por aresta de corte [mm]
T	Torque [Nm]
uF e uM	Expoentes que caracterizam a influência do avanço
ZE	Número de arestas de corte
ZE	Número de arestas de corte
η_M	Eficiência da máquina de furação
μm	Microns
ω	Velocidade radial [rad/s]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO.....	15
1.2	OBJETIVO GERAL.....	16
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS DO TRABALHO.....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1	FURAÇÃO	18
2.1.1	Processos de furação.....	18
2.1.2	Ferramentas de furação	20
2.1.3	Brocas helicoidais.....	21
2.1.3.1	Brocas tipo <i>Auger Bit</i>	22
2.1.3.2	Geometria de corte da broca	23
2.1.3.3	Função do ângulo de saída da broca helicoidal	24
2.2	DESGASTE.....	25
2.2.1	Formas de desgaste de desgaste.....	25
2.2.2	Desgaste e vida da ferramenta.....	26
2.2.3	Desgaste em brocas	26
2.3	CÁLCULO DA FORÇA, TORQUE E POTÊNCIA DE CORTE NA FURAÇÃO	28
2.3.1	Forças na furação em cheio	28
2.4	VERIFICAÇÃO DE ESFORÇOS COM INSTRUMENTAÇÃO.....	32
2.5	AÇOS PARA BROCAS DE FURAÇÃO DE MADEIRA	33
2.6	REVESTIMENTOS	34
2.6.1	Politetrafluoroetileno (PTFE).....	34
2.6.1.1	Aplicações com PTFE	35
2.6.2	Dissulfeto de Molibdênio (MoS₂).....	37
2.6.2.1	Aplicações com MoS ₂	39
2.6.3	Outros tipos de revestimentos para brocas	40
2.7	MADEIRA TIPO PINUS	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1	BROCAS	43
3.2	CORPOS DE PROVA.....	44
3.3	EQUIPAMENTOS PARA ENSAIO DE FURAÇÃO	44
3.4	MEDIÇÃO DE ESFORÇOS DE CORTE.....	45

3.5	APLICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS.....	47
3.6	CARACTERIZAÇÃO DAS BROCAS	47
3.6.1	Medição da rugosidade	47
3.6.2	Caracterização das brocas	48
3.7	DETERMINAÇÃO DOS GRUPOS FUNCIONAIS PRINCIPAIS DOS REVESTIMENTOS	49
3.8	CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE MADEIRA	49
3.9	ENSAIOS DE FURAÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS	49
3.10	PARÂMETROS DE CORTE.....	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
4.1	MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE.....	51
4.2	AVALIAÇÃO DA FORÇA DE AVANÇO	52
4.3	MEDIÇÃO DO TORQUE DE FURAÇÃO	54
4.4	DUREZA DA MADEIRA.....	56
4.5	POTÊNCIA E ROTAÇÃO.....	57
4.6	ENERGIA.....	59
4.7	ADERÊNCIA DO REVESTIMENTO.....	60
4.8	ANÁLISE DE FTIR	62
4.9	ANÁLISE METALOGRÁFICA	63
4.10	METODOLOGIA DE ENSAIOS.....	66
5	IMPACTOS TÉCNICO-CIENTÍFICO, ECONÔMICO	67
6	CONCLUSÕES.....	68
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
	REFERÊNCIAS	70
	ANEXO A – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO ALICATE AMPERÍMETRO	76

1 INTRODUÇÃO

O fornecimento de produtos cada vez mais inovadores e com múltiplos benefícios ao mercado tem sido um desafio tecnológico constante para as empresas. Em todos os casos, os processos de inovação devem aliar um custo atrativo e técnicas exclusivas de fabricação. Ferramentas de usinagem como brocas helicoidais sofrem desgastes nas arestas principais de corte em decorrência do atrito e esforços gerados entre a superfície da broca e o material perfurado, diminuindo a vida da ferramenta. A evolução tecnológica desse tipo de acessório se faz necessária em virtude da demanda de projetos de construção civil que utilizam madeira, os quais requerem maiores velocidades e menores esforços de execução nas obras e redução de custos.

A furação com brocas para madeira, especialmente em diâmetros maiores de quinze milímetros, requerem dos usuários um controle e cuidados maiores devido ao torque gerado pela ferramenta. Em alguns casos na construção civil há necessidade de furações mais profundas o que requer a extração facilitada de cavaco do furo. Além disso as furadeiras têm migrado cada vez mais para bateria onde seu uso é compartilhado entre fácil e difícil acesso à energia elétrica para recarga. Tendo em vista estes desafios, neste estudo busca-se investigar a influência dos revestimentos de PTFE e MoS₂ com o objetivo de minimizar os esforços de corte, especialmente o torque, reduzir o consumo de energia na furação para viabilizar uma quantidade maior de furos por carga de bateria e melhorar o escoamento do cavaco ao longo do canal.

O politetrafluoroetileno (PTFE) é um material muito utilizado na fabricação de revestimentos antiaderentes [1], [2]; Ele pertence à família de polímeros conhecidos por flúor-carbonos com teores significativos de flúor e resistentes à inflamabilidade. Também exibe uma resistência excepcional ao ataque por soluções tanto ácidas quanto alcalinas [3]. É um polímero fluorado de alta estabilidade térmica, química e baixo coeficiente de atrito e suporta uma tensão de compressão da ordem de 30 MPa [4].

As características mecânicas do PTFE mostram um módulo de elasticidade sob tração na faixa de 0,40 a 0,55 GPa, um limite de resistência à tração entre 20,7 e 34,5 MPa, um limite de escoamento de 13,8 a 15,2 MPa e um alongamento na ruptura entre 200 e 400 % [5]. O polímero cristalino PTFE possui alta densidade em relação aos demais polímeros, devido ao pequeno tamanho do átomo de flúor em relação ao de carbono e à regularidade da cadeia molecular, possui um ponto de fusão de 327 °C e densidade entre 2,13 e 2,19 g/cm³ [6].

Uma simulação do processo dinâmico de transferência de atrito e desgaste do PTFE quando deslizado contra o aço AISI SAE 1045, onde uma camada de partículas foi transferida, aumentando, desse modo, a taxa de desgaste do PTFE, devido ao aumento da rugosidade da contraface [7]. O comportamento tribológico do atrito torcional plano-sobre-plano entre o PTFE e ao aço AISI SAE 1045 também demonstrou que, tanto o torque devido à fricção, quanto a taxa de desgaste do PTFE diminuem exponencialmente quando o ângulo de torção aumenta [8].

O dissulfeto de molibdênio (MoS_2) pertence à classe de compostos lamelares com três modificações polimórficas: 2H (hexagonal), 3R (romboédrica) e 1T (trigonal) [9]. É também aplicado em baterias no estado sólido em meio aquoso, células solares, catalisadores e em lubrificantes sólidos. A sua estrutura lamelar contribui para o seu baixo coeficiente de atrito. É uma substância muito versátil com uma notável estabilidade química e térmica, possui propriedades físicas anisotrópicas habilitando-o a variadas aplicações industriais, como em revestimentos através de revestimentos finos [10]. No entanto, a sua baixa dureza superficial pode causar um desgaste severo no revestimento, apesar dos resultados positivos obtidos com o revestimento de TiMoN/a-MoSx terem alcançado uma taxa de desgaste de $2 \cdot 10^{-11} \text{ mm}^3/\text{N.m}$ e um coeficiente de atrito na ordem de 0,10 [11].

A utilização de MoS_2 para a lubrificação de rolamentos mostrou uma redução do desgaste dos anéis de rolamento em até 94%, além do aumento da sua vida em 30 % [12].

A aplicação de brocas tipo *Auger Bit* ocorre em sua grande maioria em madeiras tipo pinus utilizadas nas construções civis como caibros, travessas, caixotes, entre outros. Coníferas de madeira mole, branca e resinosa [13] e classificadas como uma madeira macia de fibras longas com propagação fácil e crescimento rápido, o *Pinus Elliottii* tem grande manejo, crescimento rápido e a sua madeira é muito utilizada na construção civil [14]. É amplamente usada como um substituto das madeiras nativas na construção civil, sendo capaz de suportar ambientes agressivos quando tratada em autoclave [15]. Esse material apresenta uma dureza Janka paralela às fibras de 197 kgf [16]. Na escala de dureza Shore D, pode chegar a 49,6 Shore D à 20 °C e 62,75 Shore D à -196 °C [17].

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO

O fornecimento de produtos inovadores tem sido um desafio tecnológico constante para as empresas. Brocas helicoidais para furação em madeira, especialmente em *Pinus Elliottii*

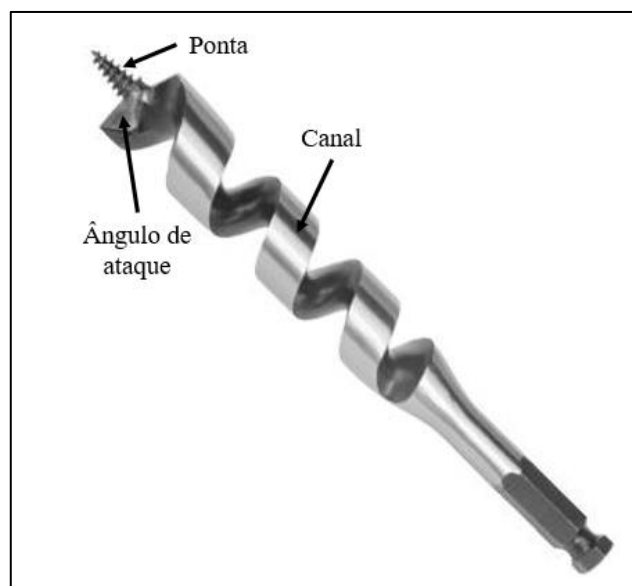
cuja aplicação é muito comum na construção civil, sofrem desgastes nas arestas principais de corte em decorrência do atrito e esforços gerados na furação, diminuindo a vida da ferramenta.

Apesar de haver estudos relacionados a aplicação de diversos tipos de revestimentos em ferramentas de corte, há poucos específicos a respeito da aplicação em brocas tipo *Auger Bit* para furação de madeira. Portanto, como objetivo geral deste estudo foi feita uma análise mais detalhada com a aplicação dos revestimentos com PTFE e MoS₂ em uma broca tipo *Auger Bit* com o objetivo de aumentar a vida e reduzir o torque de furação.

1.2 OBJETIVO GERAL

Brocas helicoidais para furação em madeira, especialmente para o tipo *Pinus Elliottii*, sofrem desgastes nas arestas de corte em decorrência do atrito e esforços gerados na furação, diminuindo a vida da ferramenta e a sua performance. O objetivo geral deste estudo foi de executar uma análise mais detalhada avaliando o desempenho de revestimentos superficiais de PTFE e MoS₂ em uma broca tipo *Auger Bit* (Figura 1) de aço AISI SAE 1060 temperado, utilizadas na furação de madeira tipo *Pinus Elliottii*, com o objetivo de reduzir o torque de furação, atrito, esforços de corte, potência requerida e melhorar o escoamento do cavaco ao longo do canal. O estudo foi realizado através de testes de furação em bancada com cargas de avanço controladas onde foi verificado os esforços de corte com plataforma piezoelétrica e análises microestruturais dos materiais.

Figura 1 – Broca *Auger Bits* utilizada para furação em madeira



Fonte: Adaptado pelo autor de <https://www.irwin.com>

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DO TRABALHO

- Caracterizar a broca sem revestimento quanto a composição química, microestrutura, rugosidade e desgaste das arestas de corte em função do torque aplicado;
- Caracterizar o revestimento de PTFE quanto a espessura, rugosidade, coeficiente de atrito e grupos funcionais comparando-o com as amostras sem revestimentos e com MoS₂;
- Analisar o desempenho mecânico das brocas com revestimento de PTFE em teste de bancada de furação comparando-o com as amostras sem revestimentos e com MoS₂;
- Caracterizar o revestimento de MoS₂ quanto a espessura, rugosidade, coeficiente de atrito, grupos funcionais comparando-o com as amostras sem revestimentos e com PTFE;
- Analisar o desempenho mecânico das brocas com revestimento de MoS₂ em teste de bancada de furação comparando-o com as amostras sem revestimento e com PTFE;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Apresenta-se neste capítulo alguns conceitos sobre furação e seus processos, uma abordagem acerca das ferramentas de furação assim como detalhamentos sobre as brocas helicoidais do tipo *Auger Bit*, as quais são foco deste estudo, assim como alguns conceitos relacionados aos mecanismos de desgaste, torque e outras forças de corte. Aborda-se também uma breve discussão sobre os revestimentos ensaiados e uma das principais madeiras onde as brocas são utilizadas.

2.1 FURAÇÃO

A usinagem é o processo de remoção de cavacos que concede as peças dimensões e geometrias controladas criando componentes mecânicos das mais variadas formas [18]. Em torno de 30 % dos processos de usinagem são representados pela furação, a qual é responsável por uma grande faixa de tamanhos e pode ser aplicada em diversos tipos de materiais a serem furados [19].

Os processos de usinagem consistem na remoção de material com uso de uma ferramenta de material mais duro e mecanicamente mais resistente do que a peça. As principais propriedades desejáveis nos materiais das ferramentas de corte são a alta dureza, tenacidade suficiente para evitar falhas por fratura, alta resistência ao desgaste abrasivo, alta resistência à compressão e ao cisalhamento, boas propriedades mecânicas e térmicas em temperaturas elevadas, alta resistência ao choque térmico, alta resistência ao impacto e ser inerte quimicamente. Os aços carbonos foram muito utilizados para ferramentas de usinagem por volta do início do século XIX. Após começaram a ser introduzidos os aços ligados. Os principais tratamentos térmicos utilizados em aços ferramentas são a têmpera seguida de revenimento [20].

2.1.1 Processos de furação

A furação é um processo de usinagem realizado predominantemente com ferramentas de dois canais e geometria helicoidal. Quando a furação é realizada com furadeira a ferramenta faz o movimento de avanço e corte. Entretanto, quando o furo é realizado em torno a peça é quem faz o movimento de corte [21]

Com o auxílio de uma ferramenta multicortante, a furação é um processo de usinagem que se destina a obter um furo geralmente cilíndrico. O movimento de corte é realizado segundo uma trajetória retilínea coincidente ou paralela ao eixo principal da máquina. Os processos de furação podem ser divididos em:

- Furação em cheio, gerando furos cilíndricos onde todo o material é removido em forma de cavaco;
- Escareamento, gerando furos cilíndricos em uma peça pré-furada. Muitas vezes feito para criar um chanfro na borda do furo muito usado para encaixe de cabeça de parafusos;
- Do tipo escalonada, para obter furos com dois ou mais diâmetros diferentes simultaneamente;
- Furação de centros, usados normalmente para operações posteriores na peça, como por exemplo torneamento onde a peça é fixada na placa em uma extremidade e apoiada na peça ponto do torno na extremidade oposta;
- Trepanação, onde somente uma parte do material é removido em forma de cavaco, permanecendo a um núcleo maciço na peça [18].

Uma furação bem sucedida depende fundamentalmente do processo de remoção de cavaco. Por ser enclausurado e haver dificuldade de refrigeração na região da ponta da broca, a qual é responsável pelo corte. Um dos principais problemas na furação é a remoção do cavaco da parte interna do furo. Quando os cavacos não são removidos facilmente podem causar entupimentos, reduzir a qualidade do acabamento e aumentar o momento torsor. Em alguns casos pode até quebrar a ferramenta [22].

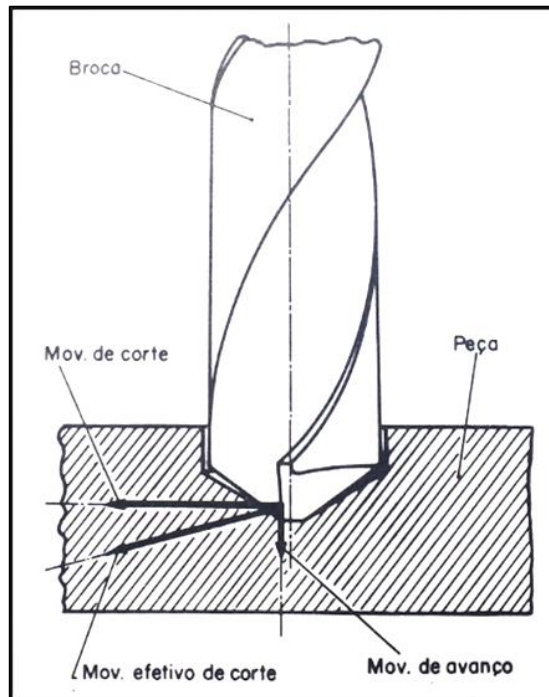
O processo de furação é um dos processos de usinagem mais utilizados na indústria. Em apenas uma pequena parte das peças a obtenção dos furos é através de processos da peça bruta como fundição, injeção, forjamento, entre outros. Por outro lado, a grande maioria das peças manufaturadas na indústria recebem pelo menos um furo realizado com broca [22].

A furação é realizada sob condições severas, levando em consideração que a velocidade de corte não é uniforme, com variação de zero no centro até valores máximos na periferia da broca. Já o fluido de corte tem dificuldade de chegar à aresta de corte, impactando negativamente na remoção do cavaco, refrigeração e lubrificação. Além disso na furação deve-se levar em consideração alguns fatores importantes como diâmetro do furo, profundidade, tolerâncias de forma e medidas e volumes de produção [19].

Os movimentos do processo de furação (Figura 2) são relativos entre a peça e a

ferramenta e podem ser classificados como aqueles que removem cavaco e os que não removem, como é o caso dos movimentos de aproximação e posicionamento da ferramenta na peça. Já o movimento de corte aliado aos de avanço proporcionam a remoção contínua de cavaco [18].

Figura 2 – Movimentos de corte na furação



Fonte: Ferraresi (1970)

2.1.2 Ferramentas de furação

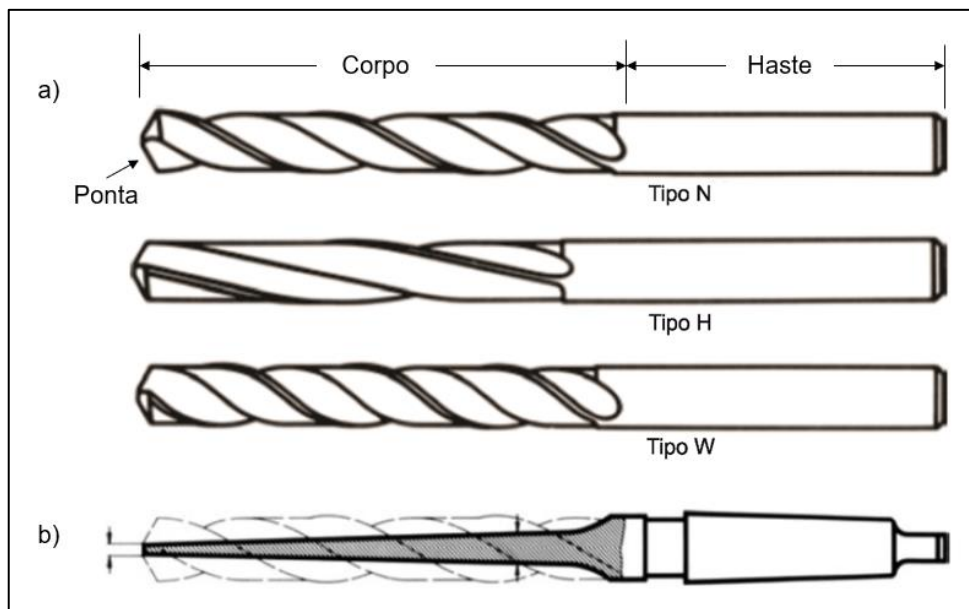
As brocas são as ferramentas mais comumente utilizadas para furação e podem ser de diversos tipos como brocas chatas, brocas helicoidais, brocas canhão (para furos profundos), brocas ocas para trepanação, entre outros modelos. A furação com brocas é uma operação de desbaste [19]. No Brasil, a maioria das furações ainda é realizada com brocas helicoidais de aço rápido com ou sem camada de revestimentos [22]. O emprego de brocas helicoidais envolve cerca de 33 % de todas as operações de usinagem [23].

Furação é um método de usinagem com um movimento principal rotativo onde a ferramenta faz apenas um movimento de avanço na direção do eixo rotativo da ferramenta. As peculiaridades da furação são a velocidade de corte que tende a zero no centro da broca, difícil remoção de cavaco, distribuição de calor desfavorável no ponto de corte, maior desgaste nas arestas de corte e alta fricção das arestas contra a parede do furo [24].

2.1.3 Brocas helicoidais

As brocas helicoidais são compostas basicamente por uma haste e uma parte cortante. A função principal da ponta da broca é cortar o material gerando os cavacos que são removidos do interior do furo pelos canais que ficam na região do corpo (Figura 3a). A haste pode ser paralela ou cônica e tem função de fixar-se aos dispositivos de fixação em máquinas operatrizes. A broca helicoidal com haste cônica é fixada através de atrito estático nas paredes cônicas de porta ferramentas, enquanto as pinças são usadas para fixação das brocas helicoidais com haste paralela [21].

Figura 3 – Elementos e tipos das brocas helicoidais



Fonte: Adaptado de Tschätsch (2009) [21]

Basicamente uma broca helicoidal é formada por dois canais e uma ponta cônica. Dentre os perfis de canais, os do tipo N, H e W são os mais comuns e eles são utilizados conforme as suas aplicações:

- Perfil N para aços ligados e não ligados, ferro fundido cinzento e maleável, níquel e ligas de alumínio que geram cavacos curtos;
- Perfil H para metais duros, ferros fundidos com durezas superiores a 240 HB, plásticos e ligas de Magnésio;
- Perfil W para materiais dúcteis e ligas de alumínio que geram cavacos longos.

Diferentes tipos de ângulos de pontas podem ser usados, onde os mais comuns são 118° e 135°, onde algumas recebem também afiação tipo *Split Point*, que auxilia na função auto-

centrante. O núcleo da broca (Figura 3b) tem formato cônico no sentido da ponta para a haste sendo responsável por gerar maior estabilidade e rigidez. O corpo da broca também tem formato cônico, o que garante que a superfície externa não fique em atrito com a parede do furo. [21].

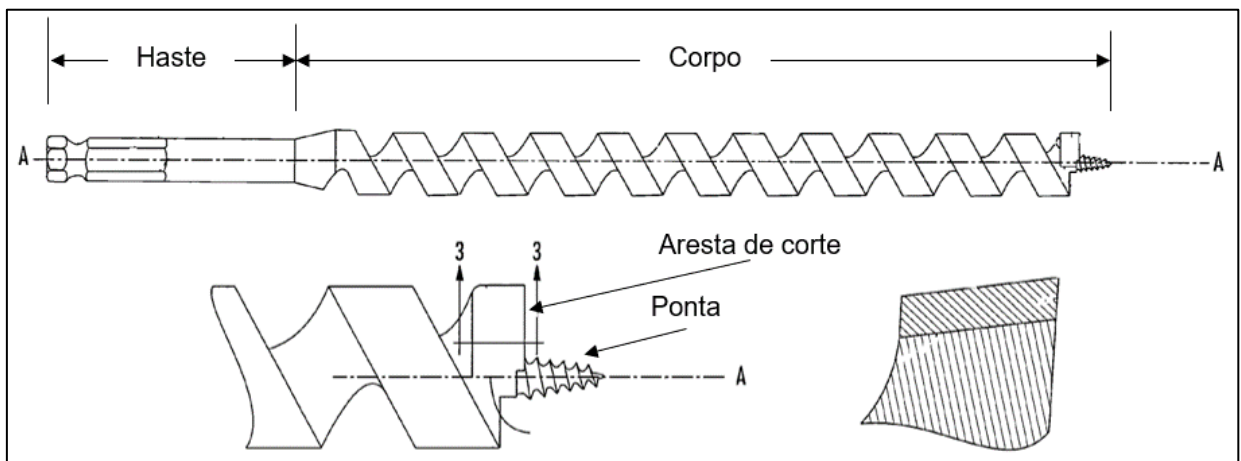
Estima-se que as brocas helicoidais ocupem cerca de 20 a 25 % das operações de usinagem e ocupa a posição de maior importância entre as ferramentas de furação na criação de furos cilíndricos a partir de material sólido [24].

2.1.3.1 Brocas tipo *Auger Bit*

Na patente US2029447A [25], ilustra-se as diferentes partes de uma *Auger bit*, inclusive a região da ponta e canal. Já na patente US20100307640 [26] referente às arestas de corte é descrito uma *Auger Bit* com design idêntico ao deste estudo, inclusive as regiões onde haverá aplicação do revestimento. Nela são descritas as regiões do corpo onde fica localizado o canal em formato helicoidal, a região da haste com formato sextavado e *groove* de encaixe para troca rápida no mandril da furadeira e a região da ponta onde fica localizada a aresta principal de corte, o ângulo de saída e a ponta cônica roscada (Figura 4).

As brocas *Auger Bit* normalmente têm sua forma construtiva em um material inteiriço, mas também pode ser construída na forma bi-metálica, conforme indicado na patente GB2445671A [27].

Figura 4 – Elementos da broca helicoidal

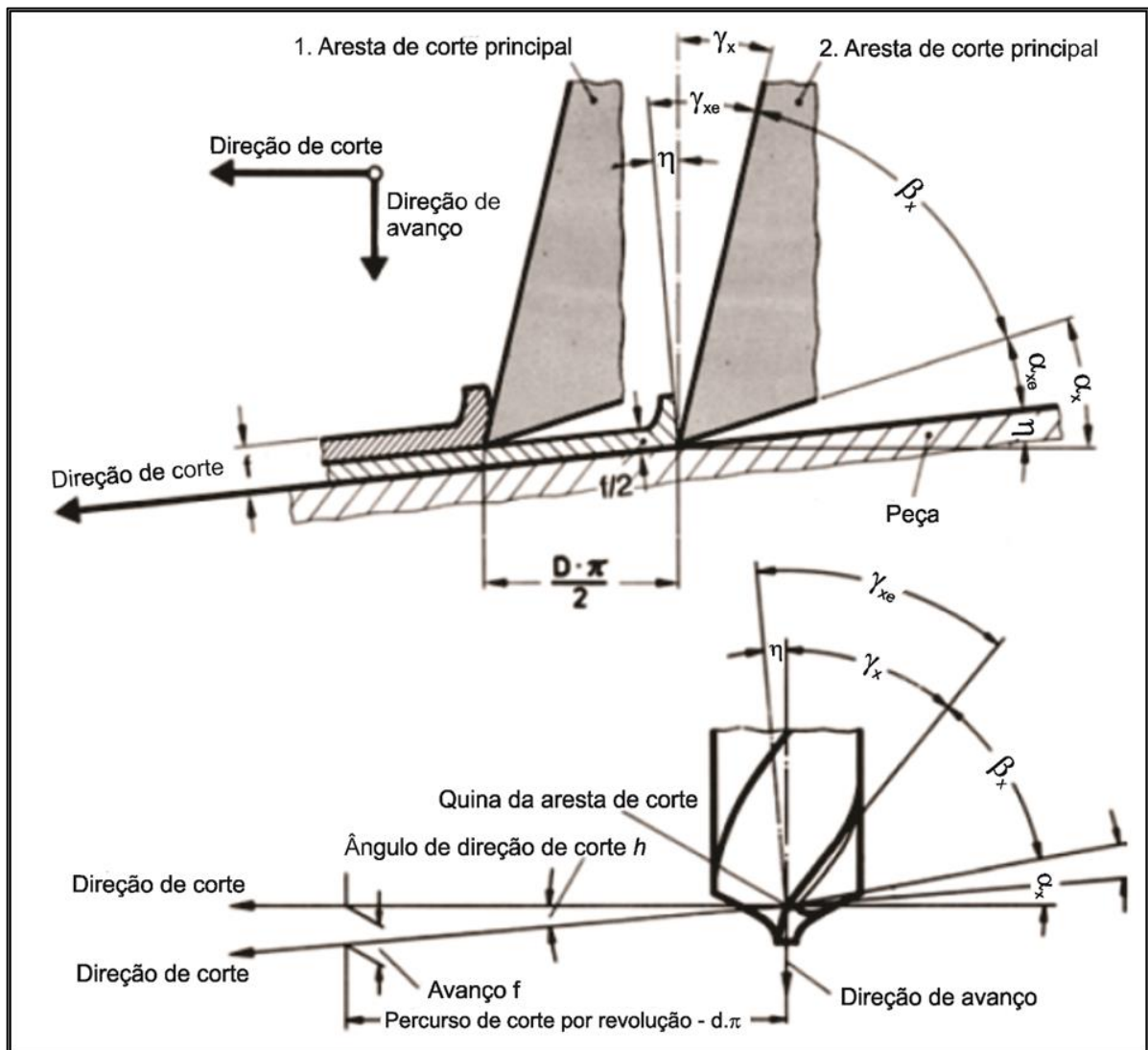


Fonte: Adaptado de US20100307640 (2010) [26]

2.1.3.2 Geometria de corte da broca

Com formato de cunha, as arestas de corte principais podem ter seus ângulos definidos com referência as ferramentas de torneamento (Figura 5) [23]. Todavia, [21] o ângulo de saída γ_x é responsável pelo escoamento do cavaco logo após o corte. Ele não é constante ao longo da aresta principal de corte, tendo um incremento em direção à ponta da broca. Em brocas o ângulo de hélice ou ângulo de saída é medido no plano de referência da aresta de corte na região da quina da aresta de corte, local este, onde também se define o alívio de topo α_x e o ângulo de cunha da ferramenta β_x [21]. O ângulo de saída pode ter valor negativo no centro da broca e ter um incremento de variação até um valor igual ao ângulo de hélice na periferia [23].

Figura 5 – Ângulos das arestas de corte conforme normas DIN 1412 e DIN 6581



Fonte: Adaptado de Tschätsch (2009) [21]

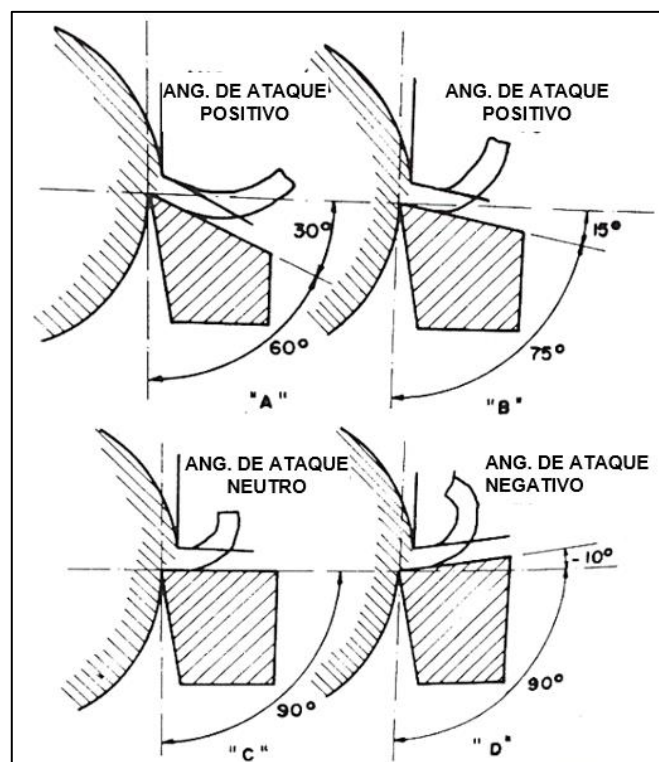
2.1.3.3 Função do ângulo de saída da broca helicoidal

Fazendo uso do processo de torneamento para exemplificar o comportamento do cavaco em relação ao ângulo de saída γ_x ou ângulo de saída do cavaco, observa-se que, este ângulo é um dos mais importantes da ferramenta influenciando na força, potência, acabamento da superfície e calor gerado. Observa-se que o trabalho de dobramento do cavaco na Figura 6D, cujo ângulo de saída γ_x é -10° , mostra-se muito maior do que na Figura 6^a, onde o γ_x é 30° . Assim, quanto maior o ângulo de saída, melhor é a saída do cavaco.

Entretanto o ângulo de saída depende de alguns fatores como:

- A resistência do material a ser usinado onde ferramentas de aço rápido podem ter ângulos de saída maiores que as de ligas fundidas ou de carbonetos;
- Resistência e dureza do material a ser usinado, onde ângulos de saída menores são necessários para aqueles que tem maior resistência a compressão por exercerem maior pressão sobre a ferramenta;
- Calor gerado no corte, o qual quanto maior, menor deve ser o ângulo de saída para evitar amolecimento da ferramenta de corte;
- Velocidades de avanço maiores exigem menores ângulos de saída [28].

Figura 6 – Trabalho de dobramento em função do ângulo de saída e saída do cavaco



Fonte: Adaptado de Stemmer, 2001 [28]

Quanto maior o ângulo de saída, menor será o trabalho de dobramento e encruamento do material do cavaco, e com isso o acabamento da peça e temperatura de corte serão afetados. Ele dependerá da resistência mecânica do material da ferramenta e da peça, além da quantidade de calor gerado e da velocidade de avanço. Ângulos de saída negativos são usados para cortar materiais de difícil usinabilidade e cortes interrompidos, já em materiais dúcteis necessitam ângulos de saída positivos para evitar a adesão de cavaco, que pode ocasionar quebra da ferramenta [20].

2.2 DESGASTE

Os desgastes em ferramentas ocorrem principalmente nas arestas de corte sendo um critério utilizado para determinação da vida das ferramentas. Desta forma alguns de seus conceitos são abordados neste capítulo com detalhes sobre suas formas especialmente relacionados as brocas helicoidais.

2.2.1 Formas de desgaste de desgaste

A progressão do desgaste de uma ferramenta recebe influência da velocidade do corte de forma mais acentuada, seguida pelo avanço e profundidade de usinagem. Quanto maior o ângulo de saída, menor será a deformação do cavaco e menor a temperatura, a pressão específica de corte e o desgaste da ferramenta, contudo o material da ferramenta e aquele a ser furado devem ser levados em consideração.

Os principais desgastes que ocorrem em ferramentas de usinagem são:

- O desgaste de flanco ou frontal é o mais comum e ocorre em todos os processos de usinagem. É causado pelo contato entre a ferramenta e a peça ocorrendo na superfície de folga da ferramenta;
- O desgaste de cratera causado por difusão e abrasão entre a ferramenta e o cavaco ocorre na superfície de saída da ferramenta. Quando ele se encontra com o desgaste frontal ocorre a quebra da ferramenta;
- Deformação plástica da aresta de corte ocorre devido à pressão aplicada a ponta da ferramenta somada a alta temperatura;
- Lascamentos que removem partes da ferramenta;

- Trincas que são avarias geradas pelas variações térmicas e esforços mecânicos;
- Quebras originadas pelos desgastes excessivos ou condições geométricas, estruturais e aplicações das ferramentas.

As medições das superfícies de desgaste podem ser realizadas com diversos equipamentos, atualmente com sistemas óticos adaptados ou até mesmo equipamentos específicos [22]. Com o uso de uma lupa cuja resolução seja de até décimos de milímetros ou um microscópio de oficina com precisão, de até centésimos de milímetros pode-se fazer a verificação do desgaste na superfície de incidência. A medida da profundidade de cratera da superfície de saída da ferramenta normalmente é feita por perfilômetros registradores especiais, onde uma agulha excitada eletromagneticamente faz a leitura por varedura da superfície a ser analisada. Para medir pequenos desgastes pode-se utilizar o método de medida por radioisótopos, aplicado em pastilhas de metal duro que são ativadas num reator atômico e posteriormente as pastilhas são utilizadas na usinagem. A medição é feita através da quantidade de radioatividade do cavaco, uma vez que, durante o ensaio 90% das partículas gastas ficam presas a ele [18].

2.2.2 Desgaste e vida da ferramenta

A vida de uma ferramenta depende de um determinado grau de desgaste e é determinada pelo tempo que a mesma trabalha efetivamente até perder a sua capacidade de corte. Nas brocas helicoidais em geral ocorre a destruição da aresta de corte devido a diminuição da dureza da aresta com o aumento da temperatura de corte, seguido da quebra da aresta cortante. Em ferramentas de aço rápido na operação de desbaste o desgaste é evidenciado pela formação de um anel brilhante na superfície de corte da peça ou pelo aumento das forças de avanço e de profundidade da usinagem, o mesmo ocorre nas brocas helicoidais em geral [18].

2.2.3 Desgaste em brocas

Os desgastes comuns presentes em brocas ocorrem principalmente nas arestas de corte ou próximos a região da ponta. A aresta transversal, as quinas de corte e nas guias laterais, ilustradas na Figura 7a, são as regiões mais afetadas pelo desgaste. Os desgastes de flanco e cratera são usualmente mensurados e utilizados na furação como critério de fim de vida das brocas [29].

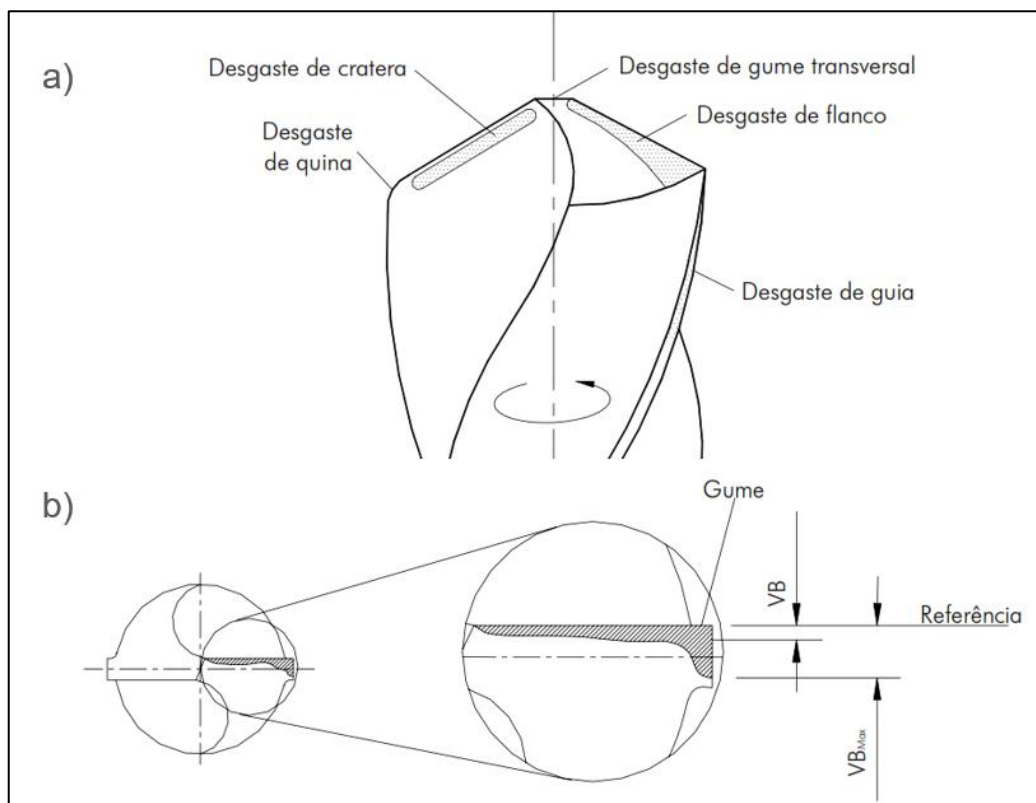
A região mais crítica é a aresta transversal, pois ela tem o primeiro contato com o material a ser furado, ocorrendo desgaste por esmagamento devido as velocidades de corte tenderem a zero e as altas solicitações mecânicas. Isto pode causar lascamentos e até quebras da ferramenta.

Os três fatores que mais influenciam no desgaste das brocas são:

- As solicitações térmicas, devido à alta velocidade de corte nas quinas;
- O calor gerado pelo cavaco na superfície de saída;
- O atrito das guias com a parede do furo.

Utilizando a linha de referência que fica posicionado sobre a aresta de corte da broca nova pode-se fazer as verificações de desgaste médio VB e máximo $VB_{\text{máx}}$ nos flancos de uma broca (Figura 7b). Usualmente, um microscópio é o instrumento mais indicado para realizar estas medições [29].

Figura 7 – Desgaste de uma broca helicoidal



Fonte: Adaptado de Castillo, 2005 [29]

2.3 CÁLCULO DA FORÇA, TORQUE E POTÊNCIA DE CORTE NA FURAÇÃO

A geometria da ponta de uma broca é um elemento chave que influencia na força de avanço e o torque de furação. A redução dessas forças leva a uma melhora no desempenho, reduzindo a deflexão da broca e a potência de furação e aumentando a vida da broca [30].

Para ferramentas de geometria definida a força de usinagem é a força total atuante na cunha de corte durante o processo [18]. A força de corte que ocorrem no processo de furação são aquelas aplicadas nas arestas de corte e as geradas devido ao atrito das guias da broca e a parede do furo [21].

Derivada da potência de qualquer dispositivo a potência da máquina é calculada conforme a equação (1).

$$P = \frac{Tn}{9,55 \times 10^3 \eta_M} \quad (1)$$

Onde:

P é a potência de entrada [kW];

T é o torque [Nm];

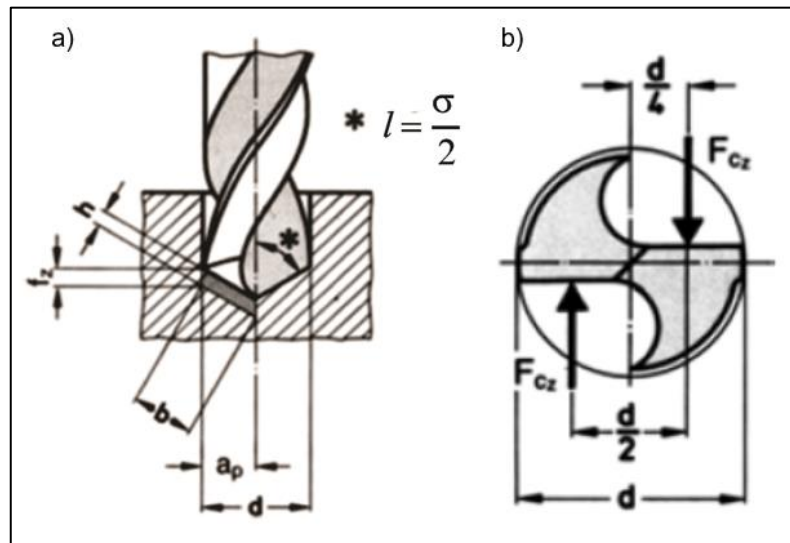
n é a velocidade angular (rpm) [min⁻¹];

η_M é a eficiência da máquina de furação (0,7 a 0,9).

2.3.1 Forças na furação em cheio

Os parâmetros de usinagem na furação em cheio estão representados na Figura 8 de forma mais detalhada.

Figura 8 – Parâmetros de corte (a) e ação da força principal de corte (b)



Fonte: adaptado de Tschätsch, 2009 [21]

Através do método de Kienzle é possível fazer uma aproximação da força de corte, força de avanço e torque na furação com brocas helicoidais. É necessário também acrescentar um fator de processo de furação (f_b) que considera as influências alteradas nas forças de furação em relação ao torneamento, como por exemplo formato de aresta, velocidade de corte, etc... Para furação em cheio este fator tem valor 1. A seção transversal do cavaco antes de ser deformado tem grande influência na força de furação. [24].

Considerando o método Kienzle para furação em cheio temos a força específica de corte (k_s) conforme equação (4), que leva em consideração a espessura de corte (h) real na furação e a força específica de corte para uma espessura de corte de 1mm, obtida através de tabelas empíricas. A força de cada aresta de corte é obtida pela equação (5), a qual considera a espessura e largura de cavaco. A força de avanço axial determinada pela equação (6) considera o ângulo da ponta e a força de corte total. Normalmente brocas helicoidais tem arestas simétricas, centralizadas, iguais e paralelas no caso de duas arestas.

$$h = \frac{f}{Z_E} \sin\left(\frac{\sigma}{2}\right) \quad (2)$$

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

$$k_s = \left(\frac{1}{h}\right)^z k_{s1} \quad (4)$$

$$F_{cz} = bhk_s \quad \text{ou} \quad F_{cz} = \frac{d}{2} f_z k_s f_b \quad (5)$$

$$F_f = Z_E F_{cz} \sin\left(\frac{\sigma}{2}\right) \quad (6)$$

$$T = F_{cz} Z_E \left(\frac{d}{4}\right) \quad (7)$$

Onde:

h é a espessura de corte [mm];

f é o avanço por revolução [mm/rot];

Z_E é o número de arestas de corte.

σ é o ângulo de ponta da broca helicoidal [graus].

b é a largura de corte [mm];

d é o diâmetro do furo [mm];

k_s é a força de corte específica [N/mm²];

F_b é fator de processo [para furação em cheio é igual a 1];

F_{cz} é a força de corte principal por aresta de corte [N];

F_f é a força de avanço [N];

F_z é o avanço por aresta de corte [mm];

T é o torque [Nm];

Assume-se que a força principal de corte (Figura 8b) é aplicada no meio da aresta de corte principal para fins de cálculo de torque através da equação (7). O momento de corte total é menor com a broca recém afiada e tende a subir rapidamente após o início do desgaste [21].

A potência de corte na furação tem fundamental importância nos cálculos de forças e pressões específicas de corte e é definida como a potência disponível na aresta de corte e consumida na operação de remoção de cavacos, expressa pela equação (8) [18][24]. A potência de usinagem é a resultante da soma das potências para cada componente da força de usinagem, e o produto da velocidade pela força e pelo cosseno do ângulo entre ambas. Desta forma,

somente as componentes de avanço e corte contribuem para a potência de usinagem. A potência em usinagem pode ser medida de forma experimental pela tensão e corrente elétrica consumida, conforme a equação (9) [20].

$$P_c = T\omega \quad \text{ou} \quad P_c = \frac{T n}{9554} \quad \text{ou} \quad P_c = \frac{F_{cz} V_c}{60000} \quad (8)$$

$$P_i = V(t).I(t) \quad (9)$$

Onde:

P_c é a potência de corte [kW];

P_i é a potência instantânea [W];

$V(t)$ é a tensão medida no tempo;

$I(t)$ é a corrente elétrica medida no tempo;

T é o torque [Nm];

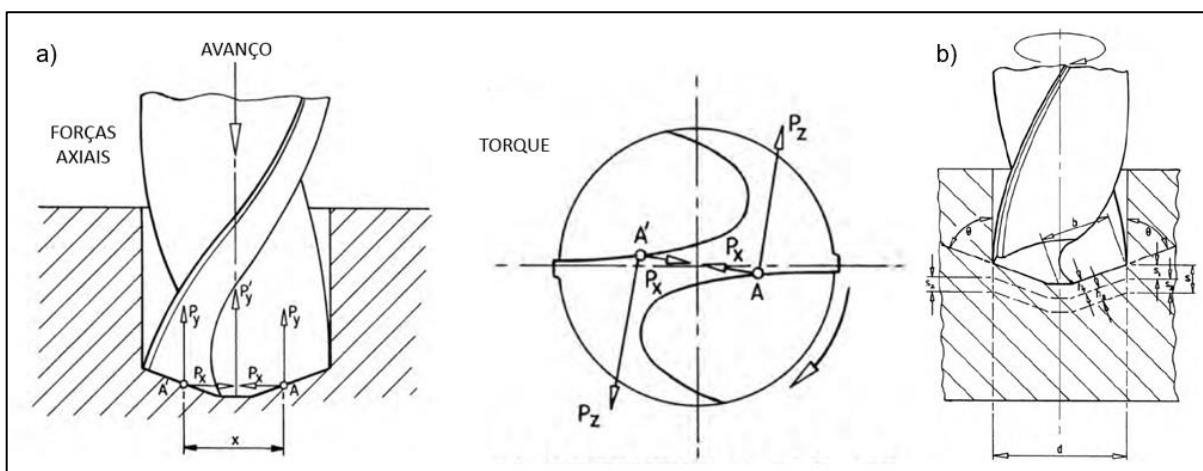
V_c é a velocidade de corte [m/min];

n é a velocidade [min^{-1}];

ω é a velocidade angular [rad/s].

Uma broca helicoidal produz torque e força axial durante a furação, sendo que a principal contribuição para o torque é através das arestas de corte e uma pequena parcela pela aresta transversal. As resultantes da resistência de corte na furação são expressas na Figura 9a [31].

Figura 9 – Resultantes das forças de corte (a), furação em cheio com broca simétrica (b)



Fonte: adaptado de Smith, 2008 [31]

Para uma broca simétrica (Figura 9b) o cavaco sem deformação pode ser demonstrado

pela profundidade de corte (a), ou seja, metade do diâmetro da broca e avanço (s).

2.4 VERIFICAÇÃO DE ESFORÇOS COM INSTRUMENTAÇÃO

É muito importante conhecer a força de corte para determinação de cálculo estrutural, acionamentos, potência de usinagem e rendimento da máquina para diferentes cargas e velocidades.

Para estas aplicações cujas medidas são estáticas a determinação das forças de corte médias é suficiente, mas para o mecanismo de formação de cavaco para estudos de estabilidade dinâmica da máquina operatriz é necessária a medida da variação dinâmica da força de corte, a qual pode ser feita através de através de oscilógrafos.

Os dinamômetros devem satisfazer alguns requisitos como:

- Sensibilidade: deve ser constante em toda a escala do aparelho indicador, onde a linearidade da curva característica facilita a interpretação dos resultados;
- Precisão: é a qualidade global de um instrumento de medida de efetuar a leitura exata da grandeza a medir, excluindo os erros do padrão ou da grandeza a medir;
- Rigidez: um instrumento de medida não deve influenciar a grandeza a medir. O critério para a medida da rigidez dinâmica do dinamômetro é baseado na sua frequência natural de oscilação;
- Exatidão de reprodução de forças variáveis com o tempo: caracteriza-se pela exatidão de reprodução sem distorção do fenômeno;

Insensibilidade quanto à variação da temperatura e à umidade: As grandezas que mais podem influenciar na medição das forças de usinagem são variação de temperatura da ferramenta, umidade ambiente, vibração da máquina operatriz de ensaio, vibração da peça a usinar, vibração da ferramenta e desgaste da ferramenta.

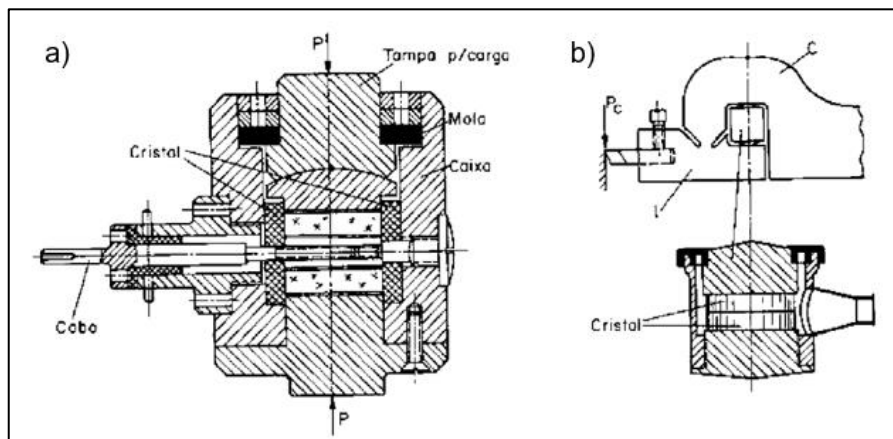
As medidas das forças de usinagem podem ser diretas como a piezoelétrica, magneto-estricção ou magneto-elasticidade, ou indiretas realizadas através de deslocamento de molas com meios de medida mecânicos, pneumáticos, hidráulicos e elétricos [18].

A piezoeletricidade é uma propriedade de certos cristais que se polarizam eletricamente quando submetidos a esforços mecânicos e inversamente, se deformam elasticamente quando submetidos a uma polarização elétrica. A polarização libera nos cristais cargas iguais e contrárias que quando somadas tornam-se nulas. O quartzo e a turmalina são os

cristais mais sensíveis a esta propriedade, mas há também sais com propriedades análogas como o sal de Rochele, o tartarato de potássio e o titanato de bário.

Uma cápsula dinamométrica constituída por um par de lâminas de cristal de quartzo com capacidade de 4 toneladas é apresentada na Figura 10a e uma aplicação para medida de força de corte no torneamento Figura 10b [18].

Figura 10 – Cápsula dinamométrica de quartzo fabricação Zeiss-Ikon A. G. (esq.) e dinamômetro para medida da força de corte no torneamento segundo Mauzin (dir.)



Fonte: Ferraresi, 1970 [18]

Cristais piezoelétricos introduzidos entre as partes metálicas de dinamômetros medem a tensão elétrica durante o esforço e são utilizados para medição de componentes de força de usinagem. Os dinamômetros são mais compactos que os fabricados com extensômetros e são mais rígidos mecanicamente, Permitindo medições com frequências mais altas. O uso de dinamômetros piezoelétricos necessitam de amplificadores de carga, pois as tensões elétricas geradas nos cristais são muito baixas [20].

2.5 AÇOS PARA BROCAS DE FURAÇÃO DE MADEIRA

Aços com teores de carbono entre 0,25 % e 0,60 % são classificados como baixa temperabilidade, podem ser tratadas termicamente por austenitização, têmpera e então revenidos para melhorar suas propriedades mecânicas. Na condição revenida a microestrutura é martensita revenida onde menores de 0,6 % C há predomínio de agulhas, entre 0,6 % C e 1 % C há formação de placas misturadas com agulhas e acima de 1 % C ocorrem apenas placas. A dureza pode ficar entre 20 e 64 HRC [6].

O aço AISI SAE 1060 apresenta em sua composição química 0,55 a 0,65 % C e 0,60 a 0,90 % Mn [32]. Para evitar trincas utiliza-se tratamento térmico martêmpera onde um

resfriamento lento permite a formação de martensita igual em toda a peça e a ductilidade é produzida com posterior revenimento [33].

Aços com alto teor de carbono entre 0,60 % C a 1,4 % C são mais duros e resistentes, por outro lado são os menos dúcteis. São utilizados em sua grande maioria na condição endurecida e revenida, assim são resistentes a desgaste e abrasão com capacidade de manter as arestas de corte afiadas. Os aços ferramenta são ligas com alto teor de carbono e quando combinados com outros elementos como cromo, vanádio, tungstênio e molibdênio formam carbeto, que são duros e resistentes ao desgaste. São usados para confecções de ferramenta de corte e matrizes de conformação, assim como facas, lâminas de corte, lâminas de serras, molas e arames de alta resistência [5].

2.6 REVESTIMENTOS

2.6.1 Politetrafluoroetileno (PTFE)

O politetrafluoroetileno (PTFE) pertence à família de polímeros conhecidos por flúor-carbonos que contém teores significativos de flúor sendo resistentes a inflamabilidade. Eles exibem uma resistência excepcional ao ataque por soluções ácidas e alcalinas, dentre elas ácidos oxidantes (H_2SO_4 , concentração a 20 %) e não oxidantes (HNO_3 , concentração a 10 %), salinas ($NaCl$), alcalinas ($NaOH$), solventes polares (C_2H_5OH) e não polares (C_6H_6) e à água (H_2O) [3].

É um polímero fluorado de alta estabilidade térmica, baixo coeficiente de atrito e inércia química, possui características que advêm de altas forças intermoleculares geradas pela presença de grandes átomos de flúor que conferem rigidez à macromolécula dificultando mudanças de conformação. Também considerado um termofixo de alta estabilidade térmica e química, tem sua estrutura molecular formada por quatro átomos de flúor para cada dois átomos de carbono. Suportam tensão de compressão pouco menor que 30 MPa, menos da metade do Policloreto de Vinila (PVC) que suporta até 70Mpa [4].

Dentre as principais características de aplicações pode-se afirmar que o PTFE é quimicamente inerte em quase todos os ambientes, tem excelentes propriedades elétricas, baixo coeficiente de atrito, pode ser usado até 260° C, são relativamente pouco resistentes e tem propriedades de escoamento a frio ruins. Além disso, apresenta módulo de elasticidade sob tração na faixa de 0,40 a 0,55 GPa, limite de resistência à tração entre 20,7 a 34,5 MPa, limite

de escoamento de 13,8 a 15,2 MPa e alongamento na ruptura variando entre 200 a 400 %. Devido ao alto grau de estabilidade química resultado da ligação carbono-flúor e é hidrofóbico, além de baixa resistência ao desgaste [5].

O polímero cristalino PTFE possui alta densidade, devido ao pequeno tamanho do átomo de flúor e a regularidade da cadeia de carbono fluoretinada tem ponto de fusão de 327 ° C, densidade entre 2,13 e 2,19 g/cm³. A sua alta resistência ao impacto e baixas resistência a tração, desgaste e fluência também são destaques, quando comparado a outros polímeros de engenharia [6].

2.6.1.1 Aplicações com PTFE

O PTFE é um material utilizado por muitos anos para revestimentos de diversos utensílios devido a sua propriedade antiaderente. Esta propriedade também pode ser explorada neste estudo visando uma melhoria na extração do cavaco [2].

Os revestimentos de PTFE aplicados a indústria de serviços alimentícios são suscetíveis à degradação, onde o efeito do desgaste mecânico e envelhecimento térmico pode levar a formação de trincas no interior da matriz polimérica. Além disso os efeitos dos produtos químicos contidos nos agentes de limpeza não foram investigados, podendo ser agentes agravantes da degradação [1].

As propriedades de adesão entre revestimento e material-base e o impacto da Radiação Ultravioleta Extrema (EUV) na adesão celular à superfície de polímeros modificados examinados em poli(tetrafluoroetileno) (PTFE), poli(fluoreto de vinilideno) (PVDF) e poli-L(ácido láctico) (PLLA) que tem ampla aplicação na medicina foram analisadas quanto à molhabilidade da superfície, morfologia, composição química e polímeros de adesão. Em cada um a radiação EUV é diferente e afeta a adesão das células endoteliais de formas diferentes, dependendo dos parâmetros aplicados. O tratamento do PTFE com radiação EUV na presença de oxigênio, obteve maior número de células e cobertura celular [34].

Observou-se um aumento expressivo da propriedade adesiva do PTFE, como decorrência do aquecimento experimentado pelo polímero ao ser tratado com plasma que ataca a camada limite fraca do PTFE. Além disso foi observado o potencial em usar o tratamento de plasma assistido por calor usando um aquecedor como um método alternativo ao tratamento por imersão usando soluções com sódio [35].

Já a incorporação de nanopartículas de cobre (Cu) (~1,2 µm) revestidas com

polidopamina (PDA) no PTFE contribuiu para um aumento triplicado da resistência ao desgaste do sistema PDA/PTFE+PDA-Cu, em comparação àquele baseado no PTFE não-modificado. Os revestimentos com PDA/PTFE com espessura de 1,3 mm apresentaram vida em desgaste de mais de 10 mil ciclos, já os PDA/PTFE+PDA-Cu ultrapassaram 20 mil ciclos, valores superiores aos revestimentos com PTFE puro [36].

Por outro lado, a resistência ao desgaste e a corrosão de ligas de alumínio também já foram melhoradas a partir da impregnação da superfície com PTFE e de revestimento duro, embora este tipo de revestimento afete negativamente a vida em fadiga [37].

O PTFE expandido (e-PTFE) e politetrafluoroetileno laminado (PTFE) para uso na técnica de regeneração óssea guiada (ROG) apresentou diferenças na porosidade entre as amostras de membrana e barreira, onde as com membrana não apresentaram propriedades mecânicas adequadas em comparação com as laminadas. A técnica de tratamento com plasma aumentou a rugosidade facilitando a deposição de agentes antimicrobianos. No FTIR-ATR observou-se uma banda na faixa de 1261 cm^{-1} intensa indicando o alongamento assimétrico da ligação C-F característica de absorção por efeito vibracional de estiramento para ligações carbono-flúor ($=\text{CF}_2$) e simétrico C-F na faixa de 1215 cm^{-1} que também é característica de absorção de efeito vibracional de estiramento para ligações monofluoradas ($\equiv\text{CF}$). Estas duas bandas são típicas para o PTFE [38].

A produção de uma amostra com camada dupla e texturizada a base de PTFE, a partir de sua aplicação com laser causou a desfluoração e o aumento de dureza e densidade do revestimento. A camada sólida apresentou uma expressiva hidrofobicidade. Além disso, lubrificantes sólidos incorporados a micro depressões do substrato geraram um “auto travamento mecânico”, aumentando a área da superfície e possibilitando um efeito lubrificante secundário [39].

Em comparação ao revestimento liso, o PTFE texturizado foi capaz de aumentar de duas a cinco vezes a vida da camada superficial. A adição de nitreto de carbono grafítico (g-C₃N₄) em teores variados a compósitos de PTFE melhorou as resistências térmica, ao desgaste e à deformação elástica dos materiais [40].

A aplicação de uma dupla camada de revestimento composto por níquel-fósforo não eletrolítico (ENP) e PTFE a aço macio se mostrou eficaz para o aumento das propriedades de resistência a corrosão e ao desgaste e de anti-incrustação, sendo uma estratégia interessante para materiais com aplicação geotérmica [41].

Além disso, a adição de nanopartículas de grafeno e fulerenos a compósitos de PTFE aumentou significativamente a resistência ao desgaste dos sistemas. As propriedades mecânicas

de compósitos com grafeno/nano-Cu/PTFE tiveram resultados ótimos, com tensão de falha de 28,19 MPa, deformação máxima de 360 % e atingiram valores mínimos de taxa de desgaste. Além disso adicionar grafeno aos compósitos de fulereno/nano-Cu/PTFE pode aumentar a dureza Shore para 65 [42].

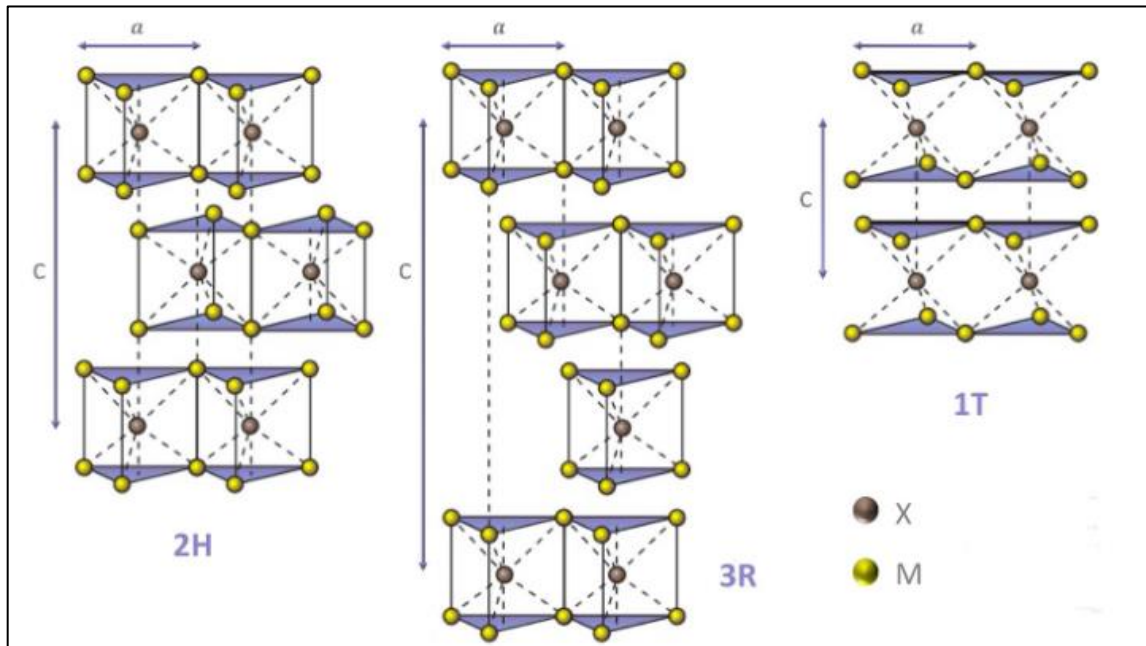
Em uma simulação no uso de PTFE pelo método numérico dos elementos discretos considerando o fluxo de partículas em duas dimensões, simulando o processo dinâmico de transferência de atrito e desgaste do PTFE quando deslizado contra o aço SAE 1045, onde uma camada de partículas foi transferida, afetando negativamente a taxa de desgaste do PTFE, a qual foi atribuída ao aumento da rugosidade da contraface [7].

O comportamento tribológico do atrito torcional plano-sobre-plano entre o PTFE e o aço SAE 1045 mostrou que o torque devido à fricção e a taxa de desgaste do PTFE diminuem exponencialmente quando o ângulo de torção aumenta [8].

2.6.2 Dissulfeto de Molibdênio (MoS₂)

O dissulfeto de molibdênio pertence a uma classe de materiais conhecidos como compostos lamelares ocorrendo em três modificações polimórficas 2H (hexagonal), 3R (romboédrica) e 1T (trigonal), onde o número revela a quantidade de camadas por célula unitária. Ele é aplicado em baterias no estado sólido no meio aquoso e íons lítio intercaláveis, células solares, lubrificantes sólidos, catalisadores, entre outros. Sua utilização em lubrificantes sólidos é fundamentada pelas suas propriedades tribológicas na sua estrutura lamelar, boas propriedades anti-friccionais, boa adesão e estabilidade térmica e química atuando em condições extremas de aquecimento e resfriamento. É uma substância muito versátil com notável estabilidade química e térmica e pode ser crescido na forma de revestimentos finos com propriedades físicas anisotrópicas habilitando-o a variadas aplicações industriais [9].

Figura 11 – Esquema das modificações polimórficas nas fases 2H, 3R e 1T das estruturas cristalinas do MoS₂



Fonte: Rodriguez, 2020 [43]

O MoS₂ é integrante da família dos dicalcogenados de metais de transição (TMDs) e é encontrado na natureza como molibdenita. É muito utilizado como lubrificante. A produção de nanocompósitos através da esfoliação em fase líquida em meio aquoso mostrou através de diversas técnicas como FTIR que a água é um excelente solvente na produção de MoS₂ com poucas camadas gerando dispersão com ótima estabilidade. Revestimentos preparados por extrusão dupla rosca e plana mostraram poucas alterações morfológicas e na cristalinidade e baixos teores de carga melhoraram significativamente as propriedades mecânicas do Poli (Butileno Adipato-Co-Tereftalato)-(PBAT) aumentando a deformação em até 90 %. Por outro lado, também houve reforço mecânico na matriz de PS-puro. Análise de FTIR mostrou uma banda alargada na região entre 2400 a 2800 cm⁻¹ para dispersão de MoS₂, a qual é centralizada em 2615 cm⁻¹ que pode ser relacionada com a banda de tiol (-SH) que fica em uma faixa de 2540 a 2563 cm⁻¹ podendo ser indicativo de mudança de estrutura química do MoS₂ aos grupos químicos tipo tiol [43].

Os TMDs possuem estruturas em camadas com ligações covalentes (ligação forte) entre os átomos no plano, portanto estes materiais tem alta rigidez mecânica. O MoS₂ forma um plano hexagonal constituído de átomos de molibdênio (Mo) e enxofre (S). Cada camada é configurada por S-Mo-S onde a que o átomo de molibdênio fica disposto sucessivamente entre duas camadas de átomos de enxofre [44].

2.6.2.1 Aplicações com MoS₂

Nanopartículas de dicalcogeneto de metal de transição MoS₂ sintetizadas por um método de evaporação lenta avaliados por espectro FTIR mostraram amplas bandas de absorção em 639 cm⁻¹, 893,39 cm⁻¹, 1402,99 cm⁻¹ e 1622,8 cm⁻¹, que são atribuídas ao MoS₂, banda em 483,23 cm⁻¹ devido à ligação S-S e a de 931,39 cm⁻¹ é devido à ligação S-S, já os picos em 3182 cm⁻¹ pertencem às bandas características do grupo O-H [45].

O desempenho de películas finas de dissulfeto de molibdênio (MoS₂) aplicadas por deposição de vapor físico e multicamada (Ti₃C₂T_x) nas superfícies de PTFE de nanogeradores triboelétricos propensas ao desgaste mostrou que ele produziu baixa camada e pode ser atribuída a sua microestrutura nanocristalina devido a deposição pulverizada resultando em uma menor qualificação como doador de elétrons. Já multicamadas superou os demais revestimentos analisados devido a boa capacidade de ganho de elétrons de grupos funcionais de oxigênio e flúor [46].

Um estudo sobre uma classe crescente de materiais 2D, que os carbonídeos metálicos, nitretos e carbonitretos conhecidos como multicamada oferecem grande capacidade de lubrificação sólida. Em seu estudo, quando Ti₃C₂T_x são comparados com MoS₂ para lubrificação de rolamentos mostraram redução do desgaste de arruelas de rolamento em até 94 % além de ampliarem a vida em 30 % [12].

Amostras com liga de Ti (Ti6Al4V) revestidas com pó de MoS₂ e dissulfeto de tungstênio através de processo de micro-EDM analisadas quanto a integridade de superfície e estresse residual mostraram rugosidade e dureza menores de dissulfeto de molibdênio em torno de 0,56 μm a 0,65 μm e 714,2 HV, respectivamente, quando comparadas a WS₂ [47].

Resultados dos efeitos do tratamento térmico em estruturas e o comportamento de desgastes de revestimentos com Ni-MoS₂ pulverizados por HVOF concluiu que no tratamento térmico acima de 500 °C o crescimento dos cristais de dissulfeto de molibdênio evapora da superfície e condensa-se nos óxidos salientes, aumentando a porosidade e perdas estruturais, assim a dureza e a força estrutural diminuem drasticamente. Então os revestimentos de HVOF Ni-MoS₂ São adequados para ambientes abrasivos até 500 °C [48].

O MoS₂ é um lubrificante altamente procurado para reduzir atrito entre camadas, porém sua aplicação é um pouco restrita devido à sua baixa dureza superficial poder causar desgaste severo. Um novo revestimento composto TiMoN/a-MoS_x onde a solução sólida TiMoN foi incorporada na matriz amorfa MoS_x por sinterização espera alcançar dureza elevada e taxa de desgaste baixos $\sim 2 \times 10^{-11}$ mm³/Nm no ar e baixo atrito $\sim 0,1$. Este nível de desgaste

atingido é quase duas vezes menor que revestimento TiN puro e a sua dureza foi aprimorada e o desgaste é muito baixo no fator de $\sim 10^{-11}$ mm³ Nm [11].

2.6.3 Outros tipos de revestimentos para brocas

Um estudo relacionado a avaliação do efeito positivo no uso de revestimentos PVD multicamadas TiN/AlTiN e de dupla camada TiAlN/a-C:N na furação em painéis de madeira foi realizado e os autores concluíram que há aumento significativo na resistência ao desgaste das arestas de corte. Com menos de 800 furos ambos os revestimentos obtiveram ótima resistência ao desgaste comparados a broca sem revestimento, porém após 800 furos apenas TiN/AlTiN manteve-se com significativa resistência ao desgaste [49].

A furação em madeira tipo painel de fibra de densidade média (MDF) avaliando o efeito dos revestimentos de TiAlN e ZrN em brocas de carboneto fez uma abordagem quanto a força de avanço, torque de corte, temperatura do corte e rugosidade da superfície de furação utilizando sensor piezoelétrico, termopar tipo K e medidor de topografia superficial. Encontrou-se valores de 62 Shore D na periferia e 43 Shore D no centro do bloco de MDF. A temperatura da ferramenta no processo de furação depende da velocidade de corte, da taxa de alimentação e do tipo de revestimento da broca. A força de avanço e de torque são significativamente influenciados pelo efeito dominante da taxa de alimentação e pelo tipo de revestimento da broca. As amostras com revestimento apresentaram maiores valores de torque e avanço quando comparadas a broca sem revestimento, isso pode ser explicado pelos diferentes coeficientes de atrito entre a broca e a madeira furada, mostrando que os revestimentos aumentam a força de atrito [50].

Para complementar, a distribuição de dureza no bloco de madeira está intimamente relacionada ao perfil de densidade da amostra. A temperatura de furação aumentou com o aumento da velocidade de corte e diminuiu com o aumento da alimentação por revolução. As maiores temperaturas foram observadas nos revestimentos com ZrN já que eles têm menores coeficientes de transferência de calor que o TiAlN e a broca sem revestimento. A taxa de alimentação e o tipo de revestimento influenciou significativamente o valor de rugosidade do furo. O ZrN apresentou menores valores de rugosidade na superfície de furação devido ao menor coeficiente de atrito e menor condutividade térmica comparado a broca sem revestimento que apresentou as rugosidades mais elevadas. O maior valor de dureza foi 62 Shore D na camada mais na superfície da amostra, diminuindo para cerca de 43 Shore D quando verificado

mais ao centro a uma profundidade de 7 a 11 mm. Já os revestimentos apresentaram durezas de 2200 HV (ZrN) e 3000 HV (TiAlN) e coeficientes de atrito estático de 0,4 (ZrN) e 0,6 (TiAlN). Os valores da força de empuxo e torque aumentaram nas amostras com revestimento em comparação às amostras sem revestimento, o que pode ser explicado pelas diferenças dos coeficientes de atrito de cada revestimento. As amostras com revestimento de ZrN apresentaram menores valores de rugosidade superficial em comparação com as revestidas de TiAlN e as sem revestimento, o que pode ser relacionado aos coeficientes de atrito e o coeficiente de condutividade térmica de cada revestimento [50].

Os efeitos da força de furação e torque, desgaste e rugosidade superficial durante a furação de materiais mais duros e frágeis como granito epóxi utilizando brocas espirais de carboneto com revestimentos de TiAlN e (TiAl)N + tratamento com NbHfTi mostrou que as forças atuantes nos flancos de corte são maiores que as atuantes no ângulo de saída das brocas. A vida das ferramentas com (TiAl)N + NbHfTi melhorou em relação as brocas sem revestimento e com TiAlN. O desgaste ocorre até 2 vezes mais rápido que brocas com TiAlN e até 4 vezes mais rápido do que as brocas com (TiAl)N + NbHfTi. As brocas com (TiAl)N + NbHfTi apresentaram melhores resultados de desgaste, qualidade do furo e rugosidade superficial [51].

Brocas de tungstênio sem e com revestimento de PVD (TiAlN/TiN) utilizado na furação de uma lâmina de compósito metálica de três camadas variando a taxa de alimentação mostrou que a vida das brocas com revestimento reduziu entre 20 e 50 % em relação as demais. A força de avanço reduziu 12 % quando operou com taxas de alimentação mais altas nas brocas sem revestimentos enquanto aumentou 18 % devido ao maior raio da ponta. Por outro lado, o revestimento cerâmico mais duro proporcionou maior resistência ao desgaste no canto periférico resultando em até 10 % menos torque comparado as brocas não revestidas [52].

2.7 MADEIRA TIPO PINUS

Classificados como madeira macia de fibras longas com propagação fácil e crescimento rápido, os pinheiros oriundos do sul dos Estados Unidos foram ao longo dos anos introduzidos em diversos estados brasileiros, principalmente na região sul. O *Pinus Elliottii* tem grande manejo, tem crescimento rápido principalmente em regiões de clima úmido, com inverno frio e sem estação seca bem marcada. Fornece resina comercializável e sua madeira é muito utilizada na construção civil [14].

Além disso, o pinus tem excelente taxa de crescimento nas regiões sul do Brasil. Pode ser usado como substituto as madeiras nativas na construção civil em formas de concreto, estruturas como vigas e é capaz de suportar ambientes agressivos quando tratado em autoclave [15].

Coníferas de madeira mole, branca e resinosa tem a forma de cone entre tronco e copa e é composta de células tubulares compridas dispostas horizontalmente e canais resiníferos especializados em produção de resina. A condição de 15 % de saturação, o *Pinus Elliottii* tem na flexão estática módulo de ruptura de 710 kgf/cm² e módulo de elasticidade de 66000 kgf/cm², máxima resistência a compressão paralela as fibras de 321 kgf/cm² e dureza Janka paralela as fibras de 197 kgf [13].

Segundo a norma ABNT NBR 7190, 1997, a dureza da madeira medida pelo método Janka é determinada convencionalmente pela tensão atuante em uma das faces de um corpo prismático, produz a penetração de uma semiesfera de aço com área diametral de 1 cm², onde a força é dividida pela área da seção diametral da esfera e as medidas são realizadas nas direções paralela e normal as fibras. A dureza deve ser apresentada acompanhadas pelo teor de umidade da madeira. Segundo a NBR 7190 valores médios de madeiras coníferas como *Pinus Elliottii* apresentam massa específica de 560 kg/m³ considerando 12 % de umidade e resistência a compressão paralela às fibras de 40,4 MPa [53].

Já o método de preparação e verificação da dureza Janka é detalhado na ASTM D143-94 [54]. O tratamento por preservantes como MOQ OX 50 pode ser uma alternativa para melhorar a resistência a dureza Janka e habilitá-la a aplicações estruturais [55].

Madeira exposta em diferentes condições de temperatura avaliadas em relação a força de flexão mostraram que durante o resfriamento a força de flexão aumenta nas madeiras macias como pinus e reduzem em madeiras mais duras. A maior queda na força de flexão foi na madeira dura de faia com -30,6 % a -196 °C o que pode ser atribuído a densidade que é maior nas madeiras duras do que nas macias. Já impacto positivo em madeiras macias como pinus enquanto resfriadas habilitam a serem usadas em ambientes de baixas temperaturas. A dureza Shore D aumenta nas madeiras duras e macias com a redução da temperatura, como no pinus que apresentou 49,6 Shore D a 20 °C e 62,75 Shore D a -196 °C [17].

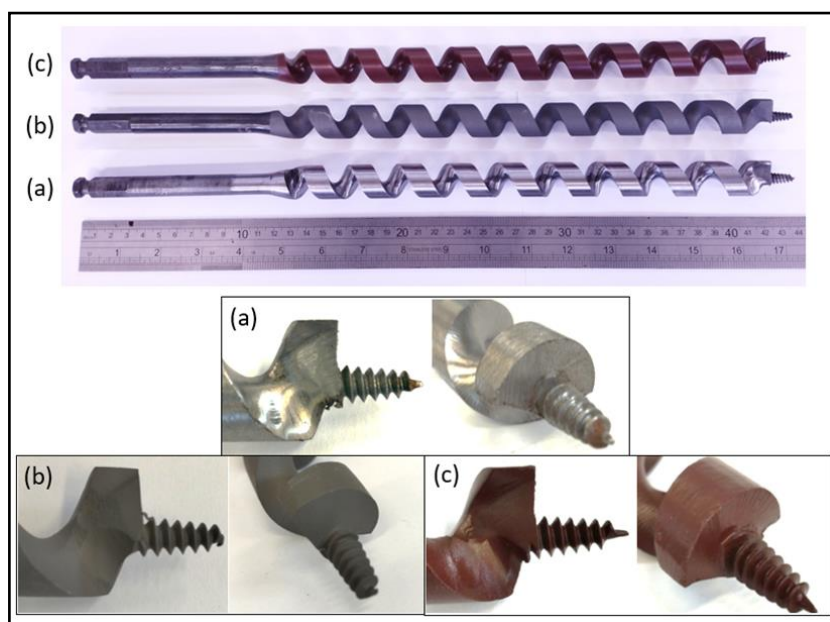
3 MATERIAIS E MÉTODOS

São abordados neste capítulo os materiais utilizados neste estudo com detalhamentos sobre as brocas e os corpos de prova, assim como os equipamentos, dispositivos e instrumentos de medição. As metodologias utilizadas nas análises estão detalhadas com o objetivo de esclarecer ao leitor as etapas de execução e os cuidados e controles na preparação das amostras e realização dos testes.

3.1 BROCAS

As brocas que foram utilizadas nos testes são do tipo *Auger Bits* com diâmetro de 7/8” e comprimento de 17”, material base AISI SAE 1060 temperado. Foram separadas 30 brocas, das quais 10 foram utilizadas como referência, ou seja, brocas sem revestimento ou referência (Figura 12a), 10 com aplicação de MoS₂ (Figura 12b) e 10 com aplicação de PTFE (Figura 12c). A deposição dos revestimentos foi realizada na superfície das peças cobrindo a região da extremidade onde há uma pequena ponta roscada e as arestas da afiação, além de toda a superfície do canal de escoamento do cavado, por serem as regiões que efetivamente estão em contato com a madeira durante a furação.

Figura 12 – (a) Broca sem revestimento; (b) Com revestimento de dissulfeto de molibdênio; (c) Com revestimento de PTFE



Fonte: Elaborado pelo Autor

3.2 CORPOS DE PROVA

Nos experimentos de furação foram utilizados corpos de prova feitos de caibros de madeira do gênero *Pinus Elliottii*, com dimensões 150 x 150 x 50 mm. Por serem muito utilizadas em construções civis para diversos fins como revestimentos e acabamentos e em alguns casos como pequenas vigas, esse material tem potencial utilização nos experimentos visando replicar as condições de furação próximas a aplicação real.

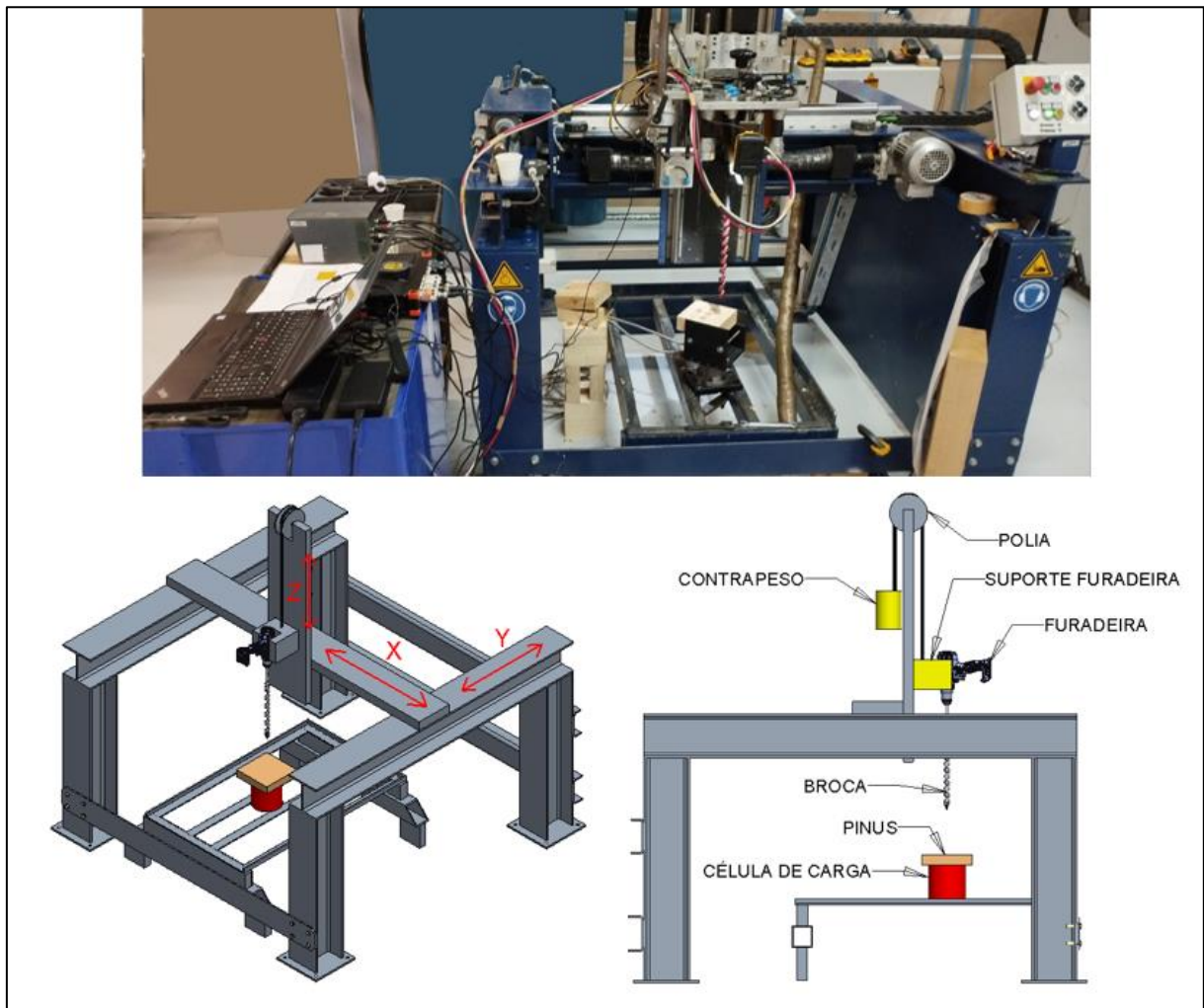
3.3 EQUIPAMENTOS PARA ENSAIO DE FURAÇÃO

Os ensaios de furação foram realizados em um equipamento conforme mostra o desenho esquemático da Figura 13. A bancada de testes replica a condição de furação manual dos usuários, com parâmetros controlados como alinhamento da broca perpendicular à madeira e com aplicação de carga axial constante.

O equipamento (Figura 13) é composto por uma mesa linear para movimentação nos eixos X, Y e Z, na qual foi fixada uma furadeira. Os caibros de madeira, a célula de carga (plataforma piezoelétrica) e o gabarito rígido foram fixados com alinhamento concêntrico entre si abaixo da broca utilizada nos testes. A carga axial de furação aplicada na broca é composta pelos pesos da furadeira e do suporte da furadeira ajustados com a carga de contrapeso do sistema, desta forma, a carga na broca é constante.

O dispositivo é controlado por um comando numérico computadorizado, o qual é responsável pelo posicionamento, movimentação e acionamento da furadeira. A célula de carga, o sensor fotoelétrico Banner multiuso modelo QS18VP6LAF e o alicate amperímetro de marca Dewesoft, modelo DS-CLAMP-1800DC foram conectados no sistema de aquisição de dados responsável pela coleta dos seguintes dados de teste: torque, esforço axial, rotação, tensão e corrente da furadeira. Através do software da Dewesoft foi possível a análise dos dados de furação, gerando-se o gráfico de potência consumida durante a furação.

Figura 13 – Equipamento para ensaios de furação com deslocamento nos eixos X, Y e Z, composto por sua estrutura, furadeira com bateria, célula de carga e os caibros de madeira utilizados na furação.



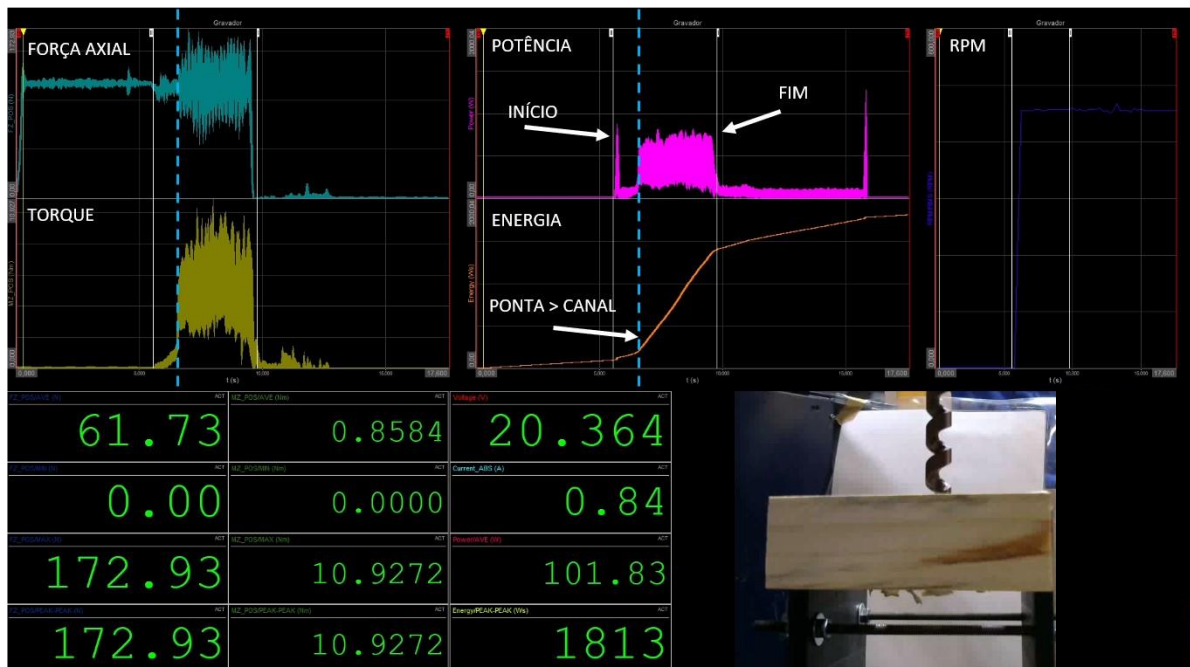
Fonte: Elaborado pelo Autor

3.4 MEDIÇÃO DE ESFORÇOS DE CORTE

A verificação dos esforços de corte foi feita com uso de uma plataforma piezoelétrica marca Kistler, modelo 9273, faixa de trabalho F_x e F_y -5 a 5 kN, F_z -5 a 20kN e M_z -100 a 100N.m e limites F_x e F_y <20mN, F_z <20mN e M_z <0,02N.cm, a qual foi fixada sobre o dispositivo rígido do equipamento de ensaios na sua parte inferior com parafusos e o corpo de prova fixado na sua parte superior (Figura 15). A coleta dos dados de furação foi realizada com o auxílio de um sistema de aquisição de dados da marca *Dewesoft* modelo *X-Professional Sirius-8xSTGM* com sensibilidade 0,7 % e máximo desvio na repetibilidade de teste de 0,87246 mV, no qual foi possível conectar a furadeira alimentada por bateria de 4 A e 20 V com velocidade de rotação entre 450 e 2000 rpm, torque 95 N.m e potência 820 W. A leitura dos

dados foi realizada através do *software* do sistema de aquisição de dados da *Dewesoft*, onde de forma visual com uso do vídeo da furação e o respectivo posicionamento das linhas brancas identificou-se os pontos de início e fim da furação, assim como a região de transição entre a ponta e o canal da broca como é observado na linha azul tracejada na Figura 14. Nele foram realizados as leituras da força axial, torque de furação, potência e energia consumida e rotação. As leituras foram realizadas com o posicionamento do cursor sobre o gráfico no ponto mais alto das curvas no instante anterior ao início das variações de picos. O cálculo da potência foi realizado utilizando a equação (9) e a energia foi calculada através da integral da potência no tempo.

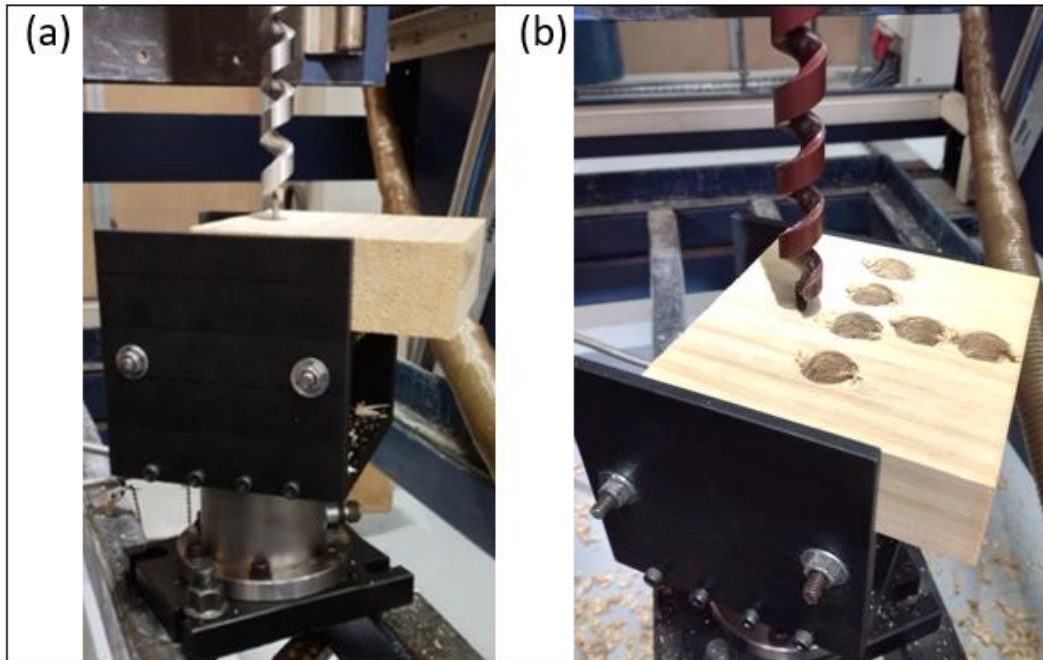
Figura 14 – Software utilizado na aquisição dos dados



Fonte: Elaborado pelo Autor

Na medição da rotação da furadeira foi utilizado um sensor fotoelétrico marca Banner, modelo QS18VP6LAF com tensão de 10 a 30 VDC, com resolução de 1 rpm, sensibilidade de 1 mm, com ajuste de 30 a 150 mm e delay de 200 ms e repetibilidade de 130 μ s. Para medição da potência durante a furação dos corpos de madeira, um amperímetro tipo alicate da marca *Dewesoft* modelo DS-CLAMP-1800DC, faixa de 1800 A DC/AC e saída de 1 mV/A foi usado, juntamente com a plataforma piezoelétrica.

Figura 15 – Plataforma piezoelétrica utilizada nos testes, gabarito de fixação e corpo de prova de *Pinus Elliottii*: a) antes da furação e b) durante os testes de furação.



Fonte: Elaborado pelo Autor

3.5 APLICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS

Aplicado por pulverização, o PTFE utilizado foi o da marca Testrong 104D da fabricante Chemours (Dupont), com uma espessura de camada entre 20 μm e 30 μm , recomendado para aplicações industriais, automotivas, eletrônicas, químicas, aeroespacial, medicina, entre outros, cujas características principais são: antiaderente, baixo coeficiente de atrito, entre 0,05 e 0,20, resistência térmica de até 260 °C, resistência química e à abrasão.

O MoS_2 utilizado foi o da marca Molykote tipo II, da fabricante Dupont, aplicado por pulverização, com uma espessura de camada entre 20 μm e 30 μm , indicado para aplicações industriais de alto desempenho.

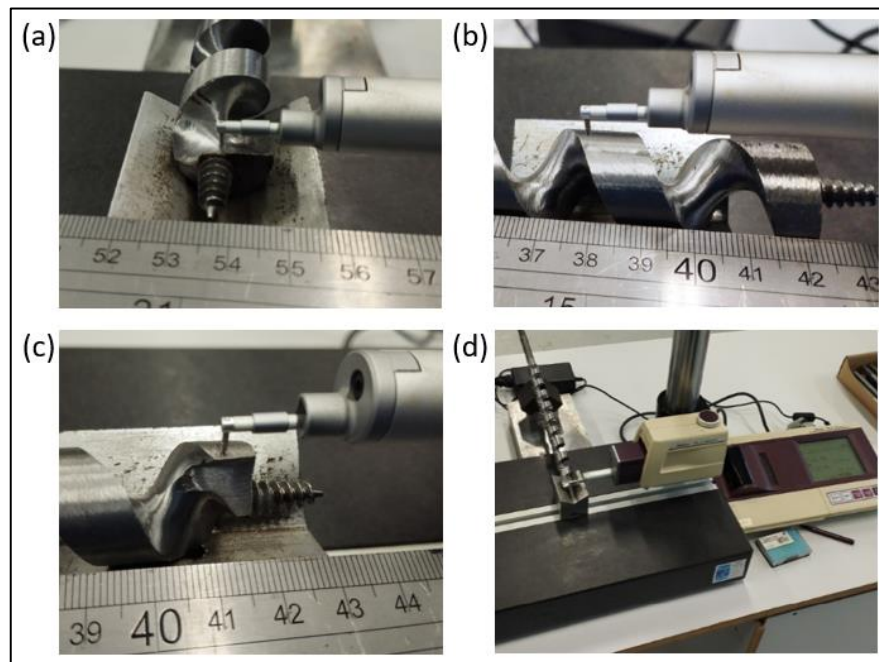
3.6 CARACTERIZAÇÃO DAS BROCAS

3.6.1 Medição da rugosidade

Foi verificada a rugosidade das peças antes e após a aplicação dos revestimentos com o objetivo de comparar as variações através do rugosímetro da fabricante Mitutoyo, modelo SJ-

400, resolução de $0,125\ \mu\text{m}$ montado sobre uma mesa modelo *Heavyduty column stand*, fabricante Mitutoyo. As verificações foram feitas em três regiões da ponta das peças sendo na superfície do ângulo de saída (Figura 16a), na superfície externa do canal (Figura 16b) e na superfície do alívio radial próxima a aresta secundária de corte (Figura 16c). A Figura 16d mostra uma visão geral do sistema de medição de rugosidade utilizado.

Figura 16 – Medição de rugosidade: (a) posição do ângulo de saída da aresta de corte, (b) superfície externa do canal da broca, (c) superfície do alívio radial, (d) visão geral dos equipamentos utilizados.



Fonte: Elaborado pelo Autor

3.6.2 Caracterização das brocas

As amostras também foram submetidas à caracterização microestrutural, de acordo com *ASM Metals Handbook Vol 9* [32], para avaliar a microestrutura do aço antes e após a deposição dos revestimentos. A verificação da espessura e microdureza Vickers das camadas, foram analisadas pelos microscópios marca Leica modelo EC3 DMILM resolução 3,1 megapixels na aquisição de imagens de 15 quadros por segundo e, no microdurômetro digital marca Pantec modelo MV2000A de capacidade de medição de HV 8 a HV 2500, exatidão de $\pm 3\%$ e cargas de 2,9 a 98 N, respectivamente. As regiões mais críticas da peça foram analisadas com seccionamento longitudinal da ponta, longitudinal na aresta de corte e transversal na região do canal. A verificação da microdureza das camadas de revestimento foi realizada coletando

cinco pontos em cada amostra com distância mínima entre os pontos de cinco vezes a diagonal medida na carga de 98 N.m., com base na norma ASTM E384-17 [56]. No substrato foi aplicada a mesma metodologia dos revestimentos com aplicação de carga de 9,8 N, seguindo a norma ASTM E92-04 [57].

3.7 DETERMINAÇÃO DOS GRUPOS FUNCIONAIS PRINCIPAIS DOS REVESTIMENTOS

As amostras de PTFE e MoS₂ foram submetidas à análise de espectroscopia do infravermelho por transformada de *Fourier*, FTIR (FT-MIR, modelo *Frontier*), da marca *Perkin Elmer*, comprimento de onda de 4000 cm⁻¹ a 200 cm⁻¹, resolução de 8 cm⁻¹, equipado com acessórios de reflectância total atenuada. As análises foram realizadas sob uma superfície plana do aço da broca revestidas com PTFE e MoS₂, área de 1 cm². O ensaio foi realizado no laboratório Central de Análises da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Brasil.

3.8 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE MADEIRA

Os corpos de prova (Figura 15) foram caracterizados em relação ao seu dimensional. A dureza foi feita através do método Shore D de acordo com a norma ASTM D2240-15 [58], utilizando o durômetro marca Bareiss com escala de 0 a 100 com carga de 5 kg. As medições foram feitas nos sentidos paralelo e normal as fibras na região sobre os veios e entre os veios da madeira, evitando-se as regiões com nós.

3.9 ENSAIOS DE FURAÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS

A primeira etapa consistiu em realizar os ensaios de furação no equipamento descrito na Figura 13. As furações envolveram seis brocas com MoS₂, seis com PTFE e seis sem revestimentos, cada broca foi ensaiada com 5 furos, num total de 30 por tipo de broca.

Os dados coletados pela bancada, segundo a Figura 13 são descritos a seguir: a rotação da broca foi medida no mandril da furadeira por sensor fotoelétrico, a carga axial de furação (N) e o torque (N.m) medidos através da célula de carga. A corrente (A) e a tensão (V), necessárias para determinar o consumo de potência elétrica foram medidas através do alicate

amperímetro, juntamente com o tempo de furação (s) ao longo do furo.

O procedimento de furação consistiu em encostar a broca no bloco de madeira com a furadeira desligada aplicando-se a carga axial na broca de furação. Logo após, foi acionada a furadeira realizando-se o furo até ultrapassar totalmente o bloco de madeira. A furadeira então foi desligada retornando à posição inicial. A distância média entre as furações ficou em 30 mm e a profundidade de furação foi de 50 mm.

Na segunda etapa de testes foram utilizadas as mesmas brocas referência sem revestimentos e as brocas com PTFE da primeira etapa. A escolha somente das mostras de PTFE foi em razão dos melhores resultados apresentados na primeira etapa. Foram selecionadas 3 unidades de cada, as quais foram submetidas a ensaios mais longos de furação até atingir um número de furos suficiente para diferenciar os prós e contras do revestimento PTFE.

Os ensaios foram realizados na mesma bancada com os mesmos equipamentos da primeira etapa e os esforços de corte foram coletados com 55, 150 e 200 furos, onde foi possível diferenciar os revestimentos.

3.10 PARÂMETROS DE CORTE

Os experimentos foram realizados com avanço automático axial da parafusadeira sobre o bloco de madeira, com rotação de 450 rpm e carga axial de avanço de 117,7 N constantes em todos os testes. A escolha da rotação foi baseada na disponibilidade das ferramentas a bateria disponíveis no mercado e a capacidade de realizar as furações, onde rotações maiores tendem a dificultar a furação com este modelo de ferramenta. A broca foi posicionada sob o bloco de madeira com a parafusadeira desligada e após tocar na madeira foi acionada automaticamente até finalizar o furo. Não foi utilizado meio lubrificante nos ensaios, pois não é comum em furações em madeira.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As análises dos materiais e revestimentos aplicados as brocas, assim como os resultados comparativos nas avaliações de torque, rugosidade, potência e energia consumida são apresentadas a seguir. É possível através dos resultados fazer um comparativo entre as amostras com e sem revestimentos identificando vantagens e desvantagens em cada um deles. Espera-se que estas brocas sem aplicação de revestimentos façam pelo menos quinhentos furos

em *Pinus Elliottii*.

4.1 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE

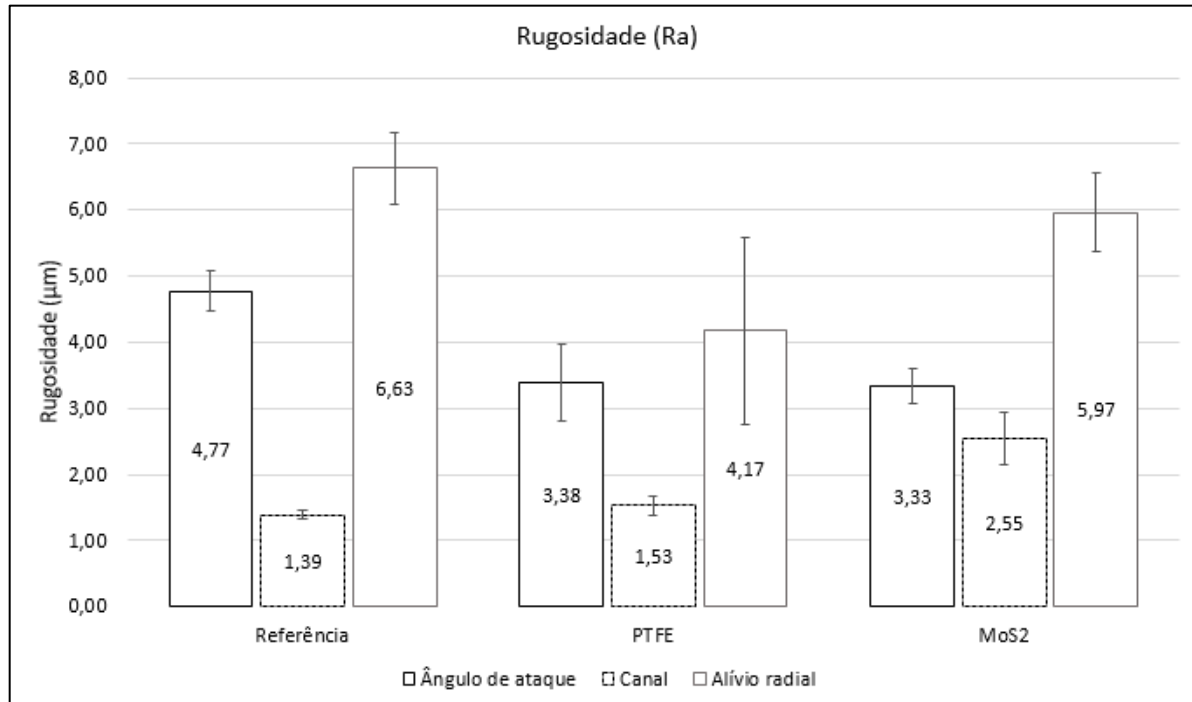
Os resultados das medições de rugosidade média das amostras antes de serem submetidas ao ensaio de furação, comparando as amostras com e sem revestimentos são mostrados na Figura 17. Observa-se um aumento de 84 % da rugosidade média no canal de saída do cavaco, após aplicação do revestimento com MoS₂ em relação à broca sem revestimento. Nas amostras com PTFE ocorreu um aumento de rugosidade de 11 % em relação a amostra sem revestimento. Nas superfícies do ângulo de saída, ambos os revestimentos apresentaram resultados similares, nos quais houve redução de 29 a 30 % da rugosidade em relação às brocas sem revestimento.

De um modo geral, conforme a Figura 17 mostra, os revestimentos aumentaram a rugosidade na região do canal e diminuíram nas regiões do ângulo de saída e de alívio radial. Para o revestimento de MoS₂ a rugosidade quase duplicou no canal em relação à amostra referência. A redução da rugosidade com a aplicação dos revestimentos de MoS₂ e PTFE podem reduzir o coeficiente de atrito, assim como foi encontrado no trabalho de Song *et al*, 2021 [59] e à medida que as arestas de corte desgastam há uma tendência a aumentar a rugosidade e o torque, conforme também encontrado por Jeong *et al*, 2021 [60].

Após a aplicação dos revestimentos as amostras com PTFE apresentaram uma redução significativa da rugosidade nas regiões do alívio radial e do ângulo de saída das brocas, porém no canal manteve-se igual a amostra referência. Já em comparação a amostra com MoS₂ a rugosidade apresentada foi menor em todas as regiões da peça, exceto no ângulo de saída.

O aumento da rugosidade pode aumentar os defeitos superficiais nas regiões da peça, mas especialmente nas arestas de corte pode afetar negativamente, alterando a geometria de corte e provocando a diminuição do poder de corte da ferramenta. Durante o processo de corte pode haver micro lascamentos nos picos e vales criados pela rugosidade elevada, levando ao desgaste prematuro da aresta de corte.

Figura 17 – Rugosidade das brocas.

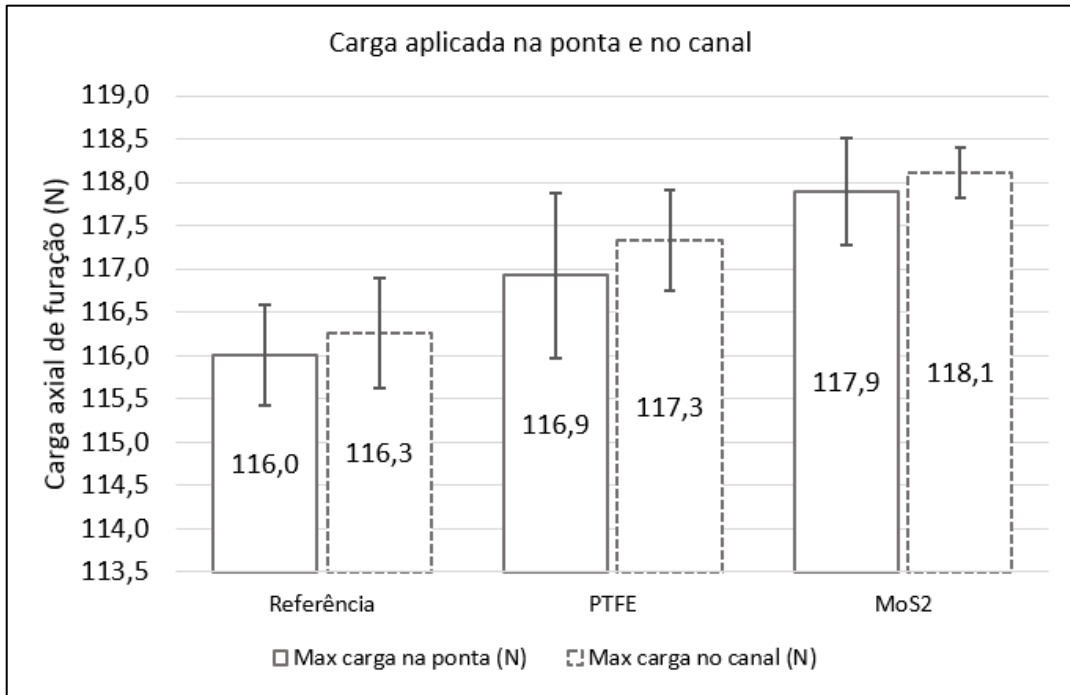


Fonte: Elaborado pelo Autor

4.2 AVALIAÇÃO DA FORÇA DE AVANÇO

A carga axial medida na análise não mostrou grandes diferenças na comparação entre a amostra referência e as demais condições testadas. O valor de carga configurado no equipamento foi de 117,70 N muito semelhante aos valores médios lidos nos primeiros cinco furos entre 116,00 N e 118,1 N (Figura 18). Esses valores representam uma variação total de pouco menos de 2,45 N, o que torna o valor da carga axial estável e praticamente constante durante as furações dos corpos de prova de madeira.

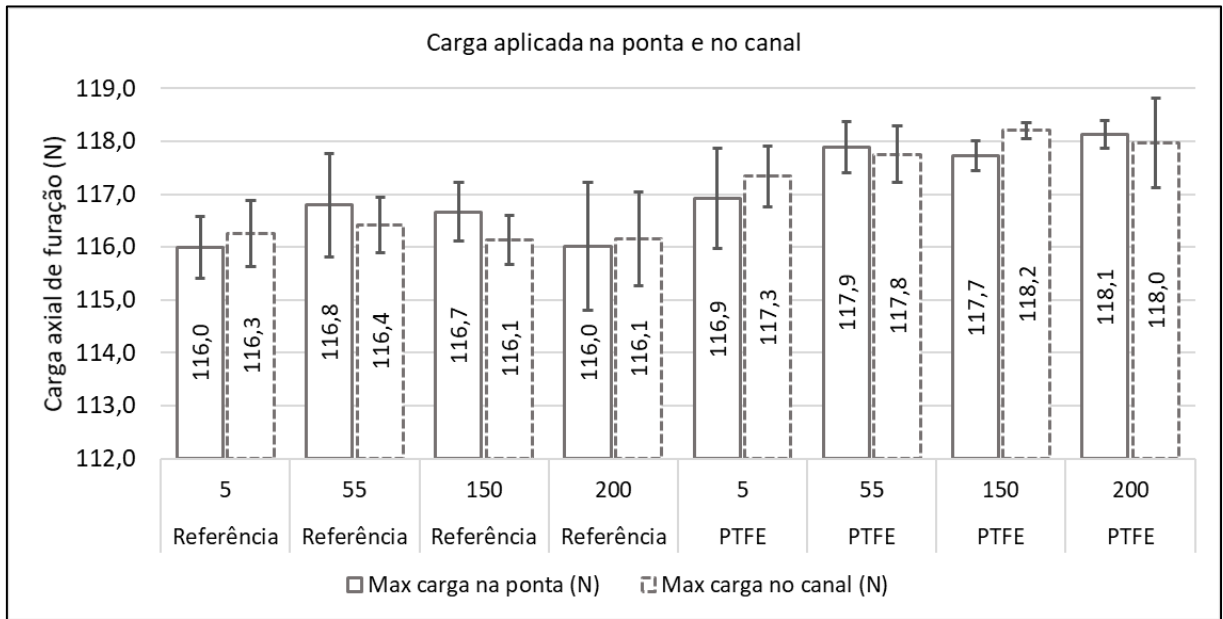
Figura 18 – Esforços axiais de corte: Máxima carga na ponta e no canal.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Ao longo dos ensaios de furação até atingir 200 furos com cada amostra, as cargas mantiveram-se constantes. Observa-se na Figura 19 que as variações nas amostras de referência apresentaram variação de 0,8 N na ponta e 0,3 N no canal. Já nas amostras de PTFE apresentaram variação de 0,4 N na ponta e 0,4 N no canal. Era esperado que os resultados constantes e com baixa variação, entretanto a comparação foi necessária para confirmar a carga configurada no equipamento, assim todas as amostras foram ensaiadas sob a mesma base comparativa. Entretanto o pequeno aumento observado nas amostras de MoS₂ pode ter relação com o acréscimo da rugosidade na região do canal que pode dificultar a penetração do material na madeira.

Figura 19 – Esforços axiais de corte: Máxima carga na ponta e no canal ao longo dos testes de furação



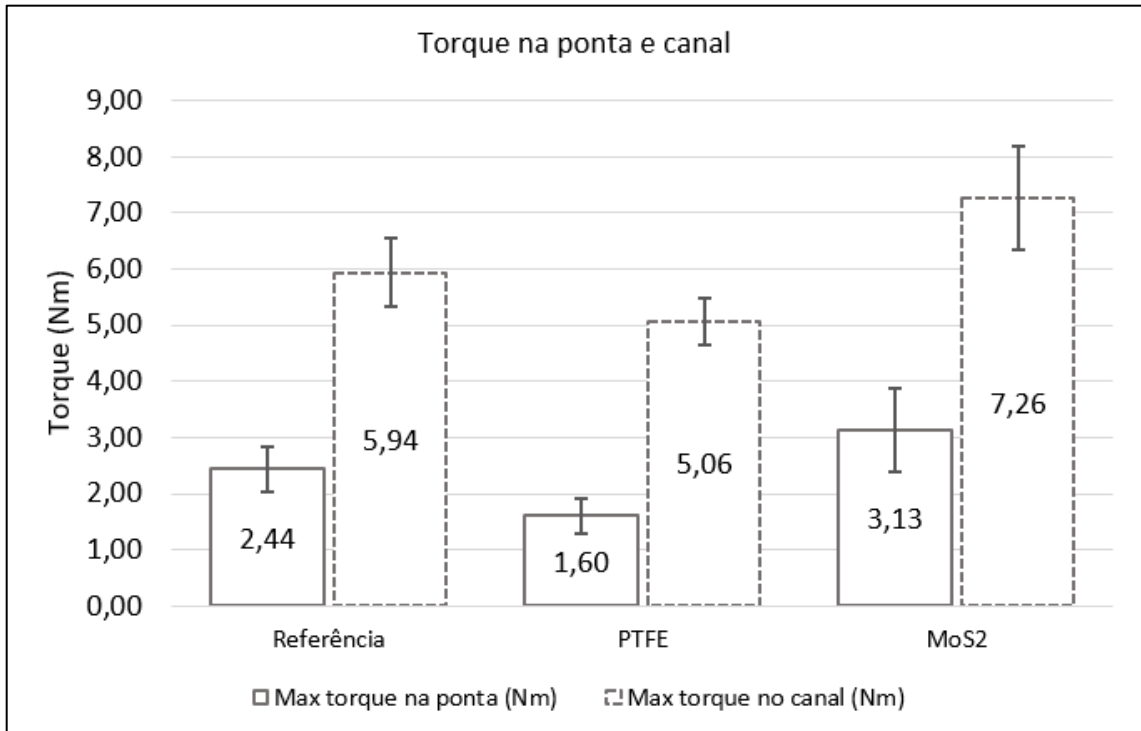
Fonte: Elaborado pelo Autor

4.3 MEDIÇÃO DO TORQUE DE FURAÇÃO

O torque verificado na ponta e no canal durante os cinco primeiros furos foram muito semelhantes entre as amostras (Figura 20). As amostras com PTFE apresentaram redução do torque na ponta de 35 % e no canal de 15 %. No entanto, para as amostras com MoS₂ observa-se um aumento do torque em 28 % na ponta e 22 % no canal. Medidas essas, considerando os valores médios em comparação com os da amostra referência (broca sem revestimento).

Observa-se o aumento de torque na região do canal da peça em relação a região da ponta, devido à mudança da geometria e do diâmetro da peça. O canal tem um diâmetro de 22 mm e a ponta 10 mm, que modificam a distribuição desse esforço ao longo da ferramenta. O torque tende a aumentar à medida que acentua-se o desgaste nas arestas de corte [60].

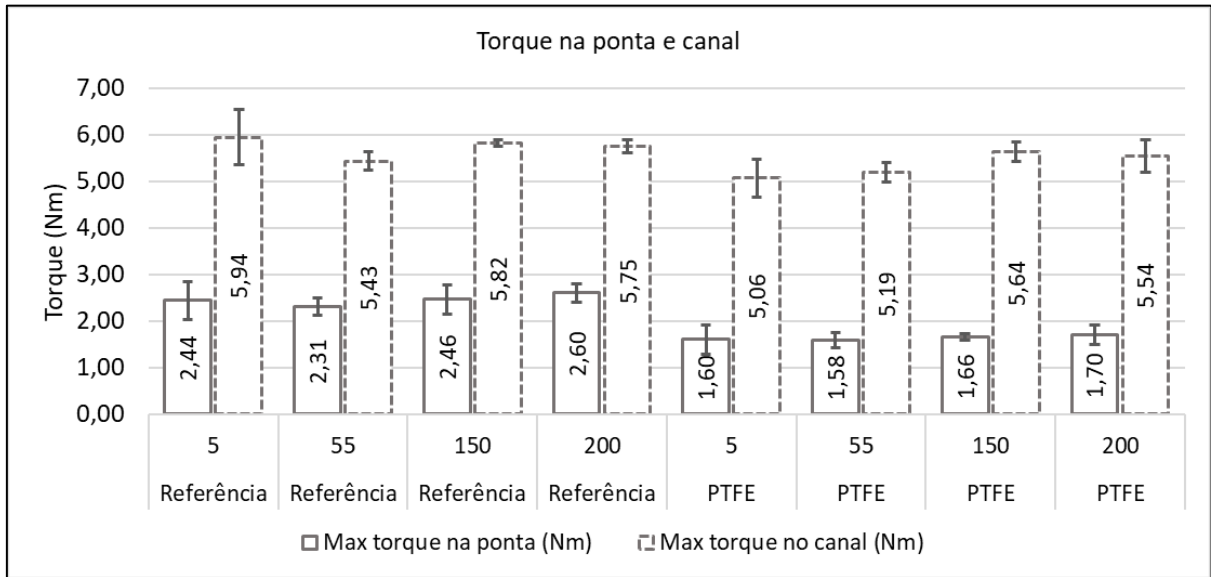
Figura 20 – Esforços de corte: Máximo torque na ponta e no canal.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Nos ensaios de furação não houveram alterações significativas no torque nas peças de referência, as quais não tem revestimentos. De maneira geral considerando os desvios padrão o torque se manteve constante com variações menores que 9 % em média na região do canal e 12 % na região da ponta quando comparados os dados com 5 e 200 furos nas amostras sem revestimentos. Já nas amostras com PTFE esta variação ficou em 5,8 % na ponta e 8,6 % no canal ao longo dos testes de furação. Observou-se que o torque nas amostras com PTFE manteve-se em um nível inferior em todos os testes de furação quando comparados as amostras sem revestimento. Após duzentos furos as amostras com PTFE apresentaram torque de 34,6 % na ponta e 4,3 % no canal menores quando comparados as amostras sem revestimento. O menor torque nas amostras de PTFE podem ter relação com o baixo coeficiente de atrito e o tempo que o revestimento manteve-se aderido à superfície da broca em relação as amostras com MoS₂. O teste de hipóteses tipo *T-Student* mostrou que na região da ponta a confiabilidade é maior que 95 % e no canal é maior que 90 % em todos os resultados de torque apresentados.

Figura 21 – Esforços de corte: Torque na ponta e no canal ao longo dos testes de furação



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.4 DUREZA DA MADEIRA

Os resultados da medição da dureza da madeira utilizada nos testes de furação estão apresentados na Tabela 1. Na média a dureza Shore D encontrada em uma amostra representativa dos blocos de madeira utilizados na furação mostrou que a faixa de dureza está entre 30,9 e 54,9 Shore D, valores próximos à dureza do MDF [50] e a dureza do *Pinus Elliottii* está ao redor de 50 Shore D a 20 °C [61]. As regiões sobre os veios representam o acúmulo e alinhamento das fibras da madeira, apresentando maiores durezas do que entre veios, conforme mostraram os resultados da Tabela 1. Em ambas as orientações normal e paralelo às fibras, os valores de dureza entre os veios foram menores do que 37 Shore D com desvios padrão menores de 8 %, já sobre os veios os valores de dureza não ultrapassaram 55 Shore D com desvios padrão inferiores a 6 %.

Tabela 1 – Valores de dureza Shore D do *Pinus Elliottii*.

Orientação	Região	Medições (Shore D)										Média	Desvio padrão
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Normal as fibras	Sobre o veio	51	53	54	58	58	58	56	54	52	55	54,9	2,56
	Entre os veios	36	35	35	37	38	40	40	35	34	35	36,5	2,17
Paralelo as fibras	Sobre o veio	47	48	44	52	49	51	52	50	45	52	49,0	2,94
	Entre os veios	28	28	29	29	32	35	32	31	32	33	30,9	2,33

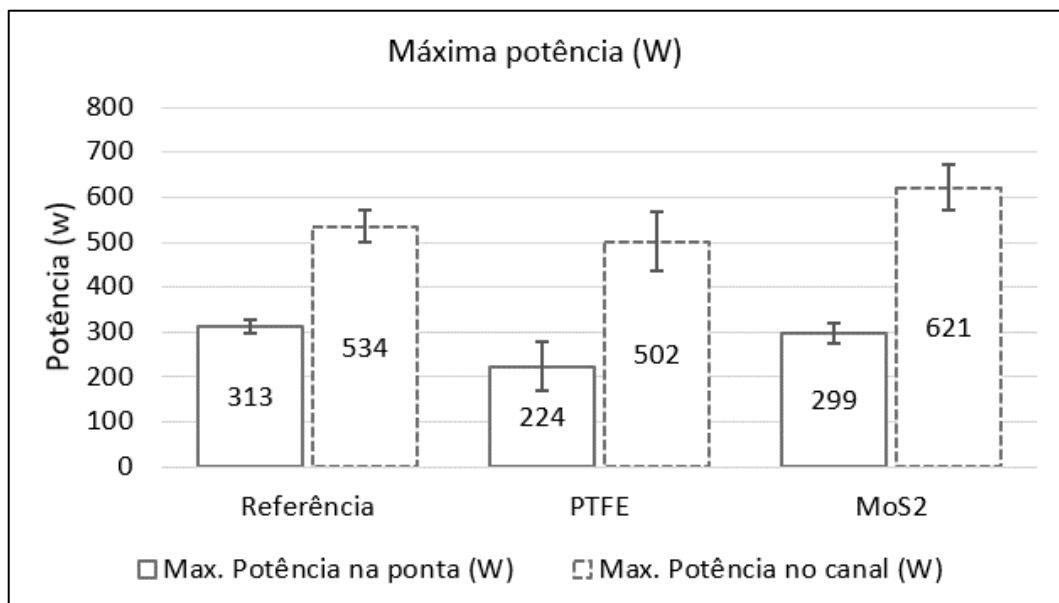
Fonte: Elaborado pelo Autor

4.5 POTÊNCIA E ROTAÇÃO

Na Figura 22 pode-se observar a variação da potência elétrica consumida para efetuar as furações nas diferentes amostras com a rotação constante de 450 rpm $\pm 0,15\%$. Nessa condição as amostras apresentaram um consumo de potência para furação na ponta inferior que no canal, o que é razoável, pois o torque de furação na ponta da broca é inferior ao do corpo do canal, devido ao aumento do diâmetro da ponta para o canal. Em relação à broca referência, a potência gasta nas amostras de PTFE para a furação apresentou uma tendência de menor consumo, com uma redução de 28 % na ponta e 6 % no canal, enquanto que, para a amostra com MoS₂ houve uma redução de 5 % na ponta e aumento de 16 % no canal. As amostras de MoS₂ em relação às amostras com PTFE apresentaram aumento de consumo de 33 % na ponta e aumento de 24 % no canal.

Os maiores valores de potência no processo de furação foram encontrados nas amostras de MoS₂, que chegaram a 76 % da capacidade máxima da ferramenta, enquanto as amostras sem revestimento atingiram 65 %. Já as amostras com PTFE atingiram 61 % da capacidade da furadeira, de 820 W, o que representa redução de 6 % em relação as amostras sem revestimentos. Possivelmente o menor torque de furação contribuiu para o menor consumo de potência nas amostras de PTFE em comparação ao MoS₂.

Figura 22 – Potência consumida na furação



Fonte: Elaborado pelo Autor

Observa-se na análise de potência consumida ao longo da furação na Figura 23 um aumento na potência consumida de 10 % no canal e 1,5 % na ponta das amostras referência sem

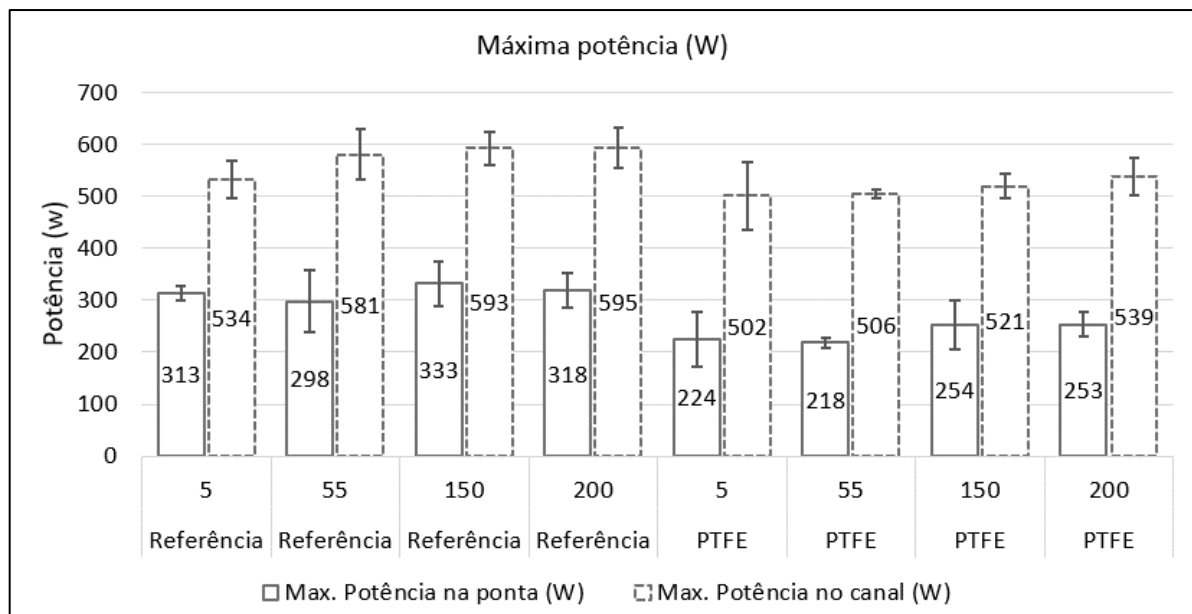
revestimentos. Possivelmente haverá um incremento na potência à medida que aumenta a quantidade de furos devido a influência de outros fatores como por exemplo o desgaste gradativo de arestas de corte.

Nas amostras com PTFE ao longo da furação observa-se um aumento máximo na potência consumida na ponta de 11 % e no canal de 7 % quando comparados os dados com 5 e 200 furos. Com comportamento e fatores similares aos dados das amostras sem revestimentos, à medida que aumenta a quantidade de furos nas amostras de PTFE deve permanecer o incremento de potência requerida.

Por outro lado, de maneira geral a potência consumida nas amostras com PTFE apresentou valores inferiores quando comparados as amostras sem revestimentos, na ponta com cerca de 28 % após 5 furos e 20 % após 200 furos, e na região do canal com 6 % após 5 furos e 9,5 % após 200 furos.

Esta redução observada em todas as regiões das amostras reflete diretamente no consumo de energia durante a furação e pode significar um aumento na quantidade de furos com a mesma carga de bateria. Possivelmente a presença de PTFE no revestimento influenciou na redução da potência (Figura 23) e no torque de furação (Figura 21). O teste de hipóteses tipo *T-Student* mostrou que na região da ponta a confiabilidade é maior que 95 % e no canal é maior que 90 % para os resultados de torque apresentados nos comparativos entre PTFE e amostra referência e entre PTFE e MoS₂. Já nos comparativos entre MoS₂ e amostras referência a confiabilidade na ponta foi de apenas 45 % e no canal maior do que 95 %.

Figura 23 – Potência consumida ao longo dos testes de furação

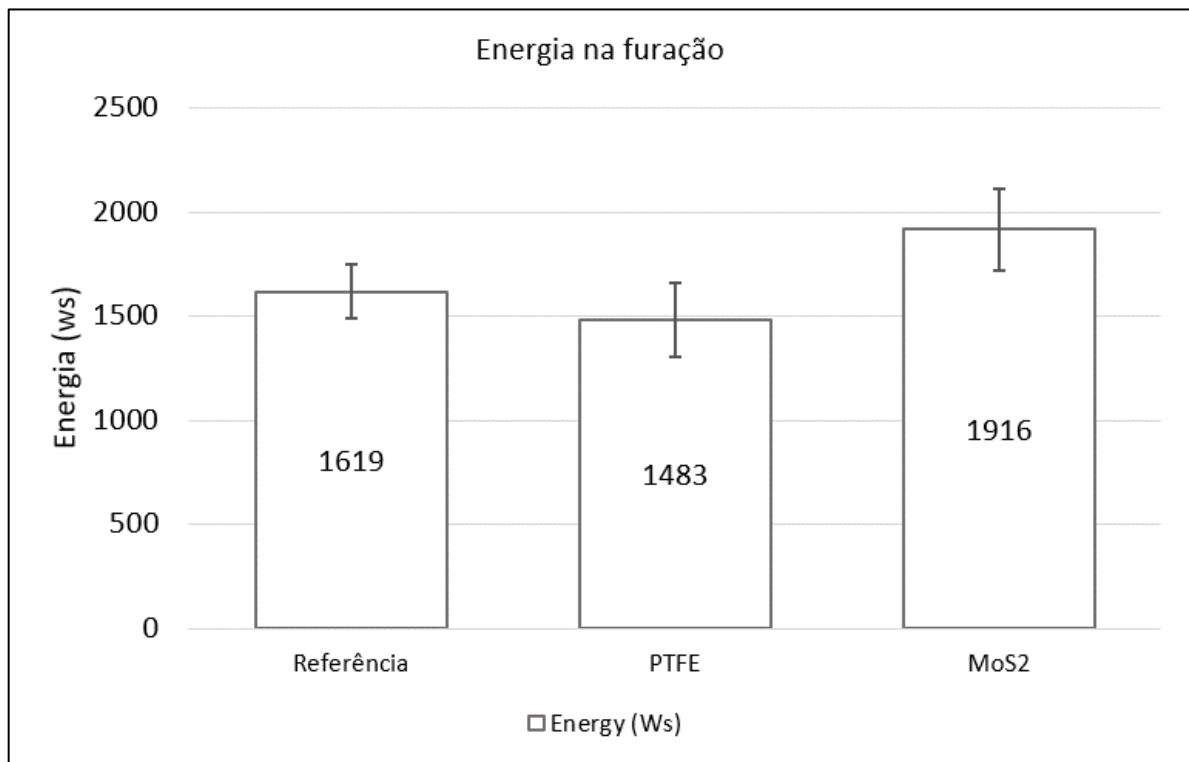


Fonte: Elaborado pelo Autor

4.6 ENERGIA

Os tempos de furação de todas as amostras apresentaram valores entre 4,18 e 4,55 segundos em média e desvio padrão máximo de 7,6 %. Com o uso do alicate amperímetro conectado ao sistema de aquisição de dados, o qual realizou as leituras de tensão e corrente, foi possível através do *Software* fazer os cálculos e gerar as curvas de consumo de energia nos ensaios. Assim, a energia gasta para execução dos furos foi na média levemente menor, cerca de 8 % com desvio padrão de 12 %, na amostra com PTFE em relação a amostra referência. Já a amostra com MoS₂ necessitou 18 % mais energia com desvio padrão 10,1 % para efetuar a mesma quantidade de furos comparada a amostra referência, o que possivelmente irá reduzir a vida da bateria da parafusadeira (Figura 24). As amostras com MoS₂ consumiram 29 % mais energia para fazer a mesma quantidade de furos das amostras com PTFE.

Figura 24 – Energia consumida comparada com tempo por furação.



Fonte: Elaborado pelo Autor

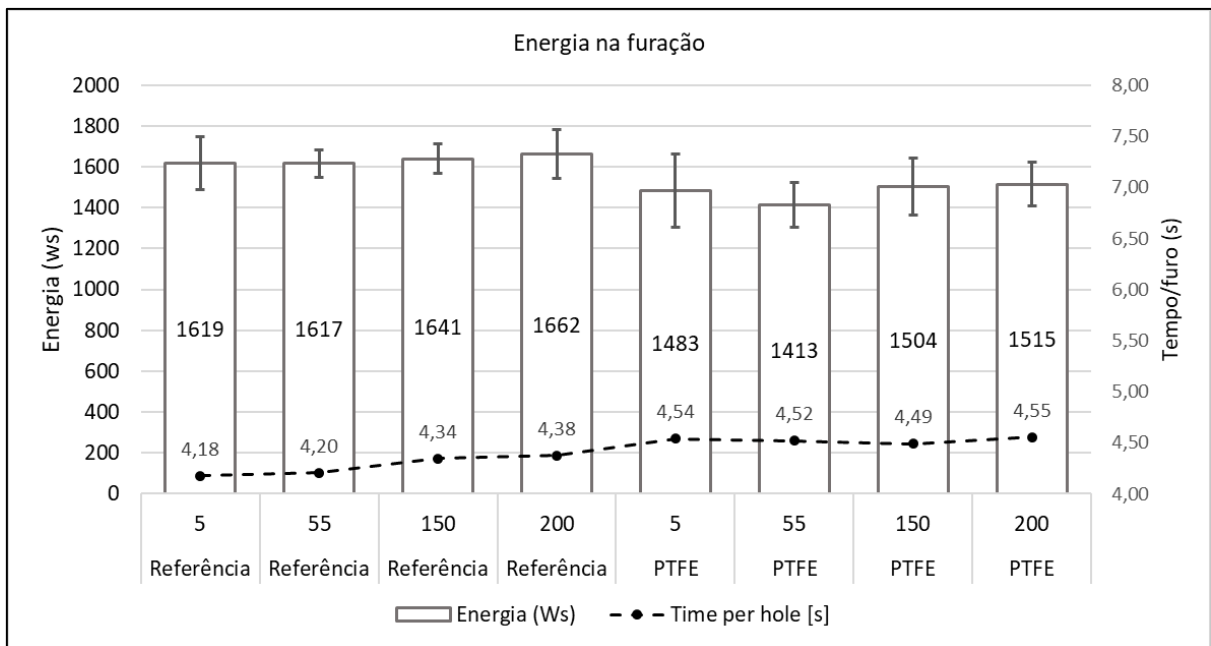
O comparativo entre 5 e 200 furos na Figura 25 mostra que houve aumento de 2,6 % no consumo de energia e 4,5 % no tempo médio por furo nas amostras sem revestimentos e de 2,1 % no consumo de energia e 0,5 % no tempo médio por furo nas amostras com PTFE. Estas variações tendem a não representar grandes impactos na performance do produto.

Por outro lado, as amostras com PTFE consumiram 8,4 % menos energia com 5 furos

e 8,8 % com 200 furos. Além disso, considerando a redução de torque (Figura 21) e consumo de potência (Figura 23) pode-se esperar um aumento na quantidade de furos por carga de bateria possibilitando ao usuário final uma melhor experiência com o produto.

O maior torque apresentado nas amostras com MoS₂ pode ter sido fator determinante para o aumento no consumo de energia na furação.

Figura 25 – Energia consumida comparada com tempo ao longo de todos os testes de furação

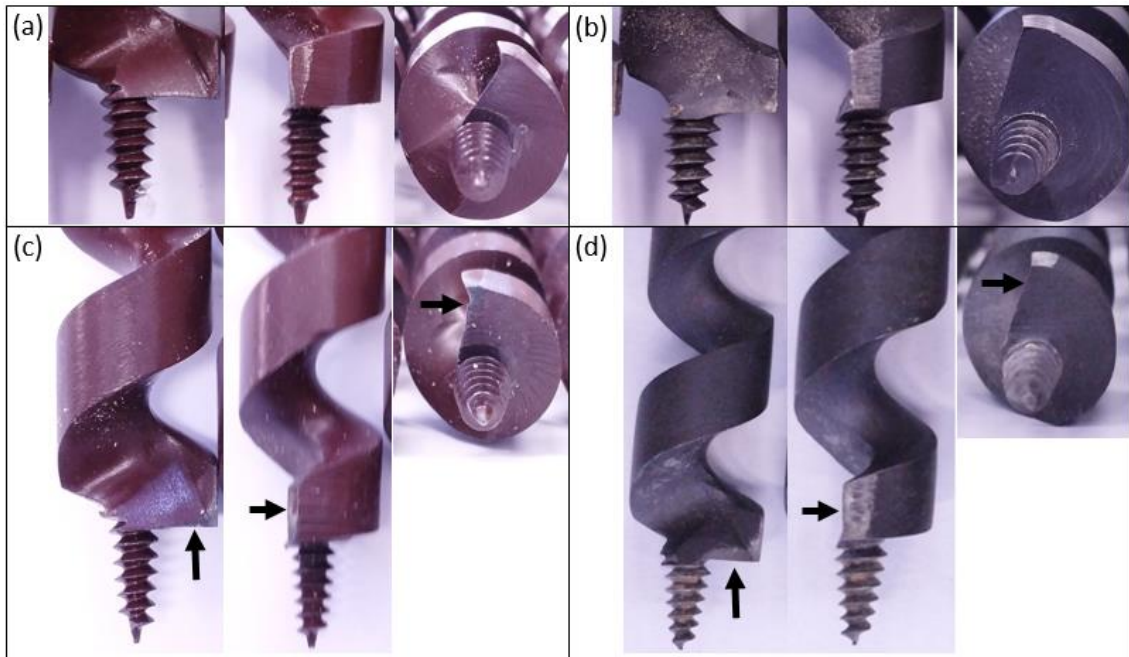


Fonte: Elaborado pelo Autor

4.7 ADERÊNCIA DO REVESTIMENTO

Em relação ao deslocamento da camada pode-se visualizar que, após 55 furos as amostras de PTFE apresentaram os melhores resultados, houveram mínimas remoções de material, ver as setas na Figura 26c. Nas amostras de MoS₂ observa-se uma remoção total da camada nas regiões próximas às arestas de corte, conforme indicado nas setas na Figura 26d. A adição de nanopartículas de grafeno e fulerenos nos compósitos com PTFE poderiam aumentar significativamente a resistência ao desgaste [42].

Figura 26 – Comparação de deslocamento do revestimento: (a) PTFE com 5 furos (b) MoS₂ com 5 furos (c) PTFE com 55 furos (d) MoS₂ com 55 furos.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Os testes adicionais de furação realizados com as amostras sem revestimento e com PTFE atingiram 200 furos. As amostras sem revestimento não apresentaram desgastes acentuados nas arestas de corte, com o torque variando menos de 12 % ao longo da furação (Figura 21), potência consumida menor do que 10 % (Figura 23) e variação no consumo de energia com variação menor do que 5 % (Figura 25).

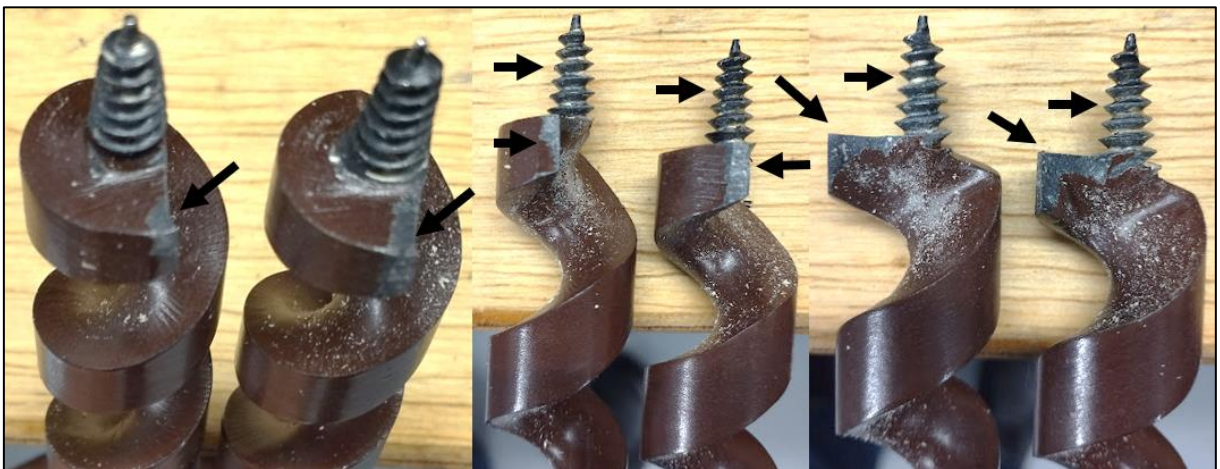
Por outro lado, as amostras com PTFE apesar de apresentarem variações no torque, potência e energia consumida menores que 11 %, elas mostram um comportamento de aumento destes itens ao longo da furação. Estes incrementos podem ser atribuídos ao comportamento à medida que há deslocamento da camada de revestimento deixando o substrato da broca exposta e levando assim, a ter resultados similares aos encontrados nas amostras sem revestimento com a mesma quantidade de furos. A resistência ao desgaste das camadas de PTFE poderiam ser melhorados com adição de nanopartículas de cobre [36].

Pode-se verificar através das setas na Figura 27 que houve remoção total da camada de revestimentos nas regiões principais de corte da broca, desta forma a tendência é que as forças de furação a partir de 200 furos sejam equivalentes as forças das brocas sem revestimentos com a mesma quantidade de furos, uma vez que o revestimento não causa mais efeito sobre o produto. Nos gráficos de torque, potência e energia observa-se que com 200 furos as forças são ainda um pouco abaixo quando comparadas com as brocas sem revestimentos, isto deve-se ao fato de, apesar de ter removido totalmente a camada nas regiões principais de

corte, ainda há revestimento presente no canal, o que pode estar causando influência na performance.

Observa-se que o PTFE exerce influência nos resultados de furação, onde ele reduz torque, potência e energia consumida, o que pode ser observado nos resultados apresentados. Este efeito é observado até que a camada de revestimento começar a deslocar-se. O tratamento com plasma assistido por calor poderia ser um método alternativo para melhorar a aderência da camada de PTFE [35].

Figura 27 – Amostras de PTFE com 200 furos



Fonte: Elaborado pelo Autor

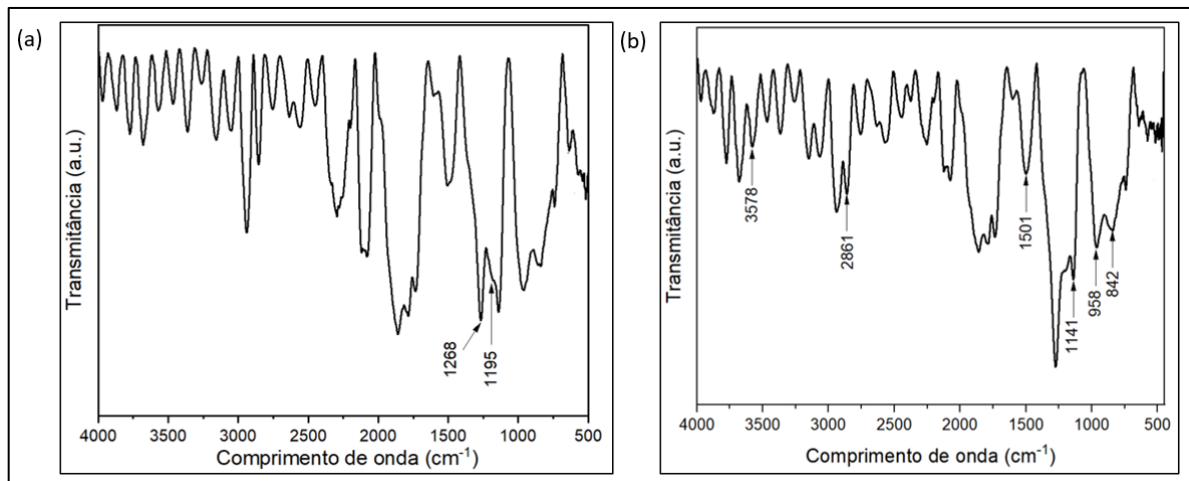
4.8 ANÁLISE DE FTIR

A análise de FTIR apresentou uma banda na faixa de 1268 cm^{-1} e outra em 1195 cm^{-1} indicando o alongamento assimétrico e simétrico da ligação C-F, respectivamente. Essas bandas são características do PTFE (Figura 28a). Elas também foram identificadas em outros estudos como por exemplo em uma técnica de regeneração óssea guiada (ROG), onde o PTFE expandido (e-PTFE) e politetrafluoroetileno laminado (PTFE) foram caracterizados por FTIR-ATR observando-se uma banda na faixa de 1261 cm^{-1} intensa indicando o alongamento assimétrico da ligação C-F característica de absorção por efeito vibracional de estiramento para ligações carbono-flúor ($=\text{CF}_2$) e simétrico C-F na faixa de 1215 cm^{-1} que também é característica de absorção de efeito vibracional de estiramento para ligações monofluoradas ($\equiv\text{CF}$) [38].

As amplas bandas de absorção encontradas nas faixas 842 cm^{-1} , 958 cm^{-1} , 1141 cm^{-1} , e 1501 cm^{-1} podem ser atribuídas à ligação S-S e nas bandas 2861 cm^{-1} e 3578 cm^{-1} podem ser

atribuídas ao grupo O-H. Ambas podem ser consideradas bandas características do MoS₂ (Figura 28b). Outros estudos apresentam resultados que se assemelham aos encontrados como é o caso onde observa-se uma banda alargada na região entre 2400 a 2800 cm⁻¹ para dispersão de MoS₂, a qual é centralizada em 2615 cm⁻¹ que pode ser relacionada com a banda de tiol (-SH) que fica em uma faixa de 2540 a 2563 cm⁻¹ podendo ser indicativo de mudança de estrutura química do MoS₂ aos grupos químicos tipo tiol [43]. Além disso, nano partículas de dicalcogeneto de metal de transição MoS₂ sintetizadas por um método de evaporação lenta mostraram amplas bandas de absorção em 639 cm⁻¹, 893,39 cm⁻¹, 1402,99 cm⁻¹ e 1622,8 cm⁻¹, que são atribuídas ao MoS₂, banda em 483,23 cm⁻¹ e a de 931,39 cm⁻¹ devido à ligação S-S, já os picos em 3182 cm⁻¹ pertencem às bandas características do grupo O-H [45].

Figura 28 – Gráficos de FTIR: (a) revestimento de PTFE (b) revestimento de MoS₂.

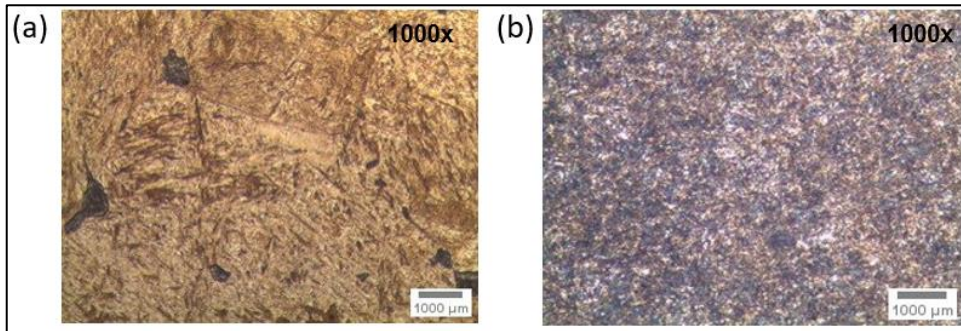


Fonte: Elaborado pelo Autor

4.9 ANÁLISE METALOGRAFICA

Na análise metalográfica observou-se que nas amostras analisadas antes de aplicar os revestimentos a microestrutura é martensítica temperada o que pode ser comprovado pela presença de uma matriz mesclada com agulhas e placas (Figura 29a) as quais estão de acordo com a literatura [62]. Todas as amostras analisadas foram afetadas termicamente devido ao tempo e temperatura de exposição durante o processo de aplicação dos revestimentos, evidenciado pela microestrutura martensítica revenida na (Figura 29b) em todas as regiões analisadas da peça, a qual assemelha-se a literatura nestas condições [33]).

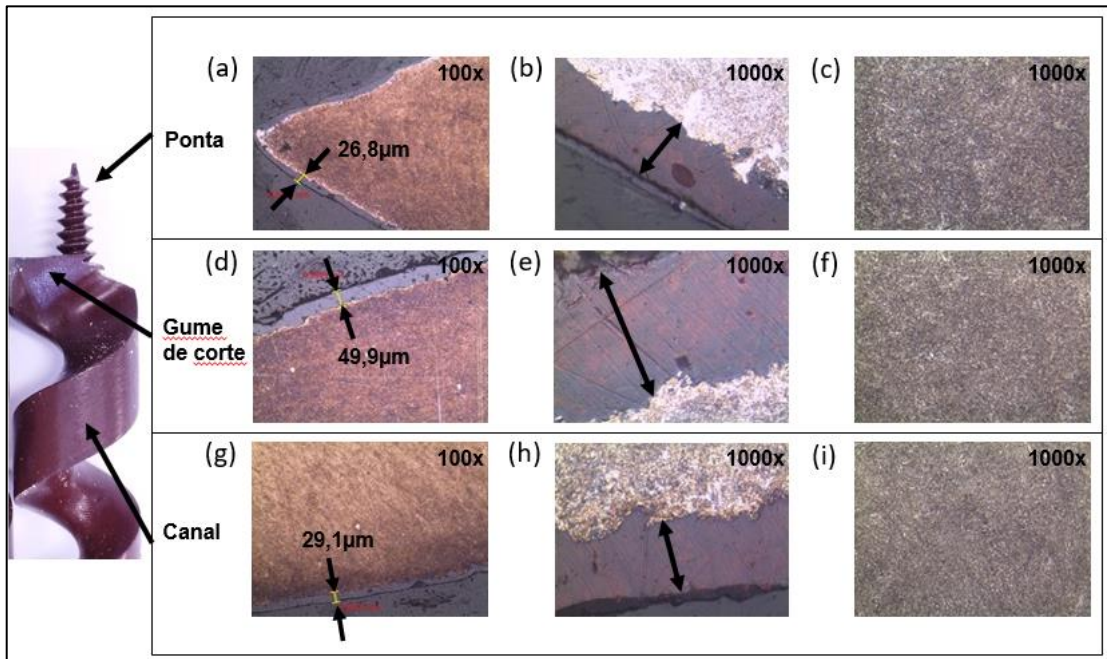
Figura 29 – Microestrutura martensítica do aço da broca AISI SAE 1060: (a) condição temperado antes de aplicar os revestimentos (b) condição temperado e revenido após a aplicação dos revestimentos.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Análises nas regiões onde há maior solicitação mecânica durante o processo de furação mostram que nas amostras com PTFE (Figura 30) em todas as regiões o desprendimento do revestimento foi mínimo sendo visível a presença do mesmo após a realização de 55 furos, contudo após 200 furos o revestimento deslocou nas regiões de corte como pode ser visto na Figura 27. Observa-se também que as microestruturas do substrato (Figura 30c, f, i), as quais foram submetidas ao processo de aquecimento a 400 °C por 1h15min durante a deposição dos revestimentos transformaram-se em martensita revenida [63].

Figura 30 – Microestrutura da amostra de PTFE: (a, b, c) microestrutura e revestimento na região da ponta (d, e, f) microestrutura e revestimento na aresta de corte (g, h, i) microestrutura e revestimento na região do canal.

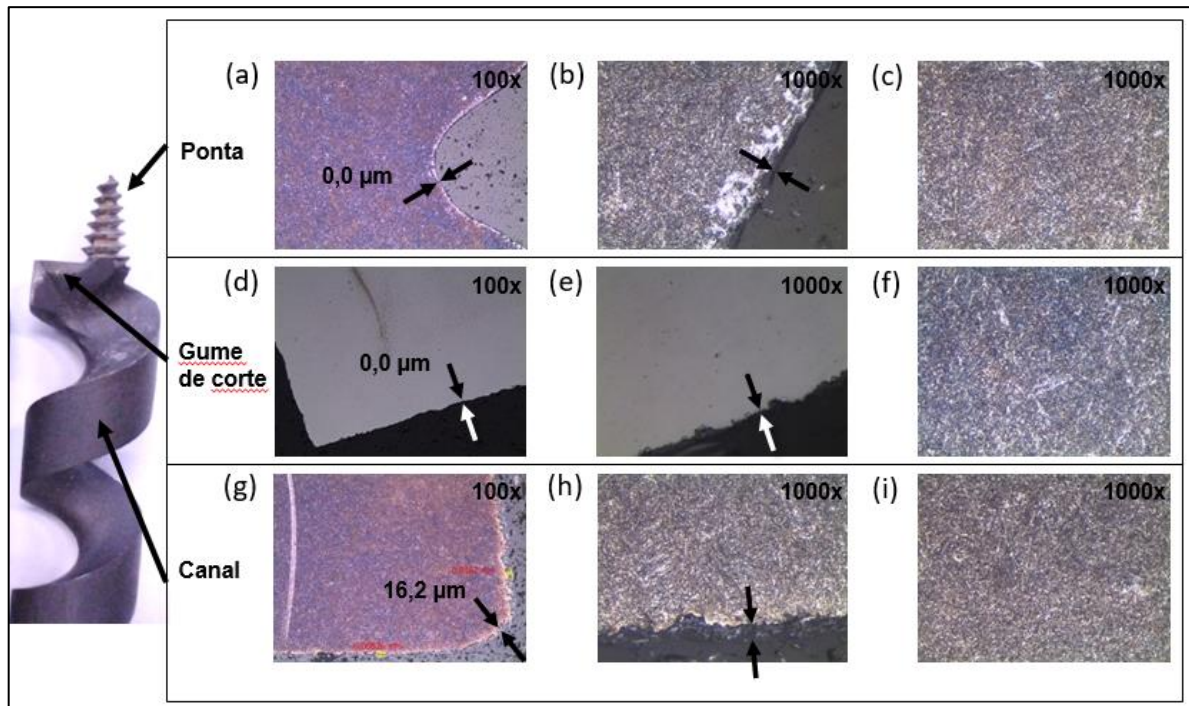


Fonte: Elaborado pelo Autor

Nas amostras com MoS₂ também foi verificada uma microestrutura de martensita revenida no substrato após a aplicação dos revestimentos, tendo em vista que as amostras foram expostas a 400 °C por 1h15min (Figura 31c, f, i).

Observa-se que houve remoção total da camada depositada na região da ponta e na aresta de corte (Figura 31a, d) e (Figura 31b, e) após a realização de 55 furos. Entretanto, na região do canal foi possível visualizar a presença de camada de revestimento (Figura 31g). Os valores que comprovam estas análises são mostrados na (Tabela 2), da espessura prevista pelo fornecedor dos revestimentos comparada com os valores medidos nas análises.

Figura 31 – Microestrutura da amostra de MoS₂: (a, b, c) microestrutura e revestimento na região da ponta (d, e, f) microestrutura e revestimento na aresta de corte (g, h, i) microestrutura e revestimento na região do canal.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 2 – Espessura de camada de revestimento em cada região da peça analisada comparando os valores previstos pelo fornecedor e após os testes realizados.

Amostra	Ponta		Aresta de corte		Canal	
	Previsto (μm)	Realizado (μm)	Previsto (μm)	Realizado (μm)	Previsto (μm)	Realizado (μm)
PTFE	20~30	25 ± 4	20~30	50 ± 4	20~30	30 ± 4
MoS ₂	20~30	0,0	20~30	0,0	20~30	16 ± 3

Fonte: Elaborado pelo Autor

Assim como já observado a mudança de microestrutura após a aplicação dos

revestimentos nota-se alterações significativas também na dureza. Amostras avaliadas antes de aplicar os revestimentos apresentaram durezas 48 a 52 HRc (HV 484 a HV 544). Contudo, os substratos com PTFE apresentaram reduções na dureza para 33 a 35 HRc (HV 327 a HV 349) e aqueles com MoS₂ para 35 a 35,5 HRc (HV 345 a HV 349) (Tabela 3). A dureza obtida nas amostras de MoS₂ pode estar relacionada com a baixa performance e melhorias na taxa de desgaste podem estar relacionadas ao aumento da dureza [64]. As camadas de revestimentos apresentaram durezas abaixo de HV 55 e por serem valores significativamente baixos em relação ao substrato, possivelmente não influenciarão nas melhorias da vida da ferramenta, caracterizando um revestimento com baixa resistência ao desgaste, característica fundamental para garantir a vida da ferramenta especialmente nas arestas de corte onde o incremento de desgaste influencia no aumento do torque de furação [60] (ver Tabela 3). A baixa dureza nas arestas de corte não é recomendada para este produto, pois pode afetar negativamente na vida

Tabela 3 – Comparativo de dureza Vickers nas amostras analisadas.

Amostra	Substrato	Camada
Referência	484~544	n/a
PTFE	327~349	23~26
MoS ₂	345~349	21~52

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.10 METODOLOGIA DE ENSAIOS

A metodologia de ensaio aplicada neste estudo mostrou-se eficaz e de acordo com a aplicação da ferramenta. Os controles de movimentação e aplicação de carga do sistema foram fundamentais para garantir a consistência do teste com todas as brocas sendo ensaiadas sob a mesma base de parâmetros, assim eliminando interferências indesejadas nos resultados. A seleção dos corpos de prova de madeira, a utilização do mesmo equipamento ao longo de todos os testes e a seleção e controle com as amostras testadas também garantiram controle e consistência nos resultados. O sistema de aquisição de dados de furação foi fundamental, possibilitando através do software a coleta adequada dos dados comparativos dos testes em todas as amostras. A metodologia aplicada possibilitou minimizar ao máximo as influências de fatores externos e variações indesejadas nos testes, garantindo assim, melhor controle e consistência nos resultados.

5 IMPACTOS TÉCNICO-CIENTÍFICO, ECONÔMICO

Esta pesquisa busca mostrar impactos técnico-científico no âmbito da melhoria de performance das brocas tipo *Auger Bit* após a aplicação de revestimentos de PTFE e MoS₂, aumentando a vida da ferramenta, , reduzindo o torque de furação, o qual proporciona melhor experiência do usuário e reduz o consumo de energia na furação, este último por sua vez, aumentando a quantidade de furos por carga de bateria.

Busca também trazer a inovação na aplicação do revestimento de PTFE e MoS₂ nesta linha de produtos, até então pouco explorada neste sentido. A adição de revestimentos nas *Auger Bits* pode aumentar a resistência ao desgaste das arestas de corte e melhorar a extração de cavacos devido as suas propriedades antiaderentes. Houve também uma melhora nos esforços de corte enquanto o revestimento de PTFE manteve-se aderido à superfície da broca.

No âmbito econômico, a expectativa também é atingir no produto final um resultado visual e de performance positivos que possibilite lançar novamente estas brocas no mercado com uma nova estratégia e um novo posicionamento de mercado, buscando aumento das vendas.

Visualmente deve ser possível identificar os produtos com as cores da marca, uma vez que estes revestimentos podem ser compostos com as cores conforme a tonalidade desejada. Este apelo visual, além de destacar o produto no mercado, também pode ser usado como estratégia de *marketing* e vendas, e possibilitando a criação de publicidade dedicada a esta linha de produtos.

Não foi foco desta pesquisa, porém possivelmente haverá acréscimo no custo final do produto devido ao revestimento, não apenas pelo seu valor adicional, mas também pelo processo de aplicação, onde deve haver necessidade de investimentos caso o resultado do estudo seja positivo e favorável. Contudo, sugere-se que seja feita a análise de impacto em custo mensurando retorno de investimentos e impacto comercial com esta possível alteração nas especificações do produto.

6 CONCLUSÕES

Após a aplicação dos revestimentos as amostras com PTFE apresentaram os melhores resultados em relação a redução da rugosidade comparadas a amostra referência e a amostra com MoS₂.

O PTFE apresentou significativas melhorias no torque de furação comparado a amostra referência. Além disso, solicitaram menor potência da furadeira em comparação com a amostra referência e com MoS₂ além de consumir menos potência nos primeiros cinquenta e cinco furos. Nos testes adicionais as amostras de PTFE apresentaram menor torque, menor potência da furadeira e menor energia consumida na furação quando comparadas com as amostras referência. Estes resultados são positivos, pois podem ser relacionados com a quantidade de furos que o usuário consegue fazer por carga de bateria.

O PTFE também mostrou-se mais eficaz quando comparado com MoS₂, apresentando melhores resultados na rugosidade, torque, potência e energia consumida. Além disso obteve melhores níveis de desgaste do revestimento.

Na carga axial, não houve significativas alterações durante a furação. A rotação da broca durante os testes de furação permaneceu igual ao configurado na furadeira.

Os resultados encontrados podem aumentar a vida de trabalho da ferramenta enquanto não houver desgaste acentuado do revestimento, porém, após duzentos furos houve remoção da camada de revestimento de PTFE nas arestas de corte, onde o revestimento perdeu seu efeito na furação.

A microestrutura das brocas transformou-se de martensita temperada para martensita revenida após a aplicação dos revestimentos o que foi um ganho na tenacidade das ferramentas. Por outro lado, a exposição ao aquecimento durante o processo de aplicação dos revestimentos impactou negativamente na dureza, reduzindo-a a um nível abaixo do esperado.

A metodologia aplicada nos testes de furação mostrou-se eficaz garantindo um excelente controle de parâmetros, a mesma base comparativa de testes entre as amostras e evitando a influência de fatores externos indesejados.

De modo geral, as amostras com PTFE obtiveram os melhores resultados enquanto não houver desgaste do revestimento.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Investigar outros métodos de aplicação do PTFE com o objetivo de aumentar a sua aderência de camada e proporcionando assim uma maior performance das ferramentas

Investigar adição de outros elementos na composição do PTFE para auxiliar na resistência ao desgaste

Estudar outros métodos de tratamentos superfícies para serem aplicados antes da deposição dos revestimentos com o objetivo de aumentar a aderência de filmes protetores

Fazer um estudo mais detalhado para definir novos parâmetros de tratamento térmico afim de manter o nível de dureza do substrato após a aplicação dos revestimentos.

REFERÊNCIAS

- [1] F. Andreatta *et al.*, “Degradation of PTFE non-stick coatings for application in the food service industry”, *Eng Fail Anal*, vol. 115, n° November 2019, p. 104652, 2020, doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104652.
- [2] M. Abdennadher, A. Bouguecha, B. A. Behrens, E. Stockburger, e R. Elleuch, “Experimental Characterization of Coated Aluminum Sheets for Deep Drawing Applications”, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, p. 842–850, 2023, doi: 10.1007/978-3-031-14615-2_94.
- [3] W. D. Callister Jr., *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*, 5ª., vol. 59, n° 535. Rio de Janeiro, 2003.
- [4] S. V. Canevarolo Jr, *Ciência dos Polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros*, 2ª., vol. 1. São Paulo, 2006.
- [5] W. D. Callister Jr., *Ciência e Engenharia de Materiais. Uma Introdução*, 10º ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.
- [6] W. F. Smith e J. Hashemi, *FUNDAMENTOS DA ENGENHARIA E CIENCIA DOS MATERIAIS*, 5ª. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2012.
- [7] T. Xie, J. Lai, e H. Yang, “Simulation of effect of counterface roughness on the friction transfer and wear of PTFE sliding against steel”, *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 71, n° 9, p. 1086–1092, 2019, doi: 10.1108/ILT-12-2018-0439.
- [8] S. Wang e C. Niu, “Torsional tribological behavior and torsional friction model of polytetrafluoroethylene against 1045 steel”, *PLoS One*, vol. 11, n° 1, p. 1–13, 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0147598.
- [9] F. Wypych, “MOLYBDENUM DISULFIDE, A MULTIFUNCTIONAL AND REMARKABLE MATERIAL: TWELVE YEARS ON”, vol. 25, n° 1, p. 83–88, 2002, doi: 10.5935/0100-4042.20140150.
- [10] F. Wypych, “MOLYBDENUM DISULFIDE, A MULTIFUNCTIONAL AND REMARKABLE MATERIAL: TWELVE YEARS ON”, vol. 25, n° 1, p. 83–88, 2002, doi: 10.5935/0100-4042.20140150.
- [11] L. Yang *et al.*, “TiMoN nano-grains embedded into thin MoS₂-based amorphous matrix: A novel structure for superhardness and ultra-low wear”, *Appl Surf Sci*, vol. 462, n° July, p. 127–133, 2018, doi: 10.1016/j.apsusc.2018.08.050.
- [12] M. Marian *et al.*, “Ti₃C₂T_x solid lubricant coatings in rolling bearings with remarkable performance beyond state-of-the-art materials”, *Appl Mater Today*, vol.

- 25, p. 101202, 2021, doi: 10.1016/j.apmt.2021.101202.
- [13] A. F. PEREIRA, *Madeiras brasileiras guia de combinação e substituição.*, 1ª. São Paulo: Blucher, 2013.
- [14] C. T. Rizzini, *Árvores e Madeiras Úteis do Brasil. Manual de Dendrologia Brasileira*, 2ª. São Paulo: Blucher, 1978.
- [15] A. L. Gonzaga, *Madeira: Uso e Conservação*. 2006.
- [16] A. F. PEREIRA, *Madeiras brasileiras guia de combinação e substituição.*, 1ª. São Paulo: Blucher, 2013.
- [17] O. E. Özkan, “Effect of freezing temperature on impact bending strength and shore-D hardness of some wood species”, *BioResources*, vol. 17, nº 4. p. 6123–6130, 2022. doi: 10.15376/biores.17.4.6123-6130.
- [18] D. Ferraresi, *Fundamentos Da Usinagem Dos Metais*, 2018º ed, vol. 18ª reimpressão. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1970. Acessado: 15 de abril de 2023. [Online]. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521214199/>.
- [19] C. E. Stemmer, *Ferramentas de Corte II*, 3ª., vol. II. Florianópolis: Editora da UFSC, 2005.
- [20] Á. R. Machado, A. M. Abrão, R. T. Coelho, e M. B. da Silva, *Teoria da Usinagem dos Materiais*. Editora Blucher, 2015.
- [21] H. Tschätsch, *Applied Machining Technology*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. doi: 10.1007/978-3-642-01007-1.
- [22] A. E. Diniz, F. C. Marcondes, e N. L. Coppini, *Tecnologia da usinagem dos materiais*, 4ª. São Paulo: Artliber, 2003.
- [23] R. Pimentel, “MELHORIA DO PROCESSO DE FURAÇÃO DE FERRO FUNDIDO CINZENTO COM BROCAS HELICOIDAIS DE METAL DURO”, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2014.
- [24] F. Klocke, *Manufacturing Processes I Cutting*. Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2011. doi: 10.1007/978-3-642-11979-8.
- [25] H. M. Swain e W. Ohio, “US2029447A Auger Bit”, Serial No. 757,284, 1936
- [26] L. V. R. DURFEE, D. P. ENGVALL, A. E. NUNES, e P. R. BASSOTTO, “US20100307640 Cutting edge and cutting tool”, 9 de dezembro de 2010
- [27] L. Durfee, “GB2445671A Drill bit of two joined materials”, 2008
- [28] C. E. Stemmer, *Ferramentas de Corte I*, 5ª., vol. I. Florianópolis: Editora da UFSC, 2001.

- [29] W. J. G. Castillo, “FURAÇÃO PROFUNDA DE FERRO FUNDIDO CINZENTO GG25 COM BROCAS DE METAL-DURO COM CANAIS RETOS”, UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [30] A. Paul, S. G. Kapoor, e R. E. DeVor, “Chisel edge and cutting lip shape optimization for improved twist drill point design”, *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 45, n° 4–5, p. 421–431, abr. 2005, doi: 10.1016/J.IJMACHTOOLS.2004.09.010.
- [31] G. T. Smith, *Cutting Tool Technology - Industrial Handbook*, 1° ed. Southampton: Springer Verlag, 2008. doi: 10.1007/978-1-84800-205-0.
- [32] C. A. I. Handbook, *ASM Metals Handbook, Volume 09 Metallography and Microstructures Handbook*, vol. 9. 2004. [Online]. Disponível em: <http://www.worldcat.org/oclc/42469467>
- [33] J. F. Shackelford, *Ciencia dos Materiais*, 6ª. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2008.
- [34] A. Lech *et al.*, “Surface modification of plla, ptfe and pvdf with extreme ultraviolet (Euv) to enhance cell adhesion”, *Int J Mol Sci*, vol. 21, n° 24, p. 1–22, 2020, doi: 10.3390/ijms21249679.
- [35] Y. Ohkubo *et al.*, “Drastic Improvement in Adhesion Property of Polytetrafluoroethylene (PTFE) via Heat-Assisted Plasma Treatment Using a Heater”, *Sci Rep*, vol. 7, n° 1, p. 1–9, 2017, doi: 10.1038/s41598-017-09901-y.
- [36] S. Beckford, L. Mathurin, J. Chen, R. A. Fleming, e M. Zou, “The effects of polydopamine coated Cu nanoparticles on the tribological properties of polydopamine/PTFE coatings”, *Tribol Int*, vol. 103, p. 87–94, 2016, doi: 10.1016/j.triboint.2016.06.031.
- [37] Z. Bi, B. Kang, e P. Ouyang, “Fatigue analysis of actuators with teflon impregnated coating—challenges in numerical simulation”, *Actuators*, vol. 10, n° 4, p. 1–23, 2021, doi: 10.3390/act10040082.
- [38] P. A. M. C. Gomes, “Modificação da superfície e caracterização do Politetraflúoroetileno (PTFE) para aplicação em regeneração óssea guiada (ROG)”, *Instituto Militar de Engenharia*, vol. 66. p. 37–39, 2018.
- [39] H. Fan, Y. Su, J. Song, H. Wan, L. Hu, e Y. Zhang, “Design of ‘double layer’ texture to obtain superhydrophobic and high wear-resistant PTFE coatings on the surface of Al₂O₃/Ni layered ceramics”, *Tribol Int*, vol. 136, n° March, p. 455–461, 2019, doi: 10.1016/j.triboint.2019.04.004.
- [40] S. Li *et al.*, “The effect of different layered materials on the tribological properties of

- PTFE composites”, *Friction*, vol. 8, n° 3, p. 542–552, 2020, doi: 10.1007/s40544-019-0276-4.
- [41] G. O. Boakye, A. M. Ormsdóttir, B. G. Gunnarsson, S. Irukuvarghula, R. Khan, e S. N. Karlsdóttir, “The effect of polytetrafluoroethylene (Ptfе) particles on microstructural and tribological properties of electroless ni-p+ptfe duplex coatings developed for geothermal applications”, *Coatings*, vol. 11, n° 6, 2021, doi: 10.3390/coatings11060670.
- [42] W. Xiao e X. Ji, “Effect of nano fillers on the properties of polytetrafluoroethylene composites: Experimental and theoretical simulations”, *J Appl Polym Sci*, vol. 138, n° 45, p. 1–11, 2021, doi: 10.1002/app.51340.
- [43] C. L. C. Rodriguez, “Dissulfeto de Molibdênio (MoS₂) Bidimensional como carga para matrizes poliméricas”, 2020.
- [44] E. da C. Bernardo, “Síntese por deposição química de fase vapor e caracterização estrutural do dissulfeto de molibdênio”, 2019. Acessado: 20 de abril de 2023. [Online]. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/38364>
- [45] K. C. Lalithambika, K. Shanmugapriya, e S. Sriram, “Photocatalytic activity of MoS₂ nanoparticles: an experimental and DFT analysis”, *Appl Phys A Mater Sci Process*, vol. 125, n° 12, p. 1–8, 2019, doi: 10.1007/s00339-019-3120-9.
- [46] S. Tremmel *et al.*, “Evaluation of DLC, MoS₂, and Ti₃C₂T_x thin films for triboelectric nanogenerators”, *Nano Energy*, vol. 97, n° March, p. 107185, 2022, doi: 10.1016/j.nanoen.2022.107185.
- [47] S. Mohanty, A. K. Das, e A. R. Dixit, “Surface integrity and residual stress analysis of μ EDM coated Ti-alloy miniature components”, *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 36, n° 1, p. 48–58, 2021, doi: 10.1080/10426914.2020.1813894.
- [48] J. R. Hwang, Y. L. Liu, C. H. Chang, e M. C. Jeng, “Effects of heat treatment on the structures and wear behaviors of HVOF-Sprayed NiMoS₂Coatings”, *Mater Trans*, vol. 61, n° 9, p. 1813–1819, 2020, doi: 10.2320/matertrans.MT-M2020108.
- [49] P. Czarniak, K. Szymanowski, P. Panjan, e J. Górski, “Initial Study of the Effect of Some PVD Coatings (‘TiN/AlTiN’ and ‘TiAlN/a-C:N’) on the Wear Resistance of Wood Drilling Tools”, *Forests*, vol. 13, n° 2, 2022, doi: 10.3390/f13020286.
- [50] K. Sz wajka, J. Zielińska-Sz wajka, e T. Trzepiecin ski, “Experimental study on drilling MDF with tools coated with TiAlN and ZrN”, *Materials*, vol. 12, n° 3, 2019, doi: 10.3390/ma12030386.
- [51] S. Ghorbani, A. V. A. Crisostomo, V. A. Rogov, e N. I. Polushin, “Experimental and

- theoretical research on drilling epoxy granite using coated and uncoated carbide spiral drill bits”, *Int J Mech Sci*, vol. 135, n° March 2017, p. 240–252, 2018, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2017.11.025.
- [52] C. L. Kuo *et al.*, “Development of single step drilling technology for multilayer metallic-composite stacks using uncoated and PVD coated carbide tools”, *J Manuf Process*, vol. 31, p. 286–300, 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2017.11.026.
- [53] ABNT NBR 7190, “Projeto de estruturas de madeira”, p. 107, 1997.
- [54] ASTM D143-94, “American Society for Testing and Materials- ASTM. D143-94: Standard methods of testing small clear samples of timber”, *American Society for Testing and Materials - ASTM. Annual Book of ASTM*, vol. 94, n° Reapproved, p. 31, 1994, doi: 10.1520/D0143-94.
- [55] M. A. P. D. S. JÚNIOR, E. GALLIO, D. RIBES, P. Zanatta, R. Beltrame, e D. A. Gatto, “ANALISE DE ALTERAÇÃO NA RESISTÊNCIA A DUREZA JANKA PÓS TRATAMENTO POR PRESERVANTES DA ESPÉCIE DE *Pinus elliottii*”, em *XXV CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS*, Pelotas, 2016, p. 0–4.
- [56] ISO/ASTM E384-17, “Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials”, *The Biology of the Xenarthra*, p. 281–293, 2017, doi: 10.1520/E0384-17.
- [57] ASTM E92-04, “Standard Test Method for Vickers Hardness of Matallic Materials”, *American Society for Testing and Materials*. p. 10, 1997.
- [58] ASTM D2244-15, “ASTM D2240-15 Standard Test Methods for Rubber Property- Durometer Hardness”, *Annual Book of ASTM Standards*, p. 1–13, 2015, doi: 10.1520/D2240-15.2.
- [59] W. Song, L. An, Y. Lu, X. Zhang, e S. Wang, “Friction behavior of TiN–MoS₂/PTFE composite coatings in dry sliding against SiC”, *Ceram Int*, vol. 47, n° 17, p. 24003–24011, set. 2021, doi: 10.1016/j.ceramint.2021.05.109.
- [60] M. J. Jeong, S. W. Lee, W. K. Jang, H. J. Kim, Y. H. Seo, e B. H. Kim, “Prediction of drill bit breakage using an infrared sensor”, *Sensors*, vol. 21, n° 8, p. 2808, abr. 2021, doi: 10.3390/s21082808.
- [61] O. E. Özkan, “Effect of freezing temperature on impact bending strength and shore-D hardness of some wood species”, *BioResources*, vol. 17, n° 4. p. 6123–6130, 2022. doi: 10.15376/biores.17.4.6123-6130.
- [62] W. F. Smith e J. Hashemi, *FUNDAMENTOS DA ENGENHARIA E CIENCIA DOS MATERIAIS*, 5ª. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2012.

- [63] P. K. Katiyar, S. Misra, e K. Mondal, “Comparative Corrosion Behavior of Five Microstructures (Pearlite, Bainite, Spheroidized, Martensite, and Tempered Martensite) Made from a High Carbon Steel”, *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci*, vol. 50, n° 3, p. 1489–1501, mar. 2019, doi: 10.1007/S11661-018-5086-1/FIGURES/10.
- [64] L. Yang *et al.*, “TiMoN nano-grains embedded into thin MoS_x-based amorphous matrix: A novel structure for superhardness and ultra-low wear”, *Appl Surf Sci*, vol. 462, n° July, p. 127–133, 2018, doi: 10.1016/j.apsusc.2018.08.050.

ANEXO A – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO ALICATE AMPERÍMETRO

GMC INSTRUMENTS

TEST RESULTS CERTIFICATE

ISSUED BY GMC-I PROSys LTD

PRODUCT DETAILS:

Product Model:	CP1800_4
Serial Number:	P21310036859
Part Number:	P-12.680.0
Customer Name:	Standard
Date of Calibration:	30 July 2021
Time:	11:41 AM
Calibrated By:	Nicola Giblin
Calibration Station Number:	PFR01
Software Revision Number:	Rev 0.1M 31-07-14

EQUIPMENT DETAILS:

Agilent E3631A:	ITE108
Agilent 34970A:	ITE088C
Wavetek 9100:	ITE122C
Ballantine 1620A:	ITE104C

This is to certify that the above named product has been fully tested and calibrated in accordance with GMC-I PROSys LTD product specification.

The instrument was operated, throughout the tests, in an ambient temperature of 23 degrees C ($\pm 2^\circ\text{C}$) unless otherwise stated.

GMC-I PROSys Ltd.

Allied Business Centre | 1 Potter Place | Skelmersdale | Lancashire | WN8 9PH | United Kingdom
 Telephone: +44 (0) 1695 567280 | Fax: +44 (0) 1695 567299
 www.i-prosys.com | sales@i-prosys.com

Registered Company Number: 5116760
 Vat Number: GB863880103

TEST RESULTS CERTIFICATE

Serial Number: P21310036859
Product Model: CP1800_4

CALIBRATION DETAILS:

PRODUCT ACCURACY DETAILS:

NOTE: Readings below are the maximum recorded values under test.

Positional Sensitivity:	0.70	%	With Respect To Centre
Repeatability Test:	0.87246	mV	Maximum Deviation
Offset:	-0.3211	mV	

LINEARITY TEST RESULTS:

Stimuli: A Frequency Of 40 Hz Used For AC Signal, Unless Otherwise Stated.

NOTE: For DC readings only, meter was nulled.

Stimuli (Amps)	Linearity Details					
	Specification (V)			Readings (V)		
	min	nom	max	DC +	DC -	AC
5	0.00445	0.005	0.00555	0.00495		
10	0.0094	0.01	0.0106		-0.01005	
50	0.049	0.05	0.051	0.0499		
500	0.4945	0.5	0.5055		-0.5013	
700	0.6925	0.7	0.7075			0.7024
1000	0.9895	1	1.0105	1.0033	-1.0026	