

Desempenho de revestimentos de Politetrafluoroetileno e Dissulfeto de Molibdênio em brocas para furação de madeira

10.35819/scientiatec.v10i1.6711

Clederson Barro¹
Alexandre Luis Gasparin²

Resumo: Este estudo mostra a performance dos revestimentos superficiais politetrafluoroetileno (PTFE) e dissulfeto de molibdênio (MoS_2) aplicado em brocas para a furação de madeira. A caracterização química dos revestimentos foi feita por espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). A avaliação da vida útil da ferramenta, através de testes de bancada, mediu o torque e potência na furação. A dureza dos corpos de prova de madeira foi verificada na escala Shore D, os filmes e substrato na escala Vickers. Metalografia determinou a microestrutura da broca e espessura de camada dos filmes. As análises foram realizadas de forma comparativa entre as amostras com PTFE, MoS_2 e sem revestimento (padrão). As brocas com PTFE em relação as padrão obtiveram reduções do torque de furação de até 35 %, reduzindo-se o gasto de potência elétrica. Já as amostras de MoS_2 obtiveram um aumento do torque de furação de até 28 % e consumo de energia de 18 % superior a padrão, deslocando-se totalmente nas arestas de corte. O torque nas amostras com PTFE foi de até 49 % menor comparadas a MoS_2 . Houve revenimento nas microestruturas de todos os substratos. Os resultados viabilizam as brocas com filmes de PTFE em detrimento ao MoS_2 .

Palavras-chave: Broca para madeira; politetrafluoroetileno; dissulfeto de molibdênio.

Abstract: This study shows the performance of polytetrafluoroethylene (PTFE) and molybdenum disulfide (MoS_2) surface coatings applied to drills for wood drilling. The chemical characterization of the coatings was performed by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The evaluation of the tool life, through bench tests, measured the torque and power during drilling. The hardness of the wood specimens was verified with Shore D scale, the films and substrate with Vickers scale. Metallography determined the microstructure of the drill and layer thickness of the films. The analyses were performed comparing the samples with PTFE, MoS_2 and without coating (standard). The drills with PTFE in relation to the standard ones obtained reductions of the drilling torque of up to 35 %, reducing the electric power consumption. The MoS_2 samples, on the other hand, obtained an increase in drilling torque of up to 28 % and energy consumption of 18 % higher than the standard, totally detaching at the cutting edges. The torque in the samples with PTFE was up to 49% lower compared to MoS_2 . There was tempering in the microstructures of all substrates. The results enable drills with PTFE films to the detriment of MoS_2 .

Keywords: Wood drill; polytetrafluoroethylene; molybdenum disulfide.

¹ Bacharel em Engenharia Mecânica pela UCS, E-mail: clederson05@gmail.com

² Doutor em Ciências do Materiais pela UFRGS, E-mail: alexandre.gasparin@caxias.ifrs.edu.br

INTRODUÇÃO

O politetrafluoroetileno (PTFE) é um material muito utilizado na fabricação de filmes antiaderentes (ABDENNADHER et al., 2023; ANDREATTA et al., 2020); 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 (CALLISTER JR., 2003). 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 (CANEVAROLO JR, 2006).

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 % (CALLISTER JR., 2020). O polímero cristalino PTFE possui alta densidade, 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 (SMITH; HASHEMI, 2012a).

Uma simulação do processo dinâmico de transferência de atrito e desgaste do PTFE quando deslizado contra o aço AISI SAE 1045 foi feita por Xie *et al*, 2019, onde uma camada de partículas foi transferida, aumentando, desse modo, a taxa de desgaste do PTFE, devido ao aumento da rugosidade da contraface (XIE; LAI; YANG, 2019). 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 (WANG; NIU, 2016).

O dissulfeto de molibdênio (MoS₂) pertence à classe de compostos lamelares com três modificações polimórficas: 2H, 3R e 1T (WYPYCH, 2002a). 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 filmes finos (WYPYCH, 2002b). No entanto, a sua baixa dureza superficial pode causar um desgaste severo no filme, apesar dos resultados positivos obtidos com o revestimento de TiMoN/a-

MoSx terem alcançado uma taxa de desgaste de 2.10^{-11} mm³/N.m e um coeficiente de atrito na ordem de 0,10 (YANG et al., 2018a).

Um estudo com a utilização de MoS₂ para a lubrificação de rolamentos mostrou uma redução do desgaste dos anéis de rolamento em até 94%, além do aumento da sua vida útil em 30 % (MARIAN et al., 2021).

Coníferas de madeira mole, branca e resinosa (PEREIRA, 2013a) 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 (RIZZINI, 1978). É amplamente usada como um substituto das madeiras nativas na construção civil, sendo capaz de suportar ambientes agressivos quando tratada em autoclave (GONZAGA, 2006). Esse material apresenta uma dureza Janka paralela às fibras de 197 kgf (PEREIRA, 2013b). Na escala de dureza Shore D, pode chegar a 49,6 Shore D à 20 °C e 62,75 Shore D à -196 °C (ÖZKAN, 2022a).

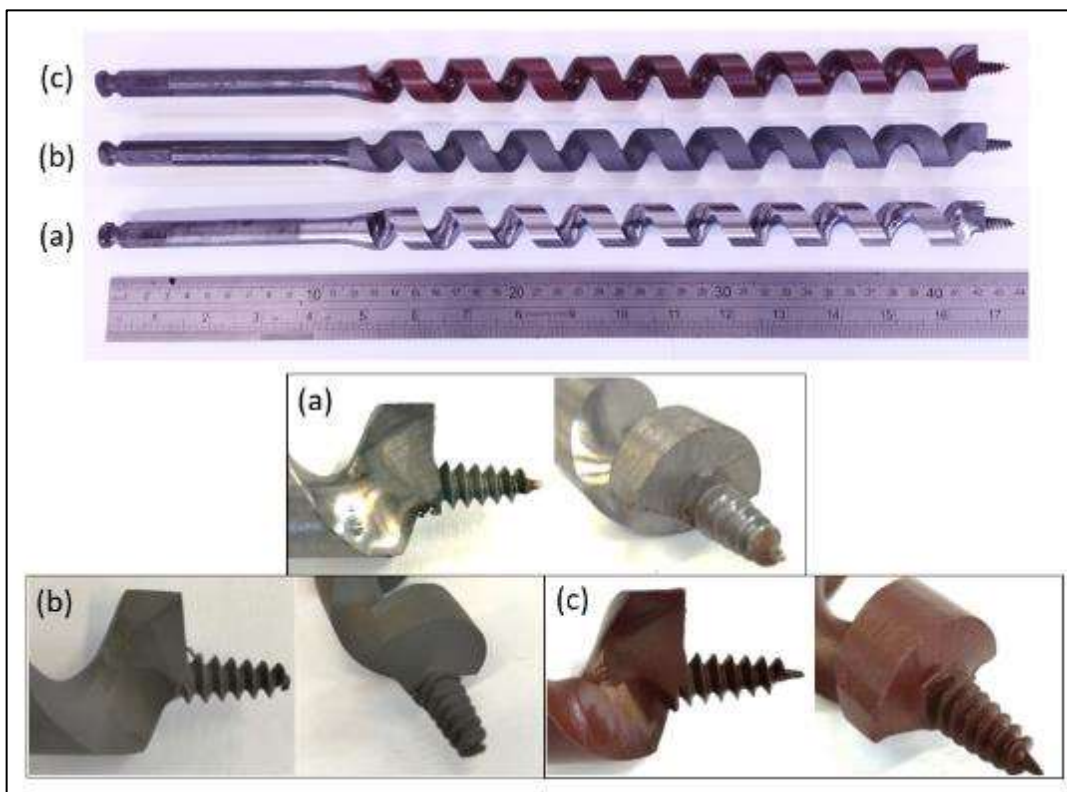
Brocas helicoidais para furação em madeira, especialmente para o tipo *Pinus elliottii*, sofrem desgastes nas arestas de corte em decorrência do atrito e esforços gerados na furação, diminuindo a vida útil da ferramenta e a sua performance. O objetivo geral deste estudo foi de executar uma análise mais detalhada com a aplicação dos revestimentos com PTFE e MoS₂ em uma broca tipo *Auger Bit* de aço AISI SAE 1060 temperado, com o objetivo de reduzir o torque de furação.

MATERIAIS

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 e revenido. Foram separadas 30 brocas, das quais 10 foram utilizadas como padrão, ou seja, brocas sem revestimento ou padrão (Figura 1a), 10 com aplicação de MoS₂ (Figura 1b) e 10 com aplicação de PTFE (Figura 1c). 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 1: (a) Broca sem revestimento (padrão); (b) Com revestimento de MoS₂; (c) Com revestimento de PTFE



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

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.

Equipamentos para teste de furação

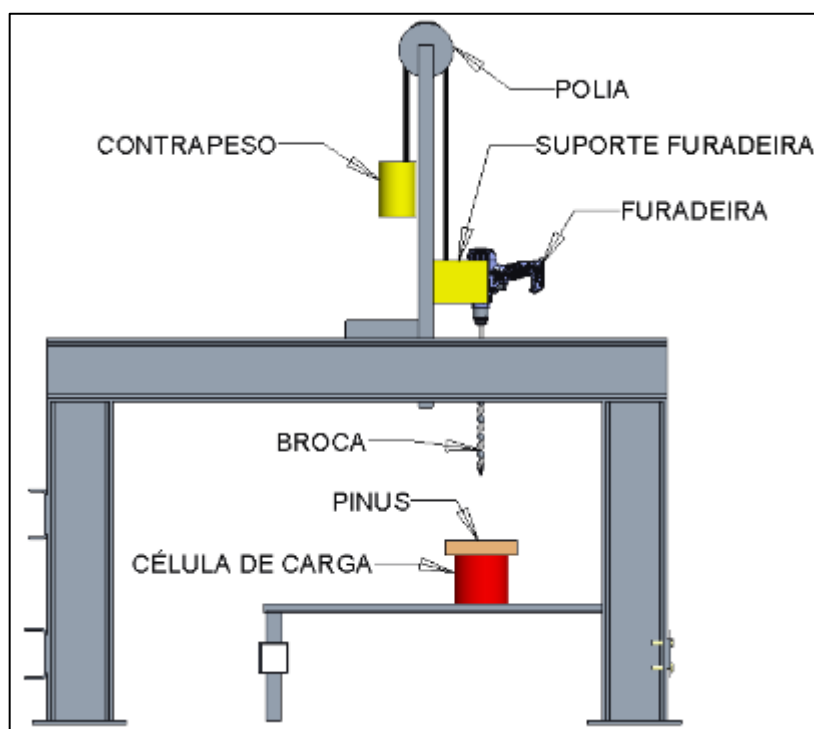
Os testes de furação foram realizados em um equipamento conforme mostra o desenho esquemático da Figura 2. A bancada de testes replica a condição de furação manual dos usuários, com parâmetros controlados como alinhamento da broca perpendicular à madeira e com aplicação de carga axial constante.

O equipamento (Figura 2) 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 2: Equipamento para teste de furação: estrutura, furadeira, célula de carga e caibros de madeira.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022

Medição de esforços de corte

A verificação dos esforços de corte foi feita com uso de uma plataforma piezoelétrica marca Kistler, modelo 9273, capacidade de trabalho nas direções F_x e F_y de -5 a 5 kN, F_z de -5 a 20 kN e M_z de -100 a 100 N.m e resoluções em F_x e F_y

de 20 mN, F_z de 20 mN e M_z de 0,02 N.cm. A plataforma foi fixa sobre o dispositivo do equipamento de testes na sua parte inferior com parafusos e o corpo de prova fixo na sua parte superior (ver Figura 3).

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 resolução de 0,7 %, no qual foi possível conectar a furadeira alimentada por bateria de 4 A e 20 V, com rotação entre 450 e 2000 rpm, torque máximo de 95 N.m e potência 820 W. Na medição da rotação da furadeira foi utilizado um sensor fotoelétrico marca Banner, modelo QS18VP6LAF com faixa de tensão de 10 a 30 V DC, com resolução de 1 rpm e sensibilidade de 1 mm. Para a medição da potência durante a furação dos corpos de prova de madeira, um amperímetro tipo alicate de 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 3: Plataforma piezoelétrica.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022

MATERIAIS E MÉTODOS

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.

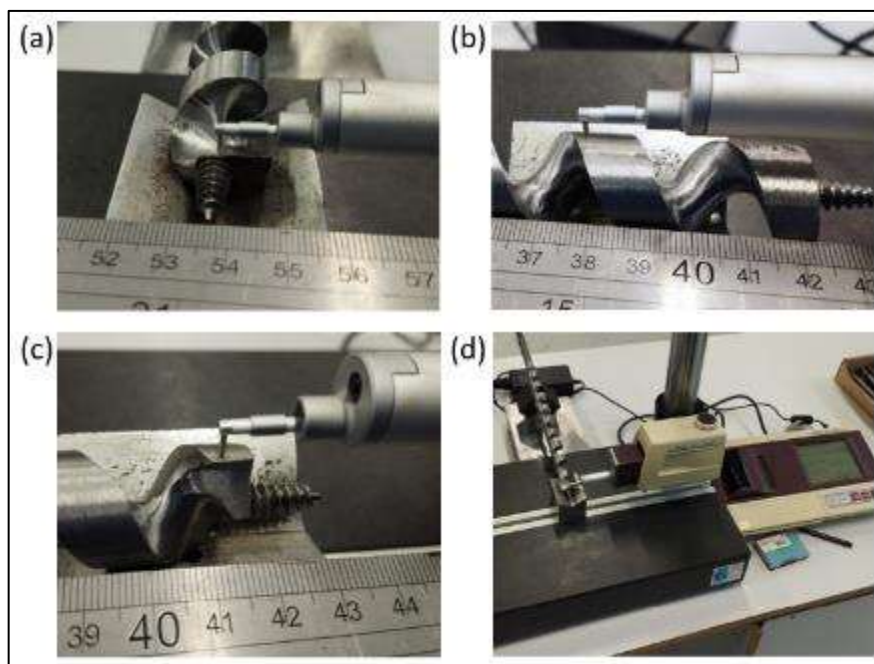
O MoS_2 utilizado foi o da marca Molykote tipo II, da fabricante Dupont, aplicado por pulverização, com uma espessura de camada entre 20 μm e 30 μm , indicado para aplicações industriais de alto desempenho.

Caracterização das brocas

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 μm 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 ataque (Figura 4a), na superfície externa do canal (Figura 4b) e na superfície do alívio radial próxima a aresta secundária de corte (Figura 4c). A Figura 4d mostra uma visão geral do sistema de medição de rugosidade utilizado.

Figura 4: Medição de rugosidade: (a) posição do ângulo de ataque da aresta de corte, (b) superfície externa do canal da broca, (c) superfície do alívio radial, (d) visão geral dos equipamentos utilizados.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Metalografia e dureza das brocas

As amostras também foram submetidas à caracterização microestrutural, de acordo com (HANDBOOK, 2004), 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 foram realizadas coletando cinco pontos em cada amostra com distância mínima entre os pontos de cinco vezes a diagonal medida na carga de 98 mN, com base na norma (ISO/ASTM E384-17, 2017). No substrato foi aplicada a mesma metodologia dos revestimentos com aplicação de carga de 9,8 N, seguindo a norma (ASTM E92-04, 1997).

Determinação dos grupos funcionais principais dos filmes

As amostras de PTFE e MoS₂ foram submetidas à análise de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier, FTIR (FT-MIR, modelo *Frontier*), da

marca Perkin Elmer, faixa de comprimento de onda de 200 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} , com resolução de 8 cm^{-1} . As análises foram realizadas sob uma superfície plana do aço da broca revestidas com PTFE e MoS_2 , área de 1 cm^2 . O ensaio foi realizado no laboratório Central de Análises da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Brasil.

Caracterização dos corpos de prova de madeira

Após a medição dimensional das amostras de madeira (Figura 3), essas foram caracterizadas em relação à dureza, através do método Shore D, de acordo com a norma (ASTM D2244-15, 2015). Utilizou-se um durômetro marca Bareiss com escala de 0 a 100 e carga de 5 kg. Foram evitadas as regiões de nós da madeira.

Ensaio de furação e aquisição de dados

Os ensaios de furação foram realizados no equipamento descrito na (Figura 2). As furações envolveram seis brocas com MoS_2 , 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 2 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.

Parâmetros de corte

Os experimentos foram realizados com avanço automático axial da furadeira sobre o bloco de madeira, com a rotação de 450 rpm e a carga axial de avanço de 117,7 N fixas. A broca foi posicionada sob o bloco de madeira com a furadeira desligada e após tocar na madeira foi acionada automaticamente até finalizar o furo. Não foi utilizado meio lubrificante nos ensaios.

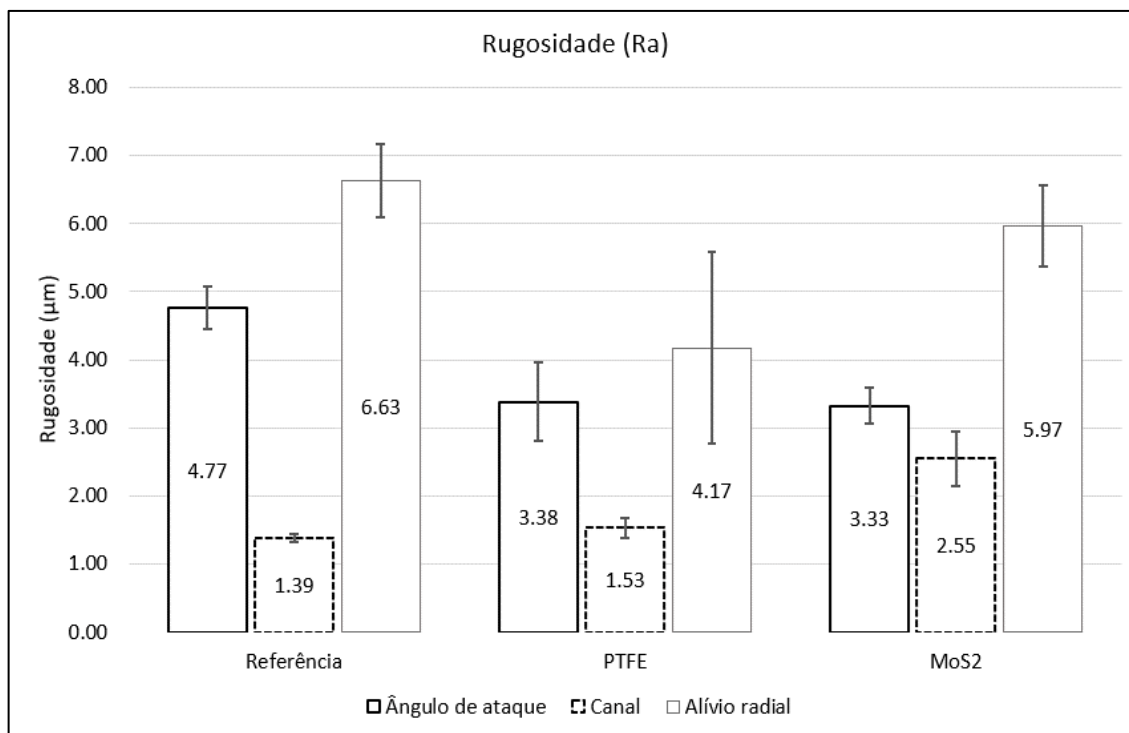
RESULTADOS E DISCUSSÕES

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 5. 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 ataque, 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 5 mostra, os revestimentos aumentaram a rugosidade na região do canal e diminuíram nas regiões do ângulo de ataque e de alívio radial. Para o filme de MoS₂ a rugosidade quase duplicou no canal em relação à amostra padrão. 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) e a 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).

Figura 5: Rugosidade superficial das brocas

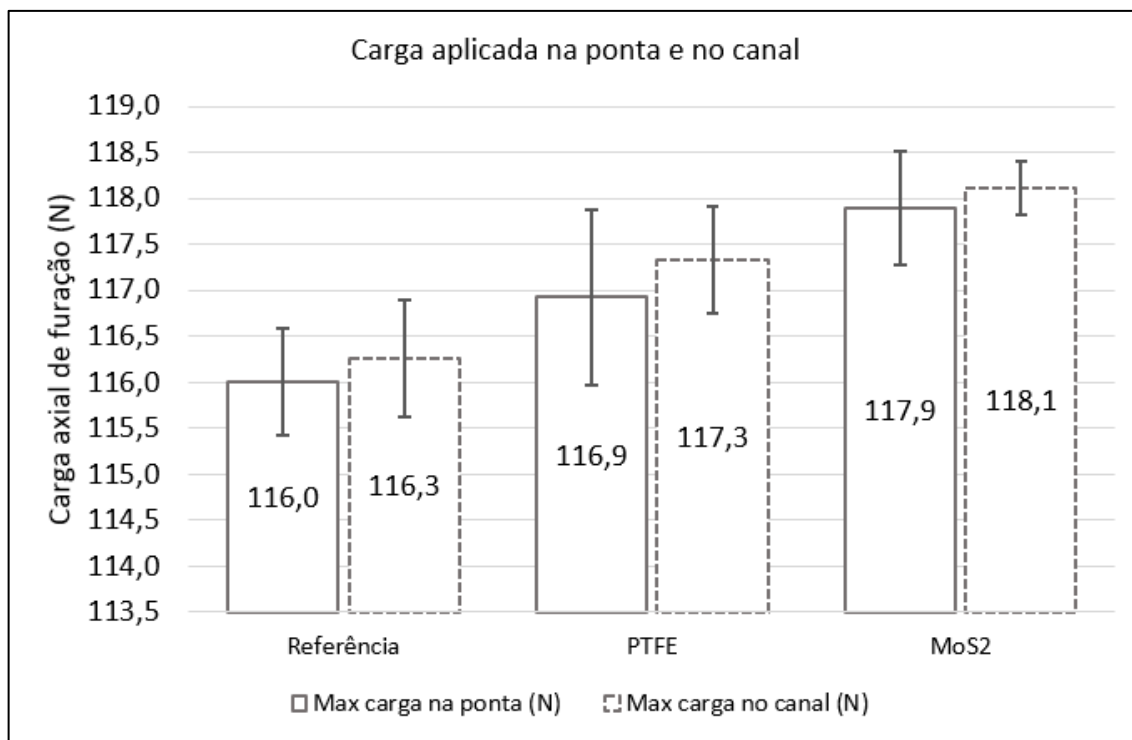


Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Avaliação da carga axial

A carga axial medida na análise não mostrou grandes diferenças na comparação entre a amostra padrão de referência e as demais condições testadas. O valor de carga configurado no equipamento foi de 117,70 N muito semelhante aos valores médios lidos entre 116,00 N e 118,1 N (Figura 6). 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 6: Esforços axiais de corte: máximas cargas na ponta e no canal



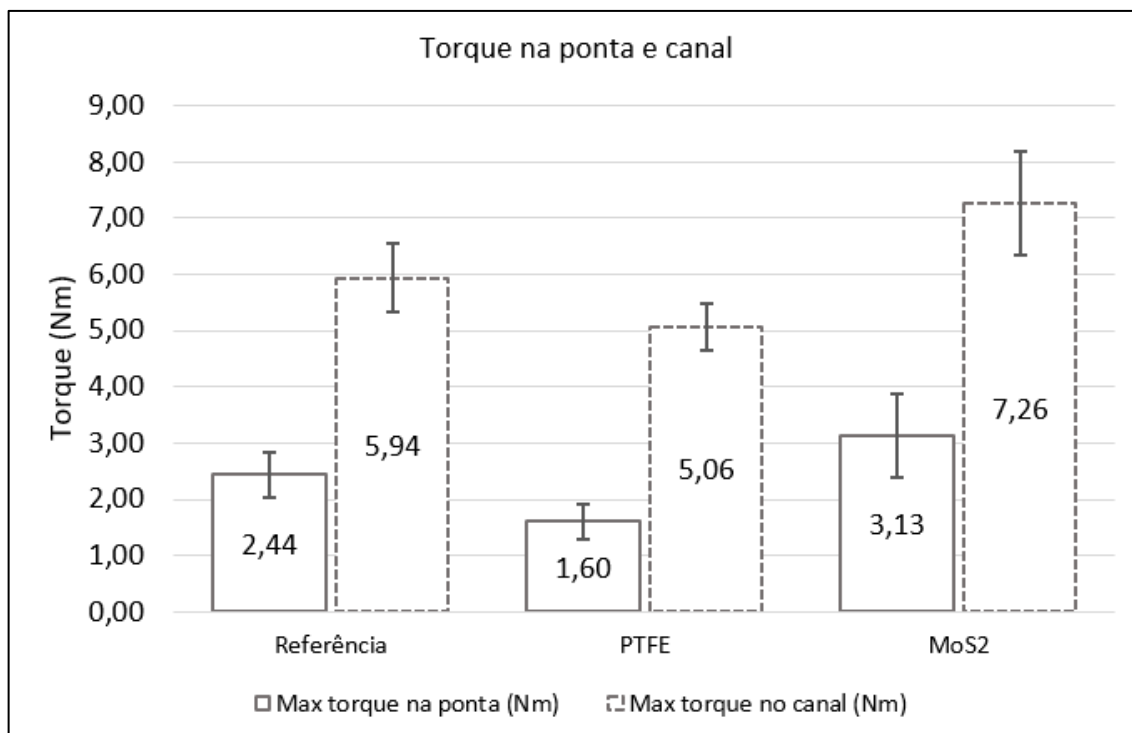
Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Medição do torque da furação

O torque verificado na ponta e no canal foram muito semelhantes entre as amostras (Figura 7). As amostras com PTFE apresentaram redução do torque na ponta de 34 % e no canal de 15 %. No entanto, para as amostras com MoS₂ observa-se um aumento do torque em 29 % 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, modificam a distribuição desse esforço ao longo da ferramenta. O torque tende a aumentar a medida que acentua-se o desgaste nas arestas de corte, conforme também encontrado por (JEONG et al., 2021).

Figura 7: Esforços de corte: Torque na ponta e no canal



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

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 (SZWAJKA; ZIELIŃSKA-SZWAJKA; TRZEPIECINSKI, 2019) e a dureza do *Pinus elliottii* está ao redor de 50 Shore D a 20°C (ÖZKAN, 2022b). 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*.

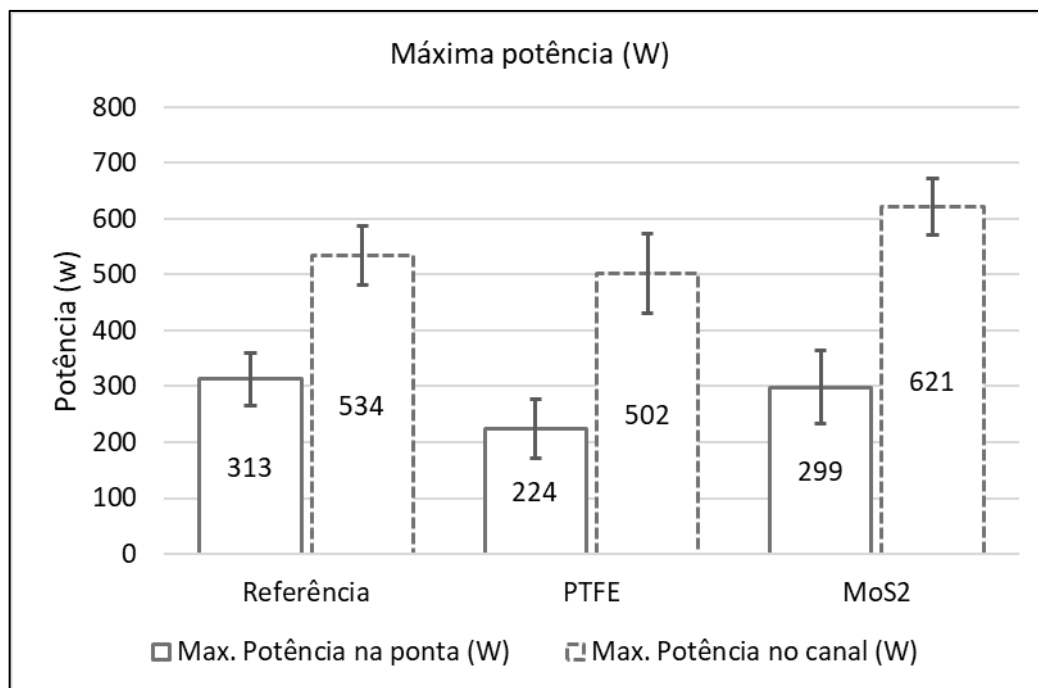
Orientação	Região	Medições (Shore D)										Média	Desvio padrão
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Normal as fibras	Sobre o veio	51	53	54	58	58	58	56	54	52	55	54,9	2,56
	Entre os veios	36	35	35	37	38	40	40	35	34	35	36,5	2,17
Paralelo as fibras	Sobre o veio	47	48	44	52	49	51	52	50	45	52	49,0	2,94
	Entre os veios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

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022

Na Figura 8 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.

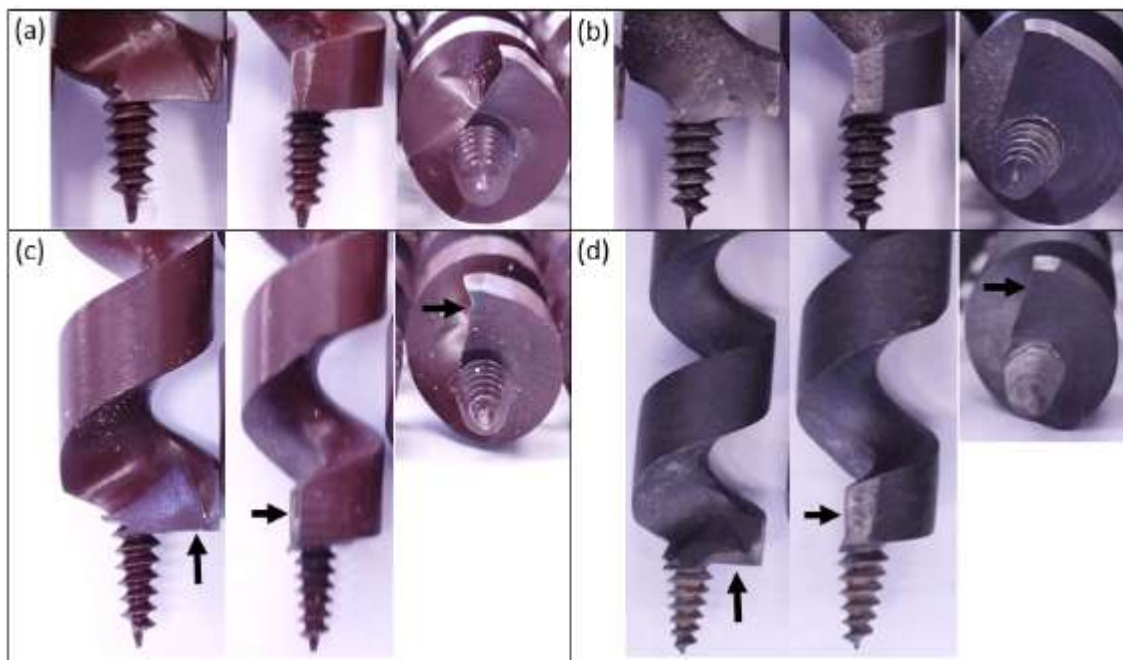
Figura 8: Consumo de potência requerida na furação



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

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 9. Nas amostras de MoS₂ observa-se uma remoção total da camada nas regiões próximas às arestas de corte, conforme indicado nas setas na Figura 9.

Figura 9: 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 pelos autores, 2022

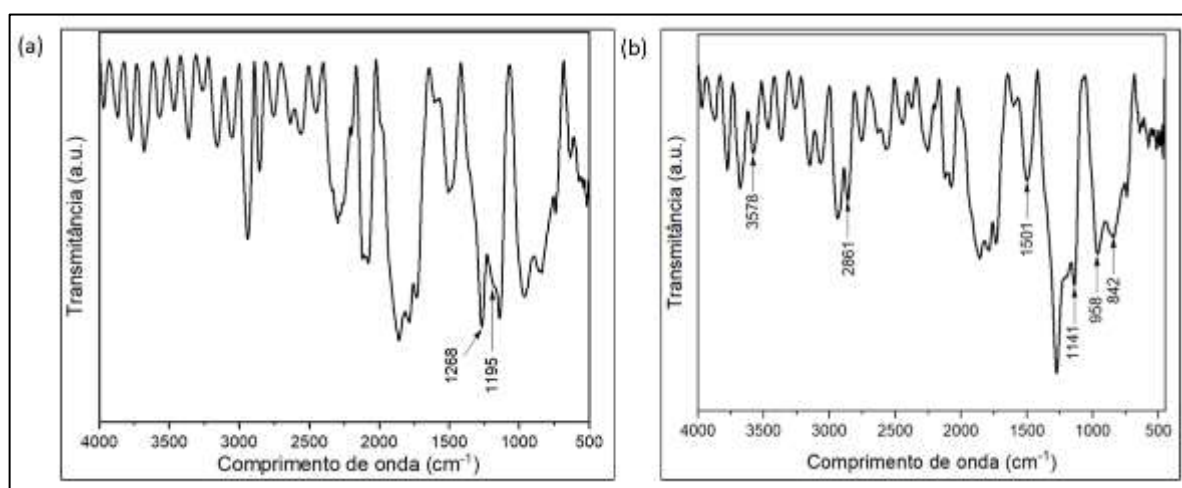
Análise de FTIR

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 10a). 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 ($\equiv\text{CF}$) (GOMES, 2018).

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 MoS_2 (Figura 10b). 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 MoS_2 , 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 MoS_2 aos grupos químicos tipo tiol (RODRIGUEZ, 2020). Além disso, nano partículas de dicalcogeneto de metal de transição MoS_2 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 MoS_2 , 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 (LALITHAMBIKA; SHANMUGAPRIYA; SRIRAM, 2019).

Figura 10: Gráficos de FTIR: (a) filme de PTFE (b) filme de MoS_2

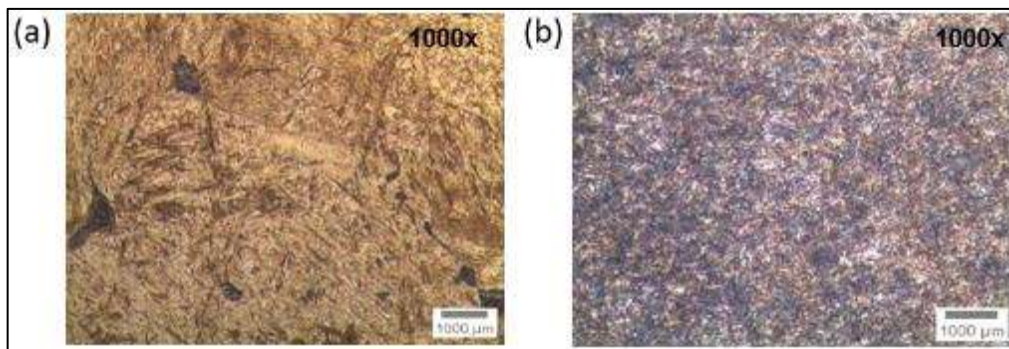


Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Análise Metalográfica

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 11a) as quais estão de acordo com (SMITH; HASHEMI, 2012b). 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 11b) em todas as regiões analisadas da peça, a qual assemelha-se a literatura nestas condições conforme (SHACKELFORD, 2008).

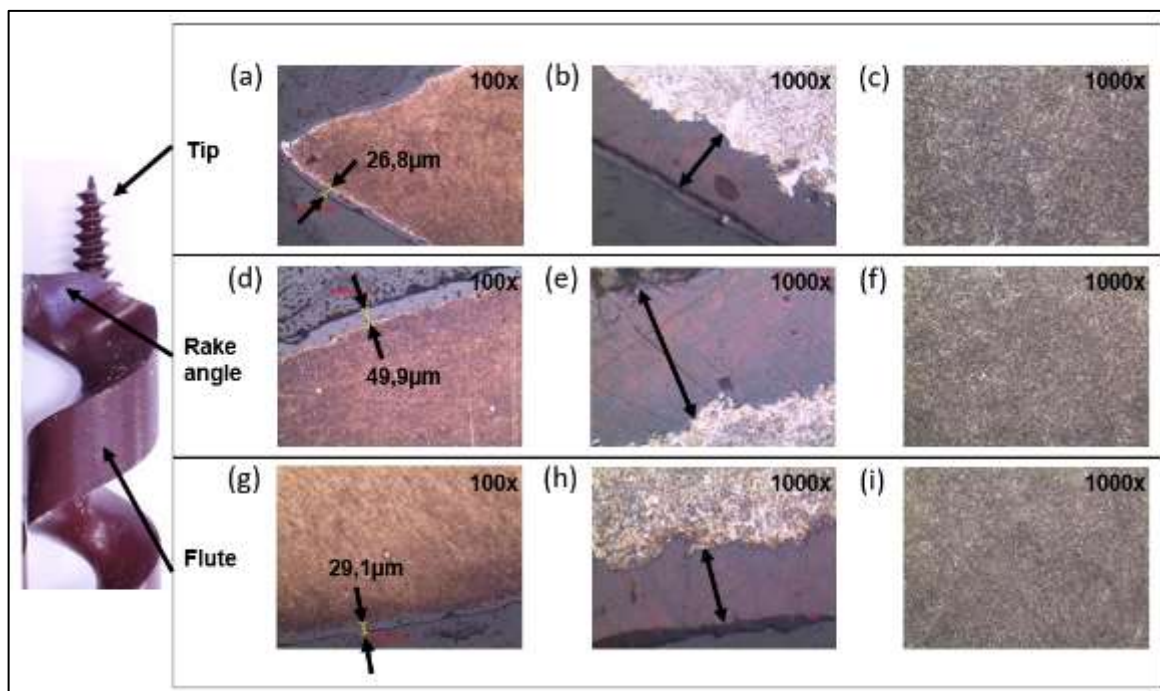
Figura 11: Microestrutura martensítica do aço da broca AISI SAE 1060: (a) condição temperado antes de aplicar os revestimentos (b) condição temperado e revenido após a aplicação dos revestimentos



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022

Análises nas regiões onde há maior solicitação mecânica durante o processo de furação mostram que nas amostras com PTFE (Figura 12) em todas as regiões o desprendimento do revestimento foi mínimo sendo visível a presença do mesmo após os testes de furação. Observa-se também que as microestruturas do substrato (Figura 12c, 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 (KATIYAR; MISRA; MONDAL, 2019).

Figura 12: Microestrutura da amostra de PTFE: (a, b, c) microestrutura e revestimento na região da ponta (d, e, f) microestrutura e revestimento no gume de corte (g, h, i) microestrutura e revestimento na região do canal

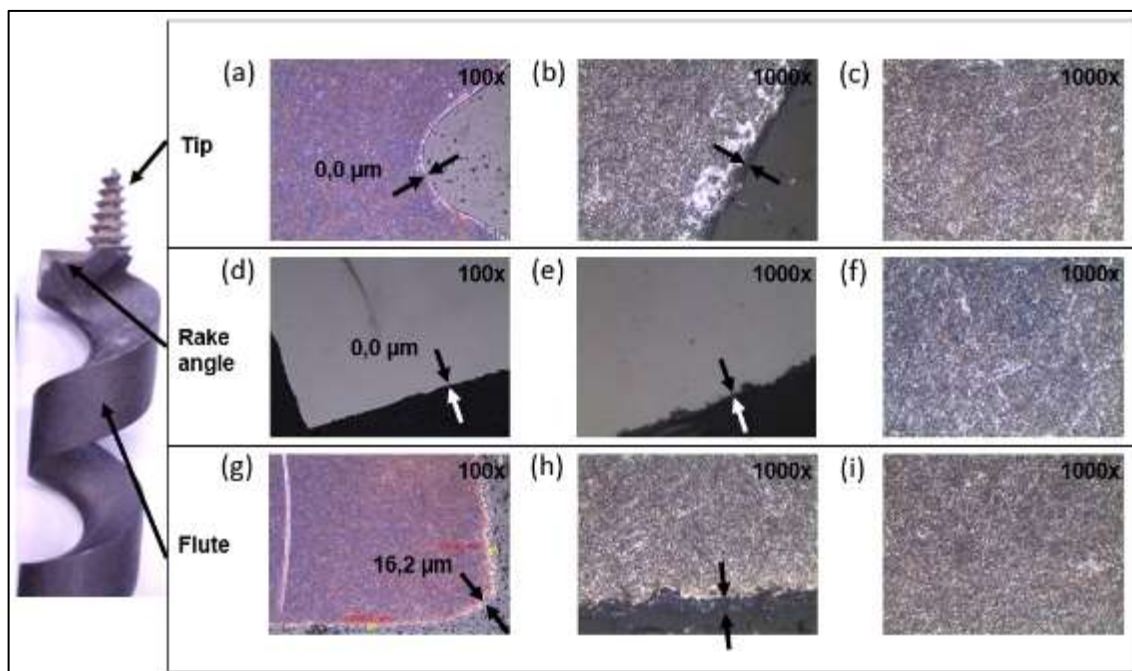


Fonte: Elaborado pelos autores, 2022

Nas amostras com MoS_2 também foi verificada uma microestrutura de martensita revenida no substrato após a aplicação dos revestimentos, tendo em vista que as amostras foram expostas a $400\text{ }^\circ\text{C}$ por 1h15min (Figura 13c, f, i).

Observa-se que houve remoção total da camada depositada na região da ponta e no gume de corte (Figura 13a, d) e (Figura 9b, d). Entretanto, na região do canal foi possível visualizar a presença de camada de revestimento (Figura 13g). 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 13: Microestrutura da amostra de MoS_2 : (a, b, c) microestrutura e revestimento na região da ponta (d, e, f) microestrutura e revestimento no gume de corte (g, h, i) microestrutura e revestimento na região do canal



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

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 (μm)	Gume de corte (μm)	Canal (μm)
PTFE	25 ± 4	50 ± 4	30 ± 4
MoS ₂	0,0	0,0	16 ± 3

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

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 as melhorias na taxa de desgaste podem estar relacionadas com o aumento da dureza (YANG et al., 2018b). 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 conforme verificado por (JEONG et al., 2021), onde o incremento de desgaste influencia no aumento do torque de furação (ver Tabela 3).

Tabela 3: Comparativo de dureza Vickers nas amostras analisadas

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

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Metodologia de testes

A metodologia de testes 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 testadas 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.

CONCLUSÕES

Após a aplicação dos revestimentos as amostras com PTFE apresentaram uma redução significativa da rugosidade nas regiões do alívio radial e do ângulo de ataque

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 ataque.

As amostras com PTFE solicitaram menor potência da furadeira em comparação com a amostra referência e com MoS₂. Esse resultado é positivo, pois pode-se relacioná-lo com a quantidade de furos que o usuário consegue fazer por carga de bateria. Os tempos de furação ficaram no mesmo nível em todas as amostras. Observou-se o nível mínimo de deslocamento da camada de revestimento, principalmente nas arestas de corte.

A espessura da camada do filme de MoS₂ ficou dentro do informado pelo fabricante em todas as regiões da peça. Houve uma leve redução da rugosidade, exceto no canal os valores foram superiores a amostra referência. Mesmo assim, apresentou rugosidades maiores que as amostras com PTFE. O aumento da rugosidade pode impactar negativamente na performance uma vez que o maior atrito tende a aumentar o aquecimento da broca dificultando a furação e acelerando os mecanismos de desgaste. As bandas encontradas por FTIR estão de acordo com os grupos funcionais do MoS₂.

Em relação à carga aplicada observa-se que houve um aumento do torque em todas as regiões das amostras de MoS₂ em relação as de referência e com PTFE. A rotação da broca durante os testes de furação permaneceu fixa.

Observou-se o deslocamento em praticamente todas as arestas de corte e na ponta das brocas de MoS₂, onde gerou um impacto negativo na performance, o que não foi observado nas de PTFE.

Espera-se que estas brocas sem aplicação de revestimentos façam pelo menos quinhentos furos em *Pinus elliottii*. Após cinquenta e cinco furos realizados nos testes as amostras de PTFE apresentaram menor torque de furação e potência consumida nas amostras com PTFE, em relação às de MoS₂.

Esses resultados podem aumentar a vida de trabalho da ferramenta. Além disso, a transformação da microestrutura de martensita temperada para martensita revenida na microestrutura das brocas após a aplicação dos revestimentos foi um ganho na tenacidade das ferramentas.

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.

REFERÊNCIAS

ABDENNADHER, M. et al. Experimental Characterization of Coated Aluminum Sheets for Deep Drawing Applications. **Lecture Notes in Mechanical Engineering**, p. 842–850, 2023.

ASTM D2244-15. ASTM D2240-15 Standard Test Methods for Rubber Property-Durometer Hardness. **Annual Book of ASTM Standards**, p. 1–13, 2015.

ANDREATTA, F. et al. Degradation of PTFE non-stick coatings for application in the food service industry. **Engineering Failure Analysis**, v. 115, n. November 2019, p. 104652, 2020.

ASTM E92-04. Standard Test Method for Vickers Hardness of Matallic Materials. American Society for Testing and Materials, 1997.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5ª ed. Rio de Janeiro: [s.n.]. v. 59

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais. Uma Introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

CANEVAROLO JR, S. V. **Ciência dos Polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2ª ed. São Paulo: [s.n.]. v. 1

GOMES, P. A. M. C. **Modificação da superfície e caracterização do Politetraflúoroetileno (PTFE) para aplicação em regeneração óssea guiada (ROG)**. Instituto Militar de Engenharia, 2018.

GONZAGA, A. L. **Madeira: Uso e Conservação**. [s.l: s.n.].

HANDBOOK, C. A. I. **ASM Metals Handbook, Volume 09 Metallography and Microstrutures Handbook**. [s.l: s.n.]. v. 9

ISO/ASTM E384-17. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. **The Biology of the Xenarthra**, p. 281–293, 2017.

JEONG, M. J. et al. Prediction of drill bit breakage using an infrared sensor. **Sensors**, v. 21, n. 8, p. 2808, 16 abr. 2021.

KATIYAR, P. K.; MISRA, S.; MONDAL, K. Comparative Corrosion Behavior of Five Microstructures (Pearlite, Bainite, Spheroidized, Martensite, and Tempered Martensite) Made from a High Carbon Steel. **Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, v. 50, n. 3, p. 1489–1501, 15 mar. 2019.

LALITHAMBIKA, K. C.; SHANMUGAPRIYA, K.; SRIRAM, S. Photocatalytic activity of MoS₂ nanoparticles: an experimental and DFT analysis. **Applied Physics A: Materials Science and Processing**, v. 125, n. 12, p. 1–8, 2019.

MARIAN, M. et al. Ti₃C₂T_x solid lubricant coatings in rolling bearings with remarkable performance beyond state-of-the-art materials. **Applied Materials Today**, v. 25, p. 101202, 2021.

ÖZKAN, O. E. Effect of freezing temperature on impact bending strength and shore-D hardness of some wood species. *BioResources*, 2022a.

ÖZKAN, O. E. Effect of freezing temperature on impact bending strength and shore-D hardness of some wood species. *BioResources*, 2022b.

PEREIRA, A. F. Madeiras brasileiras guia de combinação e substituição. 1ª ed. São Paulo: Blucher, 2013a.

PEREIRA, A. F. Madeiras brasileiras guia de combinação e substituição. 1ª ed. São Paulo: Blucher, 2013b.

RIZZINI, C. T. Árvores e Madeiras Úteis do Brasil. Manual de Dendrologia Brasileira. 2ª ed. São Paulo: Blucher, 1978.

RODRIGUEZ, C. L. C. Dissulfeto de Molibdênio (MoS₂) Bidimensional como carga para matrizes poliméricas. [s.l: s.n.].

SHACKELFORD, J. F. **Ciencia dos Materiais**. 6ª ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2008.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **FUNDAMENTOS DA ENGENHARIA E CIENCIA DOS MATERIAIS**. 5ª ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2012a.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **FUNDAMENTOS DA ENGENHARIA E CIENCIA DOS MATERIAIS**. 5ª ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2012b.

SONG, W. et al. Friction behavior of TiN–MoS₂/PTFE composite coatings in dry sliding against SiC. **Ceramics International**, v. 47, n. 17, p. 24003–24011, 1 set. 2021.

SZWAJKA, K.; ZIELIŃSKA-SZWAJKA, J.; TRZEPIECIŃSKI, T. Experimental study on drilling MDF with tools coated with TiAlN and ZrN. **Materials**, v. 12, n. 3, 2019.

WANG, S.; NIU, C. Torsional tribological behavior and torsional friction model of polytetrafluoroethylene against 1045 steel. **PLoS ONE**, v. 11, n. 1, p. 1–13, 2016.

WYPYCH, F. MOLYBDENUM DISULFIDE, A MULTIFUNCTIONAL AND REMARKABLE MATERIAL: TWELVE YEARS ON. v. 25, n. 1, p. 83–88, 2002a.

WYPYCH, F. MOLYBDENUM DISULFIDE, A MULTIFUNCTIONAL AND REMARKABLE MATERIAL: TWELVE YEARS ON. v. 25, n. 1, p. 83–88, 2002b.

XIE, T.; LAI, J.; YANG, H. Simulation of effect of counterface roughness on the friction transfer and wear of PTFE sliding against steel. **Industrial Lubrication and Tribology**, v. 71, n. 9, p. 1086–1092, 2019.

YANG, L. et al. TiMoN nano-grains embedded into thin MoS_x-based amorphous matrix: A novel structure for superhardness and ultra-low wear. **Applied Surface Science**, v. 462, n. July, p. 127–133, 2018a.

YANG, L. et al. TiMoN nano-grains embedded into thin MoS_x-based amorphous matrix: A novel structure for superhardness and ultra-low wear. **Applied Surface Science**, v. 462, n. July, p. 127–133, 2018b.