CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

LUIZA AMELIA DE MELO PEREIRA

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO CAVACO DURANTE A FURAÇÃO DA LIGA AL-MG-SI 6061-T6 UTILIZANDO FERRAMENTAS DE AÇO RÁPIDO SEM E COM REVESTIMENTO DE DLC

Orientador: Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Martins
Linha de Pesquisa: Eficiência em sistemas e Processos mecânicos

Belo Horizonte
2025

LUIZA AMELIA DE MELO PEREIRA

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO CAVACO DURANTE A FURAÇÃO DA LIGA AL-MG-SI 6061-T6 UTILIZANDO FERRAMENTAS DE AÇO RÁPIDO SEM E COM REVESTIMENTO DE DLC

Defesa de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, na área de concentração de Energia e Processos Mecânicos na Linha de Pesquisa em Eficiência em Sistemas e Processos Mecânicos, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Martins

Linha de Pesquisa: Eficiência em sistemas e Processos mecânicos

Belo Horizonte

Julho de 2025

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO CAVACO DURANTE A FURAÇÃO DA LIGA AL-MG-SI 6061-T6 UTILIZANDO FERRAMENTAS DE AÇO RÁPIDO SEM E COM REVESTIMENTO DE DLC

Defesa apresentada em 31 de julho de 2025 por Luiza Amelia de Melo Pereira, ao Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, na área de concentração Energia e Processos Mecânicos, na Linha de Materiais e Processos de Fabricação, aprovada pela banca examinadora constituída dos professores:

Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Paulo Sérgio Martins - Coorientador

Centro Universitário Una

Prof. Dr. Arthur Caron Mottin

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Gustavo Henrique Nazareno Fernandes

Universidade Federal de Goiás

Prof. Drª. Mayara Fernanda Pereira

Universidade Federal de Uberlândia

Belo Horizonte

31 de julho de 2025

Pereira, Luiza Amelia de Melo
P436e Estudo do comportamento do cavaco durante a furação da liga AL-MG-SI 6061-T6 utilizando ferramentas de aço rápido sem e com revestimento de DLC / Luiza Amelia de Melo Pereira. – 2025.
127 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
Orientador: Sandro Cardoso Santos.
Coorientador: Paulo Sérgio Martins.
Banca examinadora: Sandro Cardoso Santos, Paulo Sérgio Martins, Arthur Caron Mottin, Gustavo Henrique Nazareno Fernandes, Mayara Fernanda Pereira.
Bibliografia: f. 113-127.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

1. Ligas de alumínio – Propriedades mecânicas – Teses. 2. Metais – Corte – Teses. 3. Caracterização e avaliação de materiais – Teses. I. Santos, Sandro Cardoso. II. Martins, Paulo Sérgio. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Título.

CDD 620.112

Elaboração da ficha catalográfica pela bibliotecária Jane Marangon Duarte, CRB 6ª 1592 / Cefet/MG

No dia **31** de **julho** de **2025** às **14** horas e **00** minutos, reuniu-se por meio de videoconferência e de forma síncrona a Banca Examinadora da **Defesa de Dissertação** do Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica do CEFET-MG presidida pelo(a) Prof. Dr. **Sandro Cardoso Santos**, orientador e composta pelos examinadores Prof. Dr. **Paulo Sérgio Martins**, coorientador, Prof. Dr. **Artur Caron Mottin**, Profa. Dra. **Mayara Fernanda Pereira** e Prof. Dr. **Gustavo Henrique Nazareno Fernandes** para avaliar o trabalho intitulado **ESTUDO DA FORMAÇÃO DO CAVACO DURANTE A FURAÇÃO DA LIGA Al-Mg-Si 6061 T6 UTILIZANDO FERRAMENTAS DE AÇO RÁPIDO SEM E COM REVESTIMENTO DE DLC** apresentado pelo(a) discente **Luiza Amélia de Melo Pereira** como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Após deliberação, considerou a discente **APROVADA**.

Belo Horizonte, **31** de **julho** de **2025**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos Orientador CEFET-MG	Documento assinado digitalmente gov.br SANDRO CARDOSO SANTOS Data: 31/07/2025 17:47:04-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br
Prof. Dr. Paulo Sérgio Martins Coorientador Centro Universitário UNA - IBMEC	Documento assinado digitalmente gov.br PAULO SERGIO MARTINS Data: 01/08/2025 08:08:48-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br
Prof. Dr. Artur Caron Mottin CEFET-MG	Documento assinado digitalmente gov.br ARTUR CARON MOTTIN Data: 01/08/2025 13:20:22-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br
Profa. Dra. Mayara Fernanda Pereira UFU	Documento assinado digitalmente gov.br MAYARA FERNANDA PEREIRA Data: 01/08/2025 18:36:10-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br
Prof. Dr. Gustavo Henrique Nazareno Fernandes UFG	Documento assinado digitalmente gov.br GUSTAVO HENRIQUE NAZARENO FERNANDES Data: 01/08/2025 18:25:05-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br

Discente:

Luiza Amélia de Melo Pereira	Documento assinado digitalmente gov.br LUIZA AMELIA DE MELO PEREIRA Data: 17/10/2025 16:22:46-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dedico este trabalho a todos que contribuíram para minha formação pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à minha família, Nilza e Claudio, pela dedicação e importância que sempre tiveram perante minha educação durante todos esses anos. Além disso, ao apoio que sempre recebi durante minha trajetória acadêmica.

Ao Prof. Dr. Sandro Cardoso pela orientação e acompanhamento.

Ao Prof. Paulo Sergio por ter me acolhido desde o início e pela coorientação impecável.

Ao Elhadji Cheikh pela ajuda em todos os momentos desde o início do meu projeto de mestrado e por estar sempre disponível para ajudar e auxiliar.

Ao Jorge pela oportunidade de presenciar todo o seu projeto de mestrado e seguir nessa jornada de aprendizado juntos.

Ao Prof. José Rubens, pelo apoio, presença e dedicação na minha trajetória acadêmica desde a minha orientação no TCC da Engenharia Mecânica (PUC MG).

A Prof. Drª. Mayara Fernanda Pereira da Universidade Federal de Uberlândia pela grandiosa ajuda no desenvolvimento dos experimentos.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), pela oportunidade e fornecimento dos principais recursos necessários para a realização do projeto de mestrado.

RESUMO

As ligas da classe Al-Mg-Si 6061-T6 vêm sendo aplicadas em várias áreas da indústria metal mecânica como indústria aeronáutica, automotiva, química, petroquímica e de embalagens, pois possuem excelente relação resistência-peso, boa ductilidade, baixa densidade, excelentes condutividades térmica e elétrica e resistência à corrosão. As ligas de alumínio são muito rica, mas limitando-se a investigações que levam em conta os problemas de usinagem, principalmente àqueles relacionados com forças, temperaturas, controle e formação do cavaco, e normalmente são trabalhos pontuais, em processos específicos, geralmente em apenas uma determinada liga. A formação do cavaco influencia as demais variáveis do processo de usinagem e essa formação depende muito das propriedades do material. Neste trabalho determinou-se experimentalmente as características do cavaco com foco no grau de recalque buscando avaliar o nível de deformação do cavaco sem e com o uso de DLC, além da sua relação com a microdureza, rugosidade e desvios de forma. Os revestimentos DLC não apenas reduziram o desgaste das ferramentas, mas também melhoraram a formação dos cavacos e os parâmetros de qualidade superficial. Em relação ao grau de recalque, a análise estatística indicou que os revestimentos de DLC atuaram como um lubrificante sólido durante a usinagem a seco, favorecendo o escoamento e a expulsão dos cavacos, e consequentemente, reduzindo a deformação quando comparado aos cavacos obtidos no grupo sem revestimento (G1). Já nos parâmetros microgeométricos, os valores médios de R_a foram 1,40 ± 0,31 μm para o G1, 1,43 ± 0,15 μm para o G2 e 1,26 ± 0,17 μm para o G3 e para o parâmetro R_z foram encontrados 7,69 ± 1,67 μm para o G1, 7,95 ± 0,77 μm para o G2 e 7,26 ± 0,80 μm para o G3, indicando que o R_z não sofreu influência significativa entre os grupos diferentemente de R_a. Para a assimetria e curtose, os desvios de R_{sk} chegaram a 212% e de R_{ku} a 67%, e ambos não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre os grupos, o que pode estar relacionado à dispersão elevada dos dados.

Palavras-chave: Ligas de Alumínio, Propriedades Mecânicas, Condições de Corte, Grau de Recalque.

ABSTRACT

The Al-Mg-Si 6061-T6 alloy class has been widely applied in several areas of the metal-mechanical industry, such as the aerospace, automotive, chemical, petrochemical, and packaging sectors, due to its excellent strength-to-weight ratio, good ductility, low density, and outstanding thermal and electrical conductivity, as well as corrosion resistance. Although aluminum alloys have been extensively studied, most investigations focus on machining-related problems, particularly those involving forces, temperatures, chip control, and chip formation, and are usually limited to specific processes or a single alloy. Chip formation influences other machining process variables and strongly depends on the material's properties. In this study, the chip characteristics were experimentally determined, focusing on the compression ratio to evaluate the chip deformation level with and without the use of DLC coatings, as well as its relationship with microhardness, surface roughness, and form deviations. The DLC coatings not only reduced tool wear but also improved chip formation and surface quality parameters. Regarding the chip thickness ratio, statistical analysis indicated that the DLC coatings acted as a solid lubricant during dry machining, favoring chip flow and evacuation and consequently reducing deformation compared to the uncoated group (G1). For the microgeometric parameters, the mean Ra values were 1.40 ± 0.31 μm for G1, 1.43 ± 0.15 μm for G2, and 1.26 ± 0.17 μm for G3, while the R_z values were 7.69 ± 1.67 μm for G1, 7.95 ± 0.77 μm for G2, and 7.26 ± 0.80 μm for G3, indicating that R_z was not significantly affected among the groups, unlike Ra. For skewness and kurtosis, the R_{sk} deviations reached 212% and R_{ku} 67%, and both showed no statistically significant differences between the groups, which may be related to the high data dispersion.

Keywords: Aluminum Alloys, Mechanical Properties, Cutting Conditions, Chip thickness ratio.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Micrografia da liga Al-Mg-Si 6061-T6 26
Figura 2: Estágios do Tratamento Térmico T6 29
Figura 3: Cinemática do processo de furação 31
Figura 4: Corte ortogonal 32
Figura 5: Cavaco contínuo 34
Figura 6: Cavaco segmentado 35
Figura 7: Cavaco descontínuo 36
Figura 8: Classificação dos cavacos quanto à forma 37
Figura 9: Plano de referência de uma broca 38
Figura 10: Relação entre grau de recalque e velocidade de corte 39
Figura 11: Relação entre grau de recalque e avanço 40
Figura 12: Ilustração da microestrutura do aço rápido AISI M2 44
Figura 13: Estrutura cristalina do diamante, do carbono na forma amorfa e do grafite 46
Figura 14: Diagrama de fase ternário do Carbono 46
Figura 15: Ferramentas de corte revestidas com DLC 48
Figura 16: Parâmetros de caracterização de uma superfície 50
Figura 17: Caracterização da simetria do perfil de rugosidade 51
Figura 18: Caracterização de achatamento do perfil de rugosidade 52
Figura 19: Fluxograma do procedimento experimental do estudo 54
Figura 20: Barra de alumínio 55
Figura 21: Análise da composição química da liga Al-Mg-Si-T6 56
Figura 22: Placa de alumínio posicionada para realizar os ensaios de furação 58
Figura 23: Centro de usinagem CNC Romi Discovery 560 58
Figura 24: Montagem do relógio comparador analógico 59
Figura 25: Brocas em AISI M2 sem revestimento (A), com revestimento DLC STANDARD (B) e com revestimento DLC STAR (C) 60
Figura 26: Análise da microestrutura do aço AISI M2 61
Figura 27: Placas de aço AISI M2 sem revestimento (A), com revestimento DLC STANDARD (B) e com revestimento DLC STAR 62
Figura 28: Imagens das ferramentas de corte sem revestimento (a), com revestimento Standard (b) e com revestimento Star (c) analisadas em MEV ... 62

Figura 29: Amostras de cavacos separados por grupos G1, G2 e G3.....64
Figura 30: Amostras coletadas dos três grupos de cavaco para análise da forma 65
Figura 31: Corte longitudinal para análise do tipo do cavaco 65
Figura 32: Corte na seção transversal do cavaco.....66
Figura 33: Indentações na seção transversal do cavaco para avaliar microdureza 68
Figura 34: Vestígios de revestimento no cavaco 69
Figura 35: Equipamento utilizado para análises por espectroscopia Raman....69
Figura 36: Rugosímetro utilizado nas análises dos parâmetros de superfície ..70
Figura 37: Equipamento utilizado para mensurar os desvios de cilindricidade e diâmetro.....72
Figura 38: Representação das medições dos desvios a partir dos furos e colunas 73
Figura 39: Micrografia da seção transversal das amostras de cavacos dos grupos G1 (a), G2 (b) e G3 (c).....76
Figura 40: Formato dos cavacos dos grupos G1(a), G2 (b) G3 (c).....77
Figura 41: Varreduras realizadas por espectroscopia Raman na amostra do G1 78
Figura 42: Deconvoluções gaussianas realizadas nos espectros Raman dos revestimentos de DLC Tipo A (a) e Tipo B (b) 79
Figura 43: Espectros da análise Raman do G1 80
Figura 44: Varreduras realizadas por espectroscopia Raman nas amostras do G2 (a) e G3 (b).....81
Figura 45: Gráficos da análise Raman do G2 (a) e G3 (b) 82
Figura 46: Ilustração dos valores de espessura obtidos na seção transversal das amostras de cavacos dos grupos G1(a), G2 (b) G3 (c) 83
Figura 47: Ilustração do comportamento da espessura média dos cavacos ao longo da usinagem das peças dos grupos G1 (a), G2 (b) e G3 (c).....84
Figura 48: Gráfico dos valores de Grau de recalque dos grupos G1, G2 e G3 86
Figura 49: Valores de representativos da microdureza dos cavacos obtidos nos grupos G1, G2 e G3.....89
Figura 50: Média dos valores de R_a dos grupos G1 (a), G2 (b) e G3 (c) em cada peça usinada.....92

Figura 51: Média dos valores de R_z dos grupos G1 (a), G2 (b) e G3 (c) em cada peça usinada.....94
Figura 52: Média dos valores de R_{ku} dos grupos G1 (a), G2 (b) e G3 (c).....95
Figura 53: Média dos valores de R_{sk} dos grupos G1 (a), G2 (b) e G3 (c).....97
Figura 54: Gráfico box-plot dos resultados de R_a (a), R_z (b), R_{ku} (c) e R_{sk} (d) 100
Figura 55: Valores de diâmetro dos grupos G1, G2 e G3.....104
Figura 56: Valores de cilindricidade dos grupos G1, G2 e G3 106
Figura 57: Gráfico box-plot dos resultados dos desvios de diâmetro e cilindricidade 108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades físicas do Alumínio, Aço e Cobre. 24
Tabela 2: Classificação das ligas quanto ao seu elemento principal 25
Tabela 3: Propriedades mecânicas da liga Al-Mg-Si 6061-T6 26
Tabela 4: Nomenclatura de acordo com os tratamentos térmicos 28
Tabela 5: Plano experimental para realização dos ensaios de usinagem 57
Tabela 6: Composição química do Aço Rápido AISI M2 60
Tabela 7: Configurações do rugosímetro 70
Tabela 8: Resultados da estatística descritiva e teste de normalidade 86
Tabela 9: Resultados da estatística inferencial paramétrico 87
Tabela 10: Teste Post Hoc de Tukey HSD 88
Tabela 11: Resultados da estatística descritiva e do teste de normalidade obtidos na análise de microdureza dos cavacos 89
Tabela 12: Resultado estatístico inferencial não paramétrico obtidos na análise de microdureza dos cavacos 90
Tabela 13: Resultados da estatística descritiva dos parâmetros de rugosidade 91
Tabela 14: Resultados da estatística inferencial Kruskal-Wallis dos parâmetros de rugosidade 99
Tabela 15: Resultados do teste Post hoc 2-tailed em função de R_a 101
Tabela 16: Resultados do teste Post hoc 2-tailed em função de R_z 101
Tabela 17: Resultados da estatística descritiva e teste de normalidade dos desvios 103
Tabela 18: Resultados da estatística inferencial Kruskal-Wallis dos desvios 107
Tabela 19: Resultados do teste Post hoc 2-tailed em função do diâmetro 109
Tabela 20: Resultados do teste Post hoc 2-tailed em função da cilindricidade 109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	Instituto Americano de Ferro e Aço *(American Iron and Steel Institute)*
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CVD	Deposição Química à Vapor *(Chemical Vapor Deposition)*
DLC	Carbono tipo diamante (*Diamond-Like Carbon*)
HSC	Usinagem em altas velocidades de corte ou HSM (*High Speed Cutting*)
HSM	Usinagem em altas velocidades de corte ou HSM (*High Speed Machining*)
NBR	Norma Brasileira
PVD	Deposição Física à Vapor *(Physical Vapor Deposition)*
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas

LISTA DE SIMBOLOS

µm	Micrômetro	10-6 mm
µN	Micronewton	10^{-6} N
Å	Angström	10^{-10} mm
Ac	Área de contato	
Al	Alumínio	
Al_2O_3	Alumina	
Al-Mg	Liga Alumínio-Magnésio	
Al-Mg-Si	Liga Alumínio-Magnésio-Silício	
Al-Zn	Liga Alumínio-Zinco	
C	Carbono	
C - sp^2	Ligação entre átomos de carbono em configuração de grafite, sp2	
C - sp^3	Ligação entre átomos de carbono em configuração de diamante, sp3	
Co	Cobalto	
Cr	Cromo	
CrN	Nitreto de cromo	
Cu	Cobre	
E	Módulo de Elasticidade	
E*eff*	Módulo de elasticidade efetivo	GPa
Fe	Ferro	
GPa	Giga Pascal	10^9 Pa
H	Profundidade do indentador	
HV	Dureza Vickers	
Hc	Profundidade de contato	
h_c	Profundidade de penetração	
H*f*	Profundidade residual	
HO-P	Dureza de nanoindentação	GPa
M	Parâmetro de ajuste 2	
Mg	Magnésio	
Mn	Manganês	

Mo	Molibdênio	
MoS_2	Bissulfeto de molibdênio	
MPa	Mega Pascal	10^6 Pa
Nb	Nióbio	
Ni	Níquel	
Nm	Nanometro	10^{-9} mm
P	Carga	mN
p_0	pressão de Hertz	
p	Pressão de contato	
Pmax	Carga máxima do ensaio	mN
R_a	Parâmetro bidimensional de média aritmética	µm
R_t	Parâmetro bidimensional rugosidade total	µm
R_z	Parâmetro bidimensional de altura máxima média	µm
S	Segundos	
S	Rigidez no descarregamento	
Si	Silício	
SiC	Carbeto de silício	
SiO_2	Oxido de silício	
sp^2	Hibridização 2 do carbono	
sp^3	Hibridização 3 do carbono	
ta-C	Carbono amorfo tetraédrico	
ta-C:H	Carbono amorfo tetraédrico hidrogenado	
Ti	Titânio	
TiAlN	Nitreto de alumínio titânio	
TiCN	Carbonitreto de titânio	
TiN	Nitreto de titânio	
V	Vanádio	
W	Tungstênio	
WC	Carboneto de tungstênio	
WC/C	Carboneto de tungstênio com carbono amorfo a-C	

Zn	Zinco
ZrN	Nitreto de zircônio

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 18

1.1. Justificativa 20

1.2. Objetivo Geral 21

1.3. Objetivos Específicos 21

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 23

2.1. Alumínio e suas ligas 23

2.1.1. Liga Al-Mg-Si 6061-T6 24

1.1.1. Tratamento térmico T6 27

2.2. Processo de furação 30

2.2.1. A formação do cavaco 32

2.2.2. Manufatura verde 40

2.2.3. Aços rápidos para ferramentas de corte 42

2.3. Revestimento de DLC 45

2.4. Parâmetros de caracterização da textura superficial 49

3. METODOLOGIA 54

3.1. Materiais utilizados nos experimentos 54

3.1.1. Preparação dos corpos de prova 55

3.2. Ensaios de furação com broca com e sem filme DLC 56

3.2.1. Ferramentas de corte 59

3.2.2. Revestimentos de DLC 61

3.3. Análises dos Cavacos 63

3.3.1. Morfologia e tipo do cavaco 64

3.3.2. Grau de recalque 66

3.3.3. Microdureza do cavaco 67

3.3.4. Presença de DLC na superfície do cavaco 68

3.4. Textura superficial e desvios de forma 70

3.4.1. Assimetria e Curtose (R_{sk}), (R_{ku}), (R_a) e (R_z) 70

3.4.2. Desvio de cilindricidade e diâmetro 71

3.5. Análise estatística 74

4. RESULTADOS 75

4.1. Análises do cavaco 75

4.1.1. Tipo do cavaco 75

4.1.2. Forma do cavaco 77

4.1.3. Presença de DLC na superfície do cavaco 78

4.1.4. Grau de recalque 82

4.1.5. Microdureza das amostras de cavacos 88

4.2. Parâmetros de superfície e desvios de forma 91

4.2.1. Rugosidade dos furos usinados 91

4.2.2. Desvios de cilindricidade e diâmetro 102

5. CONCLUSÃO 110

REFERÊNCIAS 113

1. INTRODUÇÃO

O alumínio é o terceiro metal mais abundante na crosta terrestre e em sua forma natural é combinado com oxigênio e outros elementos. Uma referência do crescimento da produção de alumínio é a sua aplicação na indústria automotiva em que apresenta um crescimento de oito vezes a quantidade de alumínio utilizada por veículos. O alumínio primário é produzido por eletrólise de óxido de alumínio (alumina) a uma faixa de temperatura de 950 °C até 980 °C e as ligas podem ser formadas através da reação com elementos químicos como cobre, zinco, manganês, silício, magnésio e ferro para dar ao alumínio primário novas propriedades mecânicas (ABAL, 2020).

As ligas das séries 2xxx, 7xxx e 6xxx são utilizadas na maior parte das atividades de usinagem nas indústrias aeroespacial e automotiva. Sua principal vantagem é a elevada relação resistência-peso, o que permite substituir com eficiência o aço e o ferro fundido na fabricação de peças. Além disso, o menor peso dessas ligas contribui significativamente para reduzir o impacto ambiental causado pelo consumo de energia (SANTOS et al., 2016).

A versatilidade do alumínio é notável, tornando-o um material amplamente utilizado na engenharia, arquitetura e indústria. Uma de suas características distintivas é a autoproteção contra a corrosão, devido à formação de uma fina e invisível camada de óxido em sua superfície. Essa camada atua como uma barreira, prevenindo oxidações futuras do metal. Além disso, o alumínio se destaca por sua alta condutividade elétrica, atingindo 62% da IACS (International Annealed Copper Standard). Quando combinada com sua baixa densidade, essa propriedade permite que condutores de alumínio transmitam a mesma quantidade de corrente que condutores de cobre, mas com a vantagem de serem duas vezes mais leves e consideravelmente mais econômicos. O fato de ser reciclável é uma das principais vantagens do alumínio. (Blanco et al., 2020).

Dentre os diversos processos de remoção de material, a furação é o processo de remoção de metal mais importante em comparação com outros processos de usinagem tradicionais (GARG, 2015). A furação é um processo de usinagem por remoção de cavaco muito utilizado na indústria, em que se produz furo circular na peça por meio de uma ferramenta denominada broca. É um processo amplamente utilizado e de considerável importância econômica, pois geralmente está associado

às etapas finais, na fabricação de componentes mecânicos (KUMAR et al., 2020). Estimativas do início dos anos 2000 afirmavam que ela seria responsável por mais de 30 % das operações de usinagem e por cerca de 40 % das operações nos setores automotivo e aeroespacial (MARTINS, 2016).

Por ser tratar de um processo de alta complexidade, a furação pode envolver vários fenômenos como: deformação plástica, fratura, impacto, desgaste, dentre outros. Além desses, também estão presentes a geração de calor e as elevadas temperaturas de corte. É por meio do controle desses fenômenos que se faz possível evitar acontecimentos indesejáveis como o desgaste precoce da geometria de corte da ferramenta e suas consequências como a inexatidão dimensional dos furos, além de danos ao acabamento superficial (MARTINS, 2016).

No processo de furação em ligas de alumínio, a usinagem a seco tem mostrado uma tendência para tornar a manufatura mais sustentável, ou seja, com menores impactos ambientais. Ao mesmo tempo, as funções realizadas pelo fluido como lubrificação, refrigeração e transporte de cavacos, são inexistentes ou diminuídas, gerando um maior atrito e provocando o aumento da temperatura na região (CHETAN et al., 2015).

Na furação de ligas de alumínio a seco, a falta de um meio que favoreça o transporte e a expulsão dos cavacos colabora ainda mais para o aquecimento da região, além de favorecer a adesão de material à ferramenta. A tecnologia dos revestimentos é uma alternativa que pode melhorar o desempenho das ferramentas de corte nas condições de usinagem a seco, pois são capazes de impedir o aumento das temperaturas proveniente do atrito e amenizar o desgaste. (RIBEIRO FILHO et al., 2017; PAKTINAT e AMINI, 2018).

O carbono semelhante ao diamante (DLC – *Diamond-Like Carbon*) é uma forma metaestável do carbono amorfo que combina as propriedades do diamante e do grafite. O DLC vem sendo estudado há algumas décadas, destacando-se em diversas aplicações e tem mostrado desempenho satisfatório na usinagem a seco de ligas de alumínio devido à sua capacidade de autolubrificação, associada a propriedades como elevada dureza, que pode variar entre 15 e 30 GPa, baixo coeficiente de atrito na ordem de 0,05 a 0,2, e resistência superior ao desgaste abrasivo e à corrosão, suportando condições de contato severas típicas da usinagem sem necessidade de fluidos de corte. Além disso, apresenta alta condutividade térmica, em torno de 2 a 10 W/m·K, o que favorece a dissipação de calor na interface ferramenta–peça, e inércia

química frente às ligas de alumínio, reduzindo a tendência de adesão e formação de aresta postiça (SALAH et al., 2016; KOVACI et al., 2018; KUMAR, Ch. et al., 2020; BARBOSA, 2022).

A partir do processo de furação da liga Al-Mg-Si 6061-T6 com ferramentas de aço rápido com e sem revestimento de DLC é possível investigar o comportamento do cavaco durante os experimentos. Dentre os parâmetros relativos ao cavaco, o grau de recalque é um dos mais importantes para representar a usinabilidade do material.

O grau de recalque determina o grau de deformação existente onde um grau de recalque elevado significa que o cavaco sofreu grandes deformações no plano de cisalhamento primário, devido à restrição sofrida para escorregar no plano de cisalhamento secundário e gerando consequentemente um aumento da espessura do cavaco (MACHADO et al., 2011). A ductilidade elevada do alumínio promove cavacos contínuos, geralmente na forma de fita longa, sendo que o controle desses cavacos pode se tornar o principal problema na usinagem das ligas de alumínio (DEMIR; GUNDUZ, 2008). Quando o material é muito dúctil, tende-se a se deformar mais antes de romper, produzindo assim cavacos contínuos, espessos e difíceis de serem quebrados. Esses cavacos contínuos, na forma de fitas longas podem se emaranhar na peça e prejudicar sua qualidade superficial (KELLY; COTTERELL, 2002). A geometria da ferramenta, as condições de corte e o tipo de revestimento e propriedades mecânicas exercem grandes influências no processo de formação do cavaco na usinagem das ligas de alumínio (MACHADO et al., 2011).

1.1. Justificativa

O presente trabalho é motivado pela constante evolução dos processos de fabricação e dos materiais e parâmetros utilizados no cenário Industrial. A furação de ligas de alumínio, essencial na indústria, enfrenta desafios como desgaste de ferramenta e controle de cavacos.

A técnica padrão-ouro utilizada industrialmente para lubri-refrigeração são os fluidos de corte. Contudo, estes apresentam sérios problemas de cunho ambiental, social e econômico, impactando negativamente a sustentabilidade. Uma solução é a usinagem a seco, mas para que a mesma possa ser utilizada, é importante a utilização de revestimentos. A usinagem a seco, embora ainda seja um conceito em termos de aplicação industrial ainda longe de ser executado em sua totalidade, é de suma

importância a pesquisa e os avanços nos estudos desse método para a manufatura. Nesse caso, nenhum tipo de fluido de corte é utilizado e é considerado um método sustentável ambientalmente. Revestimentos como os DLC prometem mitigar problemas com as ferramentas, aprimorando o controle de cavaco.

Este trabalho se justifica pela necessidade de investigar como o DLC influencia especificamente a formação e o grau de recalque do cavaco na furação da liga 6061-T6. O objetivo é otimizar o processo, promover a manufatura sustentável e preencher uma lacuna de conhecimento crucial para o avanço da tecnologia de usinagem.

A partir dessas pesquisas, o estudo do cavaco gerado é relativamente mais complexo do que o estudo das demais variáveis como a rugosidade, já que é muito mais utilizada e não temos a mesma proporção de artigos que falam sobre o tema. Esse trabalho busca aprofundar essa variável de resposta ainda pouca estudada, buscando uma metodologia de análise do cavaco que possa gerar resultados mais robustos.

Portanto, o tema discutido nesse trabalho se torna justificável devido ao seu comprometimento na busca de respostas dos parâmetros de usinagem a partir das análises dos cavacos, de forma a interpretar e discutir os resultados encontrados.

1.2. Objetivo Geral

Investigar o processo de furação da liga de alumínio Al-Mg-Si 6061-T6 com brocas de aço rápido AISI M2 com e sem revestimento de DLC, avaliando como variáveis de resposta a caracterização do cavaco, o grau de recalque e a rugosidade e os desvios dos furos usinados.

1.3. Objetivos Específicos

Tendo em vista o objetivo geral do trabalho, foram elaborados os seguintes objetivos específicos:

1 Coletar, preparar e analisar amostras de cavacos para a caracterização do tipo, forma e espessura da seção transversal;
2 Calcular o grau de recalque do cavaco ao longo dos experimentos e analisar possíveis alterações em função da presença dos revestimentos de DLC;
3 Medir a microdureza na região do cavaco ao longo do experimento;

4 Investigar o comportamento da presença do DLC na superfície do cavaco pela técnica Raman;

5 Mensurar os parâmetros de assimetria (R_{sk}) e curtose (R_{ku}) e os desvios de forma (cilindricidade) e de dimensão (diâmetro) nos furos usinados e investigar a correlação existente com a formação de cavaco.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Alumínio e suas ligas

O Alumínio é o terceiro elemento metálico mais abundante na terra, tornou-se um concorrente econômico em aplicações de engenharia recentemente no final do século XIX (ABAL, 2020). É um metal não ferroso, de estrutura cúbica de face centrada (CFC), dúctil, temperatura de fusão de aproximadamente 660 °C e apresenta relativamente boa usinabilidade quando comparado aos metais ferrosos. É utilizado geralmente em situações em que a redução de peso e resistência à corrosão são fatores importantes, principalmente nas indústrias automotiva e aeroespacial. Além disso, o alumínio hoje é uma das principais ligas metálicas em que a dureza e resistências se aproximam à do aço carbono (JR et al., 2016; ANNIGERI et al., 2016)

A densidade do alumínio (da ordem de 2,7 g/cm³) é aproximadamente um terço da densidade do aço. Essa propriedade oferece uma série de vantagens em termos de desempenho, eficiência, custo e facilidade de fabricação em uma variedade de aplicações industriais e comerciais. Outra característica de destaque do alumínio é a sua facilidade de ser reciclado sem que sejam alteradas suas propriedades físicas e químicas e através de um processo que utiliza apenas 5 % da energia que é utilizada em sua produção. Na Tabela 1 é apresentado uma comparação das características dos três metais mais utilizados pela sociedade contemporânea (ABAL, 2020).

As ligas de alumínio são compostas principalmente de alumínio e outros elementos, como cobre, magnésio, silício, zinco, entre outros. Esses elementos adicionados alteram as propriedades do alumínio para atender a requisitos específicos de aplicação. As ligas podem ser divididas em várias categorias principais com base na composição e nas propriedades resultantes de acordo com a norma ABNT 6834 (ABNT NBR 6834, 2006).

Tabela 1: Propriedades físicas do Alumínio, Aço e Cobre.

Propriedades físicas típicas	Alumínio	Aço	Cobre
Densidade (g/cm³)	2,70	7,86	8,96
Temperatura de fusão (ºC)	660	1500	1083
Módulo de elasticidade (MPa)	70000	205000	110000
Coeficiente de dilatação térmica (L/ºC)	23×10^{-6}	$11,7 \times 10^{-6}$	$16,5 \times 10^{-6}$
Condutibilidade térmica a 25ºC W/(m·K)	237	51	401
Condutibilidade elétrica (% IACS)	61	14,5	100

Fonte: SANTOS et. al (2016).

As propriedades mecânicas das ligas de alumínio, particularmente a dureza e a resistência, são marcadamente melhoradas pela precipitação dos elementos em ligas de alumínio tratáveis termicamente e pelo endurecimento em ligas mecanicamente trabalháveis. Lee et al. (2005) afirmam que a liga de alumínio 6061, uma liga típica de Al-Mg-Si (alumínio-magnésio-silício), é uma liga de endurecimento por envelhecimento que pode ser sensivelmente reforçada por tratamento térmico. As ligas de alumínio das séries 2XXX, 6XXX e 7XXX se destacam no grupo das ligas tratáveis termicamente (SANTOS Jr. et al., 2016).

2.1.1. Liga Al-Mg-Si 6061-T6

No que se refere à sequência da liga e sua classificação, o primeiro dígito apresenta o elemento de liga principal na composição. O segundo indica uma modificação específica na liga. Já o terceiro e o quarto dígitos são números aleatórios

usados para indicar ligas específicas da série, conforme apresentado na Tabela 2 (THE ALUMINIUM ASSOCIATION, 2015).

Tabela 2: Classificação das ligas quanto ao seu elemento principal

Série	Principais elementos de liga
1XXX	Alumínio (Al) ≥ 99,0%
2XXX	Cobre (Cu)
3XXX	Manganês (Mn)
4XXX	Silício (Si)
5XXX	Magnésio (Mg)
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco
8XXX	Outros elementos

Fonte: Adaptado de THE ALUMINIUM ASSOCIATION (2015).

O grupo 6XXX contém magnésio e silício como principais elementos de adição. Essas ligas multifásicas pertencem ao grupo das ligas comerciais de alumínio, nas quais o volume relativo, a composição química e a morfologia dos constituintes estruturais exercem influência significativa em suas propriedades úteis (POLMEAR, 2006).

A liga Al-Mg-Si 6061-T6 é uma das ligas de alumínio mais comumente usadas para fins gerais. Contém silício e magnésio como principais elementos de liga e apresenta boas características mecânicas como resistência, usinabilidade além de boa soldabilidade e não é tradicionalmente fundida devido ao baixo teor de silício que afeta sua fluidez. Essa liga é utilizada para a construção de estruturas de aeronaves, como asas, devido à sua resistência e capacidade de resistência à corrosão. É utilizada também na construção de peças automotivas e de embarcações, e na construção de tanques e na produção de latas para embalagens de bebidas e alimentos (SAMUEL et al., 2021). As propriedades mecânicas da liga de alumínio 6061 são apresentadas na Tabela 3.

A composição química da liga de alumínio 6061 (em % peso) é, aproximadamente, 98,08 de alumínio, 0,51 de magnésio e 0,63 de silício. O magnésio e o silício melhoram a plasticidade, soldabilidade e a processabilidade do material, tornando-o amplamente utilizado (GUO, FENG et al., 2022).

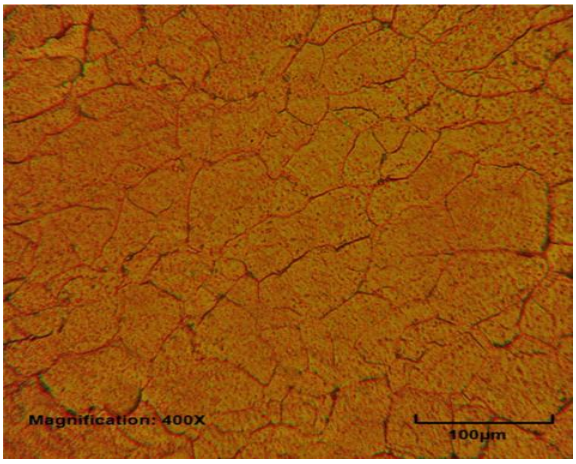
Tabela 3: Propriedades mecânicas da liga Al-Mg-Si 6061-T6

Propriedades	
Limite de resistência à tração (MPa)	310
Limite de escoamento (MPa)	275
Dureza HB	95
Limite de resistência ao cisalhamento (MPa)	205
Resistência à fadiga (MPa)	95
Módulo de elasticidade (GPa)	69

Fonte: Gonçalves (2012).

Na Figura 1 identifica-se a micrografia apresentando a microestrutura do alumínio 6061-T6 que é caracterizada pela presença da matriz de alumínio com precipitados de siliceto de magnésio (Mg_2Si) em tamanhos variados.

Figura 1: Micrografia da liga Al-Mg-Si 6061-T6



Fonte: WARSI (2018).

1.1.1. Tratamento térmico T6

As técnicas de tratamento térmico para a liga de alumínio 6061-T6 incluem endurecimento, recozimento, reforço por precipitação, têmpera e revenido. A principal desvantagem do alumínio e suas ligas é a sua resistência, que é menor em comparação ao aço e, por isso, os pesquisadores estão trabalhando na liga de alumínio afim de aumentar suas propriedades físicas e mecânicas. a liga Al 6061-T6 apresenta uma resistência à tração em torno de 310 MPa e limite de escoamento de aproximadamente 275 MPa, enquanto um aço carbono médio, como o AISI 1045, possui resistência à tração próxima de 620 MPa e limite de escoamento em torno de 530 MPa. Já um aço inoxidável austenítico AISI 304 pode atingir resistência à tração de cerca de 620 MPa e escoamento de 215 MPa (CALLISTER; RETHWISCH, 2020). O reforço ou tratamento secundário térmico ou frio são alguns dos métodos para aumentar as propriedades das ligas de alumínio (SINGH, S., 2023).

Os tratamentos térmicos aplicados às ligas de alumínio têm como objetivo melhorar a resistência mecânica das ligas. Sua designação é feita por uma letra seguida de um número, de acordo com a sequência de tratamentos básicos aos quais o material é submetido (SANTOS Jr. et al., 2016). Na Tabela 4 é apresentado a nomenclatura considerada, de acordo com os tratamentos térmicos principais e o trabalho mecânico realizado nas ligas de alumínio (KAUFMAN, 2000).

Tabela 4: Nomenclatura de acordo com os tratamentos térmicos

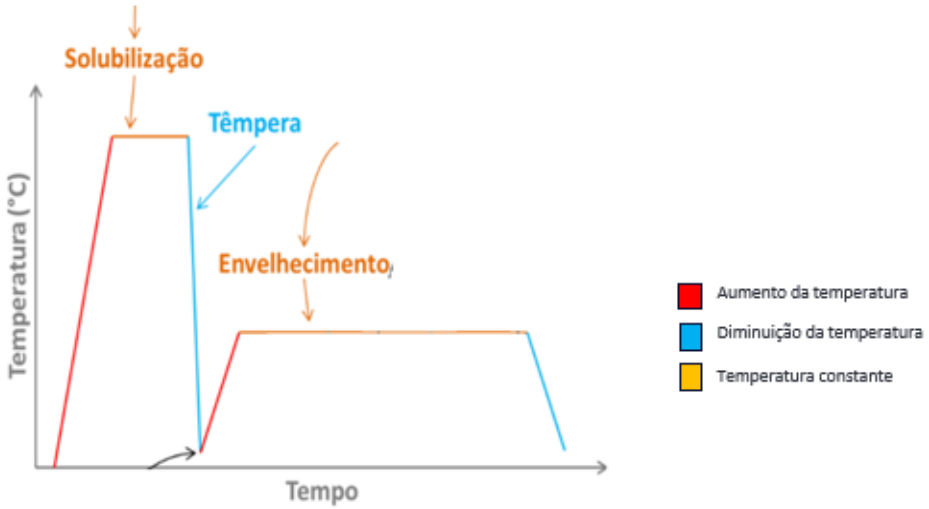
Nomenclatura	Tratamento Térmico
T1	Arrefecido desde a temperatura de conformação e envelhecido naturalmente
T2	Arrefecido desde a temperatura de conformação, encruado e envelhecido naturalmente
T3	Solubilizado, encruado e envelhecido naturalmente
T4	Solubilizado e envelhecido naturalmente
T5	Arrefecido desde a temperatura de conformação e envelhecido artificialmente
T6	Solubilizado e envelhecido artificialmente
T7	Solubilizado e sobreenvelhecido
T8	Solubilizado, encruado e envelhecido artificialmente
T9	Solubilizado, envelhecido artificialmente e encruado
T10	Arrefecido desde a temperatura de conformação, encruado e envelhecido artificialmente

Fonte: Adaptado de THE KAUFMAN (2000).

O tratamento térmico tipo 6 refere-se a um processo específico aplicado à liga de alumínio 6061. O T6 é comumente utilizado para melhorar as propriedades mecânicas do material, tornando-a mais resistente e durável para uma variedade de aplicações industriais. É importante ressaltar que os parâmetros específicos do tratamento térmico, como temperatura e tempo de envelhecimento, podem variar

dependendo das necessidades de cada aplicação e das características desejadas para o material final. O processo padrão de tratamento térmico de alumínio T6 contém três estágios, como tratamento de solução, têmpera e envelhecimento artificial como está representado na Figura 2 (SINGH, S, 2023).

Figura 2: Estágios do Tratamento Térmico T6



Fonte: Adaptado de BARBOSA (2022).

O primeiro estágio, tratamento da solução, envolve o aquecimento da liga a uma temperatura ligeiramente abaixo da temperatura de fusão eutética e a manutenção da temperatura do material por um período necessário. Este processo converte uma grande quantidade de soluto em uma solução sólida, promovendo a precipitação de elementos de liga, como o magnésio e o silício, dentro da estrutura cristalina do alumínio. Posteriormente, no segundo estágio, tem-se um resfriamento brusco onde as ligas tratadas em solução são temperadas com água ou óleo para que a microestrutura solubilizada seja mantida à uma temperatura ambiente ou próxima, evitando a reprecipitação das fases de liga dissolvidas e mantendo uma estrutura homogênea alcançada durante o tratamento. Após a têmpera, no terceiro estágio, a liga é reaquecida em temperaturas relativamente baixas. Nessa fase denominada envelhecimento artificial, ocorre a precipitação controlada de átomos de liga, como magnésio e silício, que se agrupam para formar partículas dispersas na matriz de alumínio (SINGH, S, 2023).

Essas partículas precipitadas atuam como obstáculos para o movimento das discordâncias dentro da estrutura cristalina do material, o que gera o aumento da resistência e dureza. O envelhecimento artificial atinge picos de dureza mais elevados e em tempos mais curtos, se comparado ao envelhecimento natural (precipitação ocorre à temperatura ambiente). O tempo e a temperatura de envelhecimento artificial são cuidadosamente controlados de acordo com as especificações do material e as propriedades desejadas para a aplicação final. O processo pode ser realizado em fornos industriais, com parâmetros de temperatura e tempo ajustados de acordo com as necessidades do projeto (ASM, 1991; KAUFMAN et al., 2004).

2.2. Processo de furação

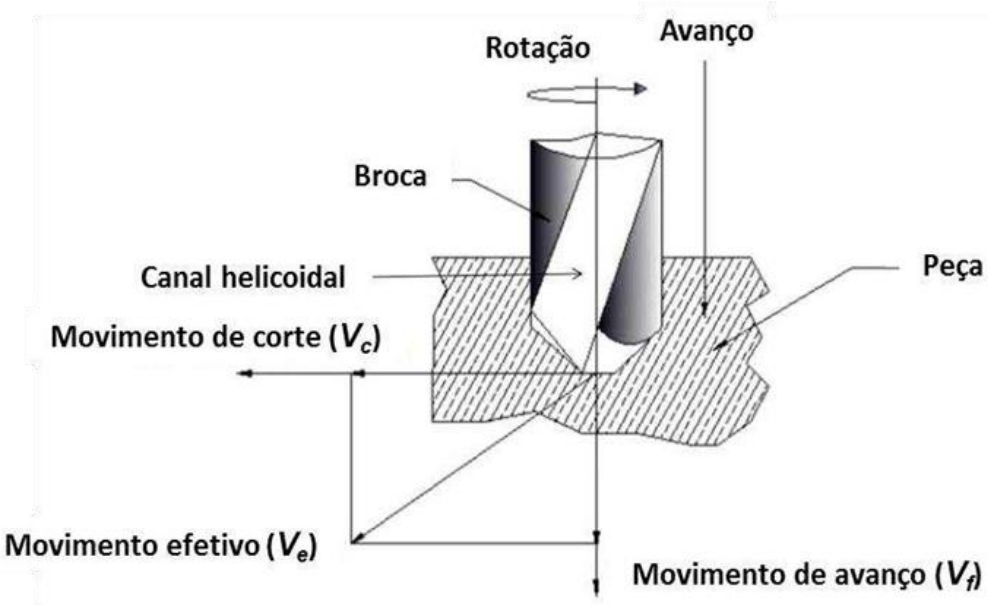
A furação é um processo de usinagem através da remoção de material em forma de cavaco, responsável por mais de 30 % de todas as operações de usinagem e, por aproximadamente, 40 % das operações nos setores automotivo e aeroespacial. Semelhante a outros processos existentes, a furação envolve fenômenos como deformação plástica, fratura e desgaste. Além disso, também gera calor e, consequentemente, aumenta a temperatura do conjunto peça-ferramenta, o que deve ser observado, pois pode contribuir para o desgaste prematuro da ferramenta e influenciar no acabamento superficial da peça (MARTINS et al., 2024).

Durante a furação da peça, parâmetros como a geometria da broca, materiais da broca e da peça, avanço e velocidade de corte afetam o desempenho da operação para remover o material em forma de cavacos. A seleção de ferramentas e processos depende principalmente do tipo de material, do tamanho do furo, da quantidade de furos produzidos em determinados períodos. O processo de furação envolve movimento relativo entre a broca e a peça de trabalho. Geralmente, a broca gira e avança sobre a peça de trabalho para peças grandes, mas às vezes a peça gira e avança sobre a broca (GARG, 2015). A seleção apropriada da geometria da ferramenta, do material da ferramenta e dos revestimentos, da velocidade de corte e de avanço ideais, bem como das máquinas de furação, é necessária para atender aos requisitos das peças usinadas (AAMIR, MUHAMMAD et al., 2020).

A geometria da broca e a deformação plástica do material da peça são pontos de importante observação na operação de furação. A velocidade de corte é próxima de zero no centro da furação. A velocidade de corte e o ângulo de inclinação variam

em relação à distância do centro da broca e a aresta de corte tem a velocidade de corte mais alta, chamada de velocidade de corte periférica. Devido a esta variação da velocidade de corte, a remoção do material ocorre nas proximidades do centro da broca, na aresta transversal (KUMAR et al., 2020). Na Figura 3 é representado os estágios de furação.

Figura 3: Cinemática do processo de furação



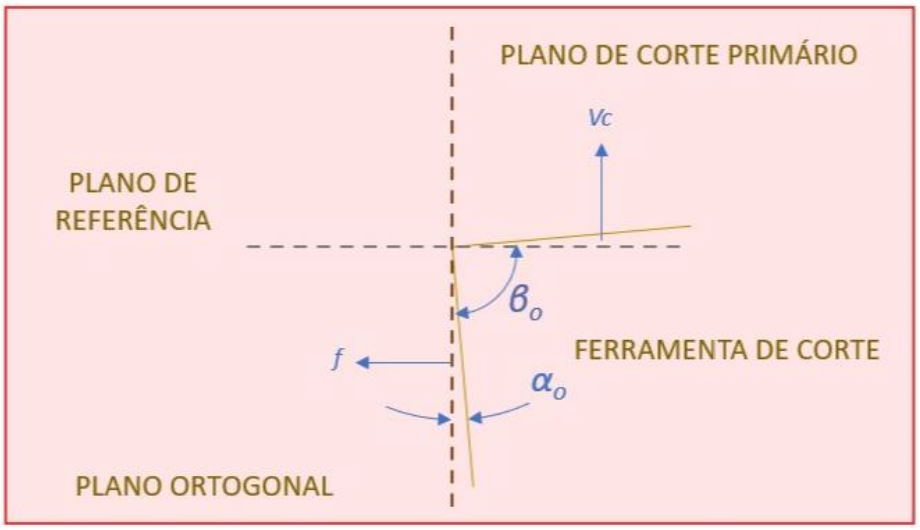
Fonte: Adaptado de Martins (2016).

O movimento de corte, rotativo, é aquele responsável pela remoção de cavaco quando as arestas de corte percorrem o perímetro da broca em uma volta completa e esse movimento é quantificado por meio da velocidade de corte (V_c). O movimento de avanço linear, refere-se ao deslocamento retilíneo coincidente ao eixo de rotação da ferramenta. É determinado pela velocidade de avanço (V_f) que, somado ao movimento de corte, promove a remoção contínua de cavaco. O movimento efetivo (V_e) representa a resultante dos dois movimentos citados anteriormente, sendo considerado como tridimensional (Barbosa, 2022).

2.2.1. A formação do cavaco

O processo de formação do cavaco é decorrente do contato da ferramenta com a peça usinada. De acordo com Santos et al. (2004) antes de explicar como acontece a formação do cavaco propriamente dita, é necessário apresentar a definição de corte ortogonal. A definição do corte ortogonal tem como objetivo permitir simplificações no estudo dos fenômenos relacionados ao contato cavaco-ferramenta, como a formação do cavaco, interface cavaco-ferramenta, forças e tensões de usinagem. O corte ortogonal, conforme representado na Figura 4, faz uma simplificação do corte na qual as direções dos movimentos de corte, avanço e de saída do cavaco passem a fazer parte de um mesmo.

Figura 4: Corte ortogonal



Fonte: Elaborado pela Autora.

A formação de cavacos e sua morfologia são características importantes na usinagem e produz informações importantes sobre o processo em si (SUN et al., 2009). Segundo Ferraresi (1970), a formação de cavaco, em geral, nas condições normais de usinagem com ferramentas de metal duro ou de aço rápido, se processa da seguinte sequência:

1. Durante a usinagem, devido à penetração da ferramenta na peça, uma pequena porção do material (ainda solidária a peça) é recalcada contra a

superfície de saída da ferramenta.

2. O material recalcado sofre uma deformação plástica que aumenta progressivamente até que as tensões de cisalhamento sejam suficientemente grandes, de modo a se iniciar um deslizamento (sem que haja com isto uma perda de coesão) entre a porção de material recalcado e a peça. Este deslizamento se realiza segundo os planos de cisalhamento dos cristais da porção de material recalcada. Durante a usinagem, estes planos instantâneos irão definir uma certa região entre a peça e o cavaco, dita região de cisalhamento. Para facilitar o tratamento matemático dado à formação do cavaco, esta região é assimilada a um plano, dito simplesmente plano de cisalhamento. Este plano é tomado quanto possível paralelo aos planos de cisalhamentos dos cristais dessa região e é definido pelo ângulo de cisalhamento Ø.
3. Continuando a penetração da ferramenta em relação à peça, haverá uma ruptura parcial ou completa na região do cisalhamento, dependendo naturalmente da ductilidade do material e das condições de usinagem.
4. Prosseguindo, devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção do material deformada e cisalhada (cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto tal ocorre, uma nova porção de material (imediatamente adjacente a porção anterior) está se formando e cisalhando. Esta nova porção de material irá também escorregar sobre a superfície de saída da ferramenta, repetindo o fenômeno.

Os tipos de cavacos na usinagem são determinados pelos efeitos combinados das propriedades do material da peça, velocidade de corte e geometria da ferramenta e a compreensão da formação de cavacos desempenha um papel importante na otimização do processo de usinagem e na integridade da superfície (GUO et al., 2004).

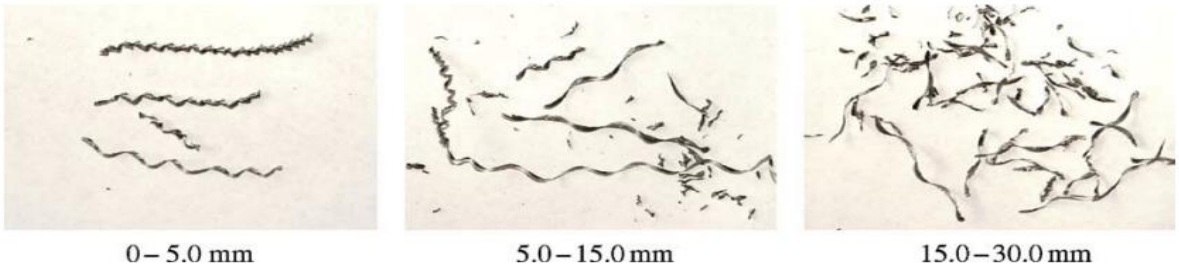
A morfologia dos cavacos é influenciada por uma combinação de fatores como as características da ferramenta, parâmetros de corte, propriedades do material e tipos de processo de usinagem (LI, 2018). As formações de cavacos na usinagem são categorizadas como contínuas, descontínuas e segmentados (GRZESIK, 2017).

A formação contínua de cavacos resulta da usinagem de materiais dúcteis em alta velocidade de corte e baixa taxa de avanço e profundidade de corte e contribui

positivamente para a obtenção do acabamento superficial desejado e, embora um fluxo contínuo e ininterrupto de cavacos seja um resultado desejado e o tipo de formação preferido, existem obstáculos no que diz respeito à eficiência operacional. Os cavacos que se acumulam continuamente sem quebrar a peça afetam negativamente a segurança do operador e o desgaste da ferramenta e a ocorrência de enrolamento de cavacos ao redor da peça prejudica a qualidade da superfície (MACHADO et al., 2015; OBIKAWA; SHINOZUKA, 2013).

O acúmulo desses cavacos na zona de corte faz com que o calor se acumule na ferramenta de corte e na peça de trabalho, o que acarreta resultados negativos na vida útil da ferramenta. Os cavacos contínuos que ocupam a zona de corte impedem que o fluido de corte entre na zona de corte (YILMAZ et al., 2020). Na Figura 5 é representado o cavaco contínuo.

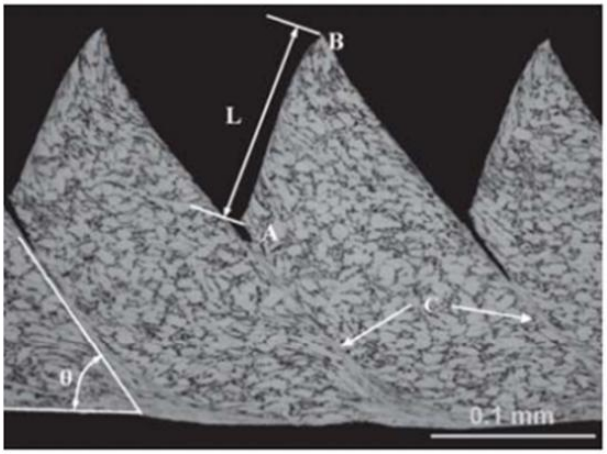
Figura 5: Cavaco contínuo



Fonte: FENG KE et al. (2005).

Na usinagem de materiais com baixa condutividade térmica, o calor gerado no plano de cisalhamento primário tende a ficar concentrado naquela região, o que provoca a redução da resistência ao cisalhamento (YILMAZ et al., 2020). A queda de resistência ao cisalhamento do material faz com que ele continue a ser deformado, mesmo depois de deslocar-se para uma região de menor tensão de cisalhamento, o que dá origem a um seguimento e esse ciclo é responsável pela formação do cavaco segmentado, que se repete dando origem a bandas de cisalhamento, como é representado na Figura 6 (SANTOS, 2007).

Figura 6: Cavaco segmentado



Fonte: SUN et al. (2009).

Os cavacos descontínuos, como mostrado na Figura 7, são produzidos quando materiais duros ou quebradiços são usinados. São desejáveis quando materiais duros devem ser usinados, pois proporcionam um bom acabamento superficial. Além disso, os cavacos lamelares são cavacos semicontínuos produzidos em alta velocidade de corte e taxa de avanço, enquanto os cavacos segmentados, que são uma forma de cavacos descontínuos, são formados em baixas velocidades de corte (MUHAMMAD et al., 2020).

No corte ortogonal, principalmente nas operações de torneamento e fresamento, evita-se a formação de cavacos contínuos pois eles saem instantaneamente da aresta de corte, porém, a forma como os cavacos são formados durante o processo de furação pode ser problemática porque os cavacos continuam a fluir ao longo do canal helicoidal após deixar a aresta de corte.

Cavacos grossos são difíceis de quebrar pela ação do processo de furação, enquanto cavacos contínuos tendem a se enroscar nos furos e afetar o acabamento superficial. Além disso, na furação, os cavacos podem reduzir a produtividade devido à quebra das brocas em decorrência do entupimento de suas ranhuras devido ao aumento do torque, o que pode levar à falha da ferramenta. Sendo assim, o controle de cavacos na furação de ligas de alumínio é importante, pois pode ter impacto na força de impulso, no torque, na rugosidade superficial e no desgaste da ferramenta. Medidas eficazes para controlar a formação de cavacos incluem propriedades

mecânicas da peça, geometria da ferramenta, condições de corte, materiais da ferramenta e revestimentos (MUHAMMAD et al., 2020).

Figura 7: Cavaco descontínuo

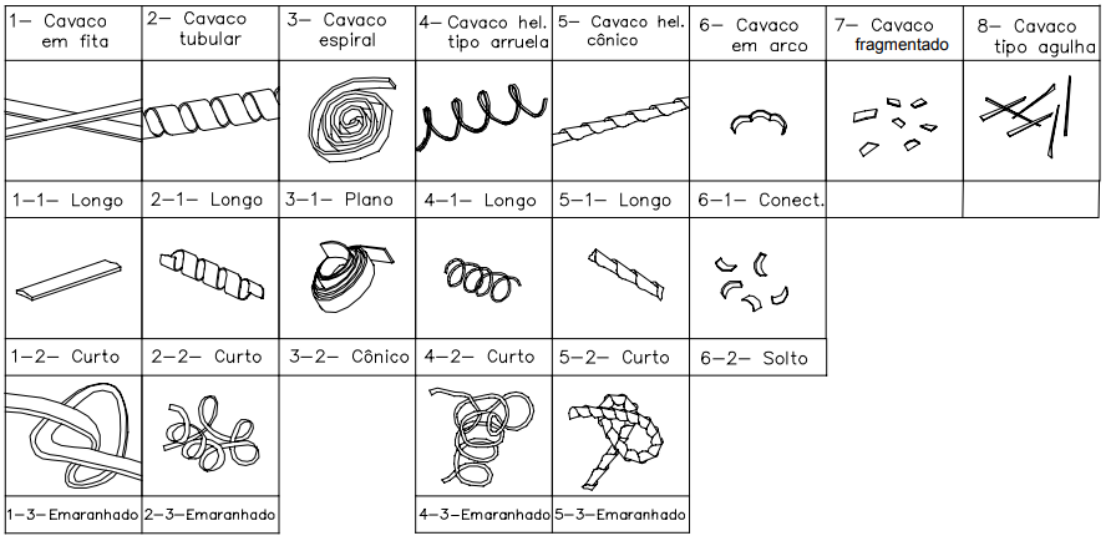


Fonte: CHILDS et al. (2000).

De acordo com os experimentos de SUN et al. (2008), o comprimento do cavaco é proporcional à velocidade de corte. Essa relação pode ser explicada pela deformação induzida pelo amolecimento do material, resultante das altas temperaturas de corte devido ao aumento da velocidade de corte. Os autores também observaram o aumento do comprimento dos cavacos em função do avanço. A ligeira diminuição no comprimento médio dos cavacos no avanço mais alto pode ser devida à grande variação de medidas como resultado da morfologia irregular dos cavacos.

Quanto as formas, de acordo com Cardoso (2007) os cavacos são geralmente classificados em cavaco em fita, cavaco helicoidal, cavaco em espiral e cavaco em lascas ou pedaços. A norma ISO 3685 define uma classificação mais detalhada dos cavacos quanto à forma, como é representado na Figura 8.

Figura 8: Classificação dos cavacos quanto à forma



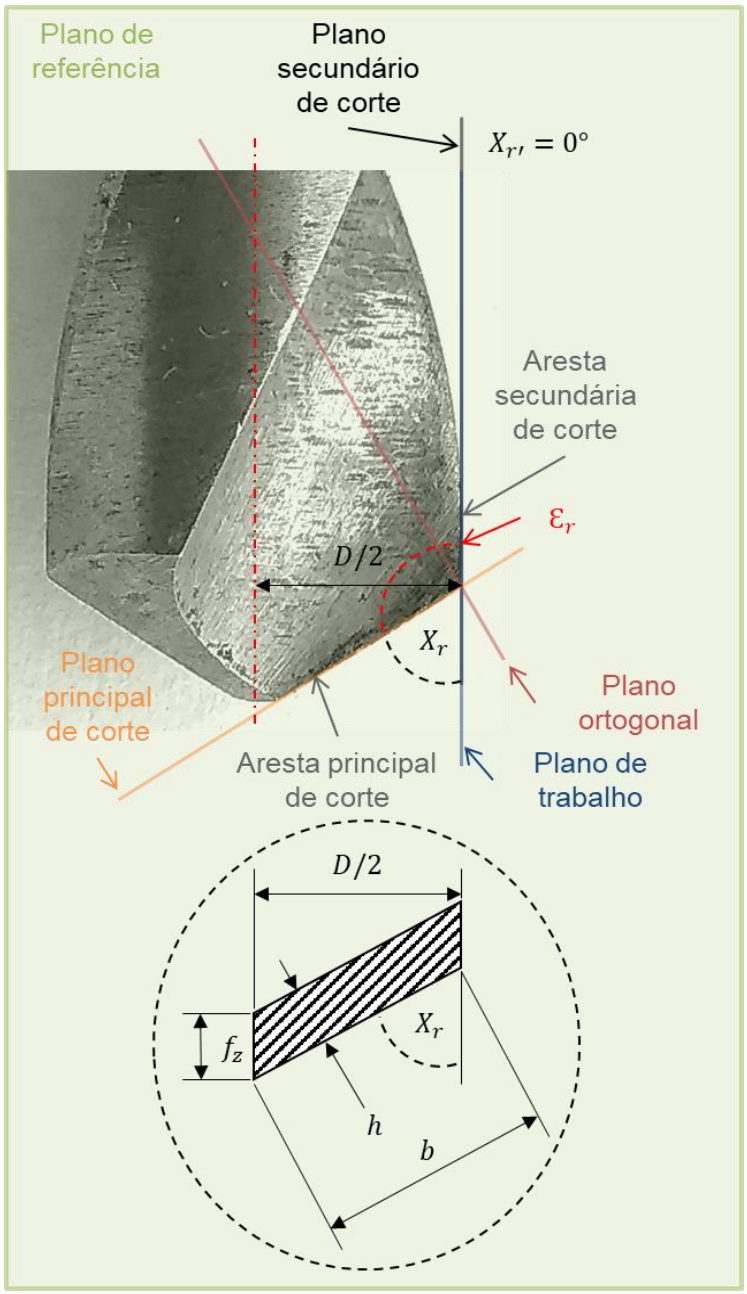
Fonte: SANTOS (2007).

No plano de referência de uma broca, como mostrado na Figura 9, o cavaco é formado a partir de uma área de corte, em que a sua espessura (h) e sua largura (b) são calculadas respectivamente pelas equações 1 e 2 (WANG et al., 2021).

Por meio dessas grandezas relativas ao cavaco, é possível calcular o grau de recalque, que determina o grau de deformação existente entre o plano de cisalhamento primário, ou seja, a razão entre a espessura real do cavaco formado (h') e a porção teórica de material removida (h). Na equação 3 é identificado a relação entre h e h' para encontrar o grau de recalque (R_c) (WANG et al., 2021).

No corte ortogonal, o grau de recalque é uma medida da quantidade de deformação sofrida pelo cavaco e pode ser usado para calcular o ângulo de cisalhamento e a velocidade de saída do cavaco. O ângulo de cisalhamento φ, formado entre o plano de cisalhamento e a direção de corte, são dependentes das condições de corte empregadas, do material da peça e da ferramenta de corte dentre outros, sendo utilizados como indicativos de quantidade de deformação. Um grau de recalque elevado, que corresponde a um pequeno ângulo de cisalhamento, significa grande quantidade de deformação e baixa velocidade de saída do cavaco (MARCELO DO NASCIMENTO et al., 2013).

Figura 9: Plano de referência de uma broca



Fonte: Adaptado de WANG et al., (2021).

$$h = f \cdot \sin X_r \tag{1}$$

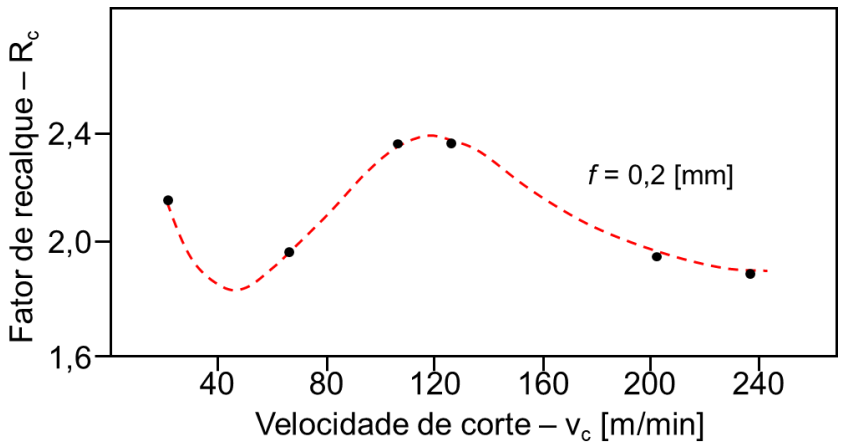
$$b = \frac{a_p}{\sin \sin X_r} = \frac{\frac{D}{2}}{\sin \sin X_r} \tag{2}$$

$$Rc = \frac{h'}{h} \quad (3)$$

De acordo com Micheletti (1980), o grau de recalque tende a diminuir com o aumento da velocidade de corte e, para comprovar essa relação, foi feito um experimento na usinagem do aço carbono AISI 1040, onde pode ser observado a relação R_c x V_c conforme mostrado na Figura 10. É observado que próximo a 120 m/min é observado o valor máximo de R_c e, à medida que a velocidade de corte aumenta, o grau de recalque tende a diminuir progressivamente. Isso se deve ao fato de que as dimensões da aresta postiça de corte crescerem até atingir um valor máximo a partir do qual começa a diminuir até o valor da velocidade de corte crítica, onde a aresta postiça de corte desaparece completamente.

De acordo com Lqbal et al. (2008) o aumento da velocidade de corte reduz o comprimento de contato na interface ferramenta-peça que consequentemente reduz o atrito por fricção. Logo, a taxa de compressão do cavaco diminui em função do aumento da velocidade de corte, influenciando diretamente na redução do grau de recalque.

Figura 10: Relação entre grau de recalque e velocidade de corte

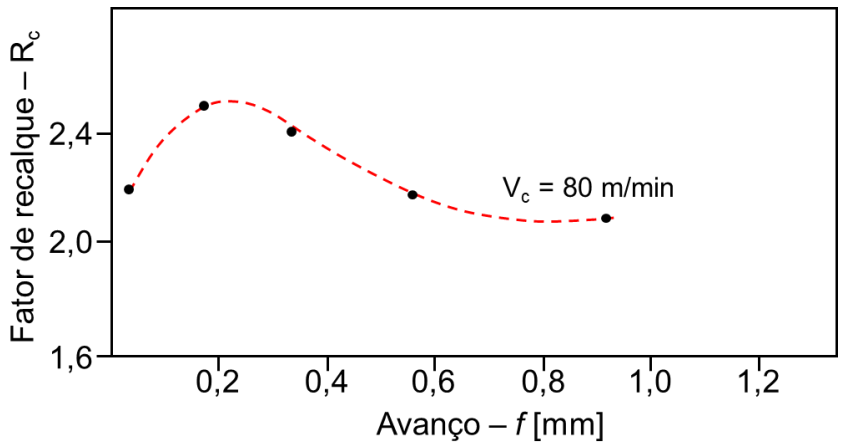


Fonte: MICHELETTI (1980).

Além da velocidade de corte, Micheletti (1980) também fez comparações utilizando o parâmetro de avanço representado na Figura 11. No gráfico, é identificado que o grau de recalque atinge o seu valor máximo em torno de 0,2 mm e depois tende

a diminuir com o aumento do avanço. De acordo com NOVAIS e SOUZA (2009), o aumento do avanço reduz a deformação por cisalhamento na zona primária, e consequentemente, diminui o grau de recalque pois afetará diretamente na velocidade de saída do cavaco. Logo, com as relações trigonométricas previamente definidas, o aumento do avanço, acelera a velocidade de saída do cavaco e como resultado reduz o grau de recalque.

Figura 11: Relação entre grau de recalque e avanço



Fonte: Adaptado, MICHELETTI (1980).

2.2.2. Manufatura verde

Manufatura verde é o termo para métodos de produção inovadores que visam reduzir os impactos ambientais adversos através da redução de resíduos, reciclagem de resíduos, melhor utilização dos recursos naturais e outras medidas aliadas. A redução de emissões perigosas na fabricação de produtos e o apoio aos funcionários ajudaram as empresas a refletirem os seus esforços em todo o mundo com a ajuda da produção verde (ABID et al., 2023).

As empresas industriais estão agora profundamente interessadas em tecnologias que são amigas do ambiente para reduzir o desperdício e a energia gerada pelos produtos visando contribuir com uma sociedade sustentável e, para isso, devem garantir a utilização de tecnologias que não põe em risco a saúde humana ou a qualidade de vida das gerações futuras (JIBHAKATE et al., 2021).

A usinagem é um segmento importante no setor manufatureiro para produzir peças e componentes projetados para bens de capital e de consumo com a ajuda de processos típicos e esses processos eventualmente resultam em elevados impactos ambientais. Além de possuírem muitos benefícios significativos, esses processos também sofrem de algumas limitações, como falhas frequentes de ferramentas e requisitos de reafiação, alto consumo de energia e lubrificantes além de problemas de saúde para os operadores. A partir desses desafios nos processos de usinagem convencionais, muitas técnicas verdes foram desenvolvidas, incluindo principalmente usinagem assistida por lubrificação de quantidade mínima (MQL), corte a seco, usinagem baseada em resfriamento criogênico e tratamentos e revestimentos de ferramentas (GUPTA, 2020).

A usinagem verde baseada no resfriamento criogênico utiliza gases altamente resfriados do tipo nitrogênio líquido sob alta pressão para resfriar a zona de usinagem e minimizar o calor gerado entre a ferramenta e a peça sendo usinada. Com isso, são algumas vantagens do processo, melhor remoção de cavacos, redução de temperatura, melhor qualidade superficial da peça usinada e maior vida útil da ferramenta. Outro importante técnico de usinagem verde é a lubrificação por quantidade mínima (MQL), onde micro gotículas de lubrificantes verdes, principalmente ácidos graxos e óleos vegetais, são fornecidas à zona de usinagem e, devido à sua distribuição uniforme na interface do cavaco da ferramenta, a usinabilidade melhorada é obtido. Uma névoa de lubrificante é espalhada sobre a zona de usinagem, o que implica um consumo muito baixo de (10-200 ml/h) de lubrificante em comparação com outros métodos de resfriamento úmido convencionais. Muitas investigações foram conduzidas sobre usinagem assistida por MQL de materiais difíceis de usinar e foi considerado uma alternativa adequada aos refrigerantes convencionais à base de óleo de hidrocarbonetos. Além disso, o MQL produz usinabilidade quase igual àquela obtida na usinagem úmida convencional. (GUPTA, 2020).

O corte a seco é outra técnica de usinagem verde que minimiza extensivamente o efeito negativo de fluidos de corte prejudiciais devido à sua completa eliminação. A usinagem sem lubrificantes reduz significativamente o impacto ambiental e os custos de usinagem (GUPTA, 2020). No entanto, um custo adicional de máquinas mais robustas e ferramentas especiais pode estar agregado, por exemplo, problemas relacionados à temperatura de corte são frequentes em altas velocidades de corte:

adesão, maior taxa de desgaste e perda da qualidade do produto acabado. A furação a seco de ligas de alumínio tem como problema a adesão do alumínio sobre a ferramenta à medida que a profundidade e a quantidade de furos aumentam (BA, 2022). De acordo com Kelly e Cotterel (2002), a furação de ligas de alumínio sem fluidos de corte é praticamente impossível e, para solucionar isso, é recomendado o uso de revestimentos duros e de baixa afinidade química, amenizando o desgaste nessas condições.

Segundo Dasch et al. (2006), ao comparar o desempenho de cinco diferentes filmes a base de carbono utilizados no revestimento de ferramentas de corte destinadas à usinagem a seco, foram verificados casos em que foi obtido um resultado cem vezes maior em relação ao sem uso de revestimento. Os autores atribuíram esse ganho à boa adesão do revestimento à superfície da ferramenta, à sua estabilidade a altas temperaturas e à sua contribuição para a saída dos cavacos.

Na comparação dos valores de rugosidade superficial obtidos a partir do fresamento de ligas de alumínio em duas condições sendo a primeira revestido em DLC e executado a seco e a segunda sem revestimento e com uso de fluido de corte e, de acordo com Fukui et al. (2004), foram obtidos valores semelhantes. Eles então concluíram que o DLC tem a capacidade de alcançar bons níveis de lubrificação na usinagem a seco, contribuindo para a manutenção de padrões de acabamento superficial. No que refere à adesão de alumínio à ferramenta, os autores relatam que tal fenômeno foi verificado apenas na ferramenta sem revestimento.

Brzezinka et al. (2019) elaboraram uma metodologia para melhorar as propriedades autolubrificantes na interface de contato durante o fresamento de ligas Al-Si. Cinco conjuntos de revestimentos de DLC foram depositados sobre um substrato de carboneto de tungstênio pré-revestido com diboreto de titânio (TiB_2). O desempenho destes revestimentos foi comparado com um inserto comercial revestido com TiB_2. Os resultados mostraram que todos os revestimentos de DLC diminuíram o desgaste da ferramenta em comparação com o revestimento somente de TiB_2. Verificou-se uma redução máxima de 85% na taxa de desgaste.

2.2.3. Aços rápidos para ferramentas de corte

A principal característica dos aços rápidos (HSS) é a capacidade de manter altos níveis de dureza a elevadas temperaturas. Isso permite que sejam aplicados na

fabricação de ferramentas de corte, que poderão ser utilizadas em materiais de média e alta resistência e em altas velocidades e que, por isso, estarão sujeitas a altas temperaturas. O fato de os aços rápidos apresentarem bons níveis de tenacidade, resistência à abrasão e estabilidade dimensional contribuem para essa utilização (MARTINS, 2016).

Nos aços rápidos pode-se destacar a presença suficiente de carbono para combinar-se com os elementos da liga e então produzir carbonetos de elevada dureza e capacidade de resistência à abrasão. Entre os elementos de liga presentes no aço rápido estão cobalto, cromo, molibdênio, tungstênio e vanádio, materiais que conferem longa vida às ferramentas que atua como partículas duras que são capazes de melhorar a resistência ao desgaste (SILVA, 2010).

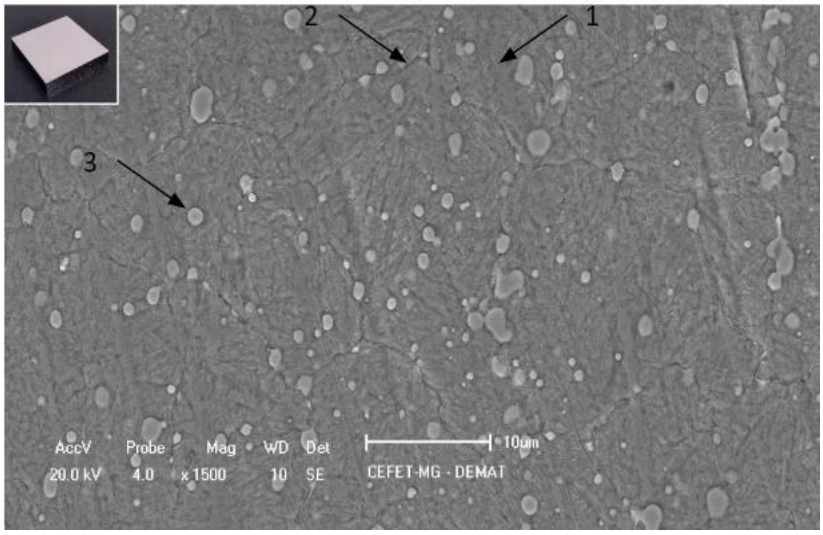
No aço rápido, os carbonetos são constituintes essenciais que têm um impacto direto no desempenho da engenharia e nas qualidades do aço rápido. A formação, morfologia e distribuição dos carbonetos são ditadas pelos elementos de liga. F. W. Taylor e M. White inventaram o aço rápido em 1898 que são classificados em duas séries com base em suas composições de liga: aço rápido da série M (molibdênio) e aço rápido da série T (Tungsténio) (SILVA, 2010).

De acordo com Ba (2022) aproximadamente 95 % das ferramentas são fabricadas com a série M, devido à melhor resistência à abrasão e menor distorção em tratamento térmico e o aço rápido da série mais amplamente utilizado é o M2. As propriedades mecânicas do aço rápido dependem principalmente da composição química e da microestrutura.

Devido ao ambiente de serviço rigoroso do aço rápido, a resistência ao desgaste, a dureza e a resistência ao calor do aço rápido são altamente exigidas e por isso é essencial melhorar a qualidade e o desempenho de engenharia do aço rápido e estabelecer a relação de correspondência entre os carbonetos como um importante componente de fase e os elementos de liga (YANGMIN et al., 2024).

A microestrutura do aço rápido AISI M2 é exemplificado na Figura 12. De acordo com Barbosa (2024), a microestrutura é composta pela matriz martensítica, identificada no ponto 1, com contornos de grãos, identificado no ponto 2 que são referentes à fase austenítica. No ponto três podemos identificar os carbonetos. Os requisitos para aços rápidos são, por um lado, durezas extremamente altas de mais de (800–900) HV e, por outro lado, a estabilidade térmica da microestrutura até 500 ºC e possuem uma estrutura cúbica de face centrada (CFC) (JAMES et al., 2023).

Figura 12: Ilustração da microestrutura do aço rápido AISI M2



Fonte: BARBOSA (2024).

O aço rápido apresenta menor desempenho quando comparado aos demais materiais, como o metal duro, por exemplo, pois se observa mudanças de propriedades mecânicas em temperaturas superiores a 600 °C (MARTINS, 2016). A aresta perde a capacidade de corte devido a estabilidade térmica e a resistência ao desgaste serem significativamente reduzidas pela perda da dureza. Sendo assim, as brocas só devem ser empregadas com baixas velocidades de corte para evitar o desgaste prematuro (MORENO, 2013). A velocidade de corte máxima na usinagem de materiais ferrosos é de aproximadamente 50 m/min (CASTILLO, 2025).

Uma alternativa que traz resultados mais eficientes aos processos de usinagem é a utilização de ferramentas de corte revestidas. Por meio da deposição de camadas de filmes de ordem micrométrica podem ser obtidas alterações nas características superficiais e, consequentemente, expressivas melhorias no desempenho das ferramentas. Essas melhorias referem-se, basicamente, à redução do atrito e, consequentemente, dos desgastes abrasivo e adesivo, e tem como resultado, além da fabricação de produtos de melhor qualidade, ganhos na produtividade e redução de custos por prolongar a vida útil das ferramentas de corte (MARTINS, 2016).

2.3. Revestimento de DLC

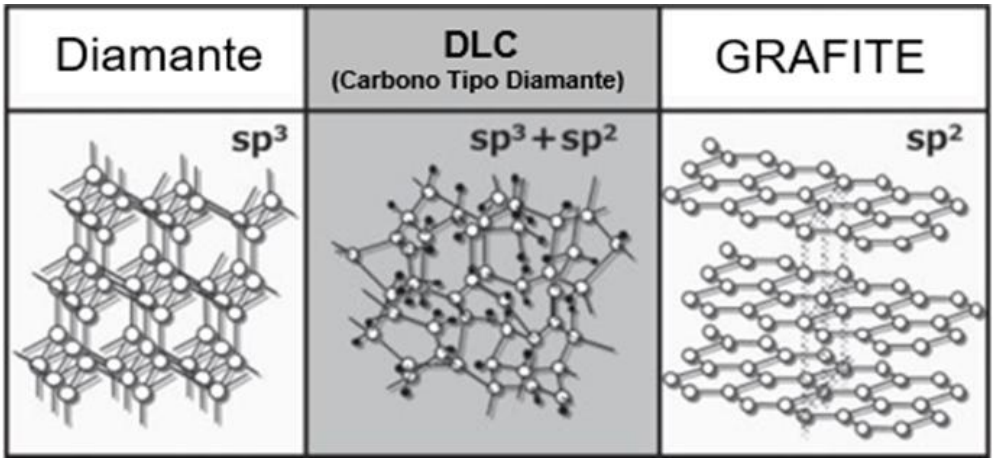
O revestimento é uma forma de tratamento superficial que consiste na aplicação de materiais em uma superfície matriz, com o intuito de recobrir o material de base, promovendo ou aprimorando suas propriedades. Existem diversas finalidades para deposição de camadas nos materiais, dentre estas, conferir ao substrato controle do desgaste e atrito, maior resistência à corrosão, redução dos custos inerentes ao processo de desgaste, proteger de deterioração, melhorar a aparência e promover isolamento elétrico (MARTINS et al., 2022). A utilização do carbono em forma de diamante como revestimento tem sido explorada continuamente. Encontra-se exemplos desse revestimento em superfícies de brocas, matrizes, rolamentos, facas e outras ferramentas visando o aumento de dureza superficial, assim como lentes e vidros que adquirem resistência mantendo sua transparência, micrometros de alta precisão e alto-falantes de alta frequência (MIKI et al., 2015).

O carbono é um dos elementos químicos mais abundantes na natureza e possui como característica se apresentar em várias formas morfológicas com variação na estrutura cristalina que compõe o material, levando a uma vasta gama de propriedades físicas e mecânicas. Entre as formas mais estudadas, por exemplo o revestimento de carbono tipo diamante, conhecido como *Diamond-Like Carbon* (DLC) (MARTINS, 2016). Algumas aplicações específicas do DLC são na forma de lubrificantes sólidos em peças automotivas, superfícies antirreflexo para células solares ou elementos ópticos, revestimentos protetores em implantes biomédicos, próteses, discos magnéticos e dissipadores de calor para dispositivos semicondutores (DALIBÓN et al., 2019). Além dos exemplos citados, o DLC pode ser indicado para aplicações em que se exige resistência ao desgaste, corrosão, elevadas temperaturas e redução do coeficiente de atrito. Sendo assim, é também ideal para revestir ferramentas de corte, que estão sujeitas a uma combinação de mecanismos e tipos de desgaste durante a usinagem (CH. et al., 2020). É demonstrado na Figura 13 as estruturas do grafite, do diamante e da forma amorfa.

O grafite apresenta somente ligações de carbono na forma de hibridizações sp^2 e não possui hidrogênio em sua composição, posicionando-se na extremidade esquerda do diagrama de fase ternário, como pode ser observado na Figura 14 obtendo menor dureza e maior ductilidade. O diamante, que apresenta somente hibridizações sp^3 em sua estrutura é mais duro e apresenta maior rigidez (extremidade

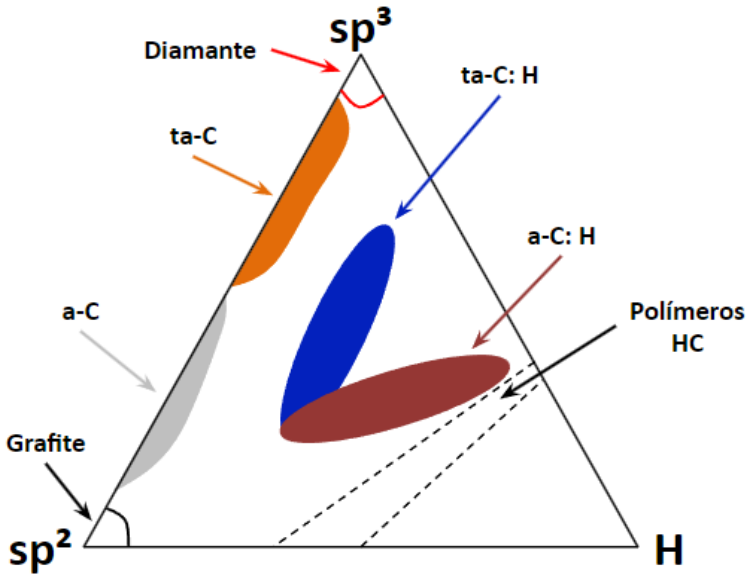
superior do diagrama de fase ternário). Desta forma, quanto mais próximo da parte superior do diagrama, maior é a dureza do filme. A extremidade direta do diagrama representa as ligações com o hidrogênio (MARTINS et al., 2022).

Figura 13: Estrutura cristalina do diamante, do carbono na forma amorfa e do grafite



Fonte: BARBOSA (2024).

Figura 14: Diagrama de fase ternário do Carbono



Fonte: Ba (2022).

Os filmes hidrogenados a-C:H podem ser depositados com a técnica de deposição química de vapor assistida por plasma (PECVD - *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*) e sua dureza estimada é de 35 GPa, com aplicação ampla e ainda muito estudada atualmente. A aplicação de revestimento de DLC hidrogenado ocasiona o aumento da dureza superficial com redução do coeficiente de atrito. Os filmes tetraédricos hidrogenados (ta-C:H) foram descobertos a partir de 1984 a partir da técnica de deposição por rádio frequência, pulverização em atmosfera de argônio e hidrogênio (VETTER, 2014). O carbono amorfo tipo polímero hidrogenado (HC) é uma subclasse do filme a-C:H, que segundo Silva (2014), podem ser depositados pela técnica PECVD, apresentando baixa densidade e maciez. O carbono duro livre de hidrogênio (a-C) apareceu em 1976 por pulverização do carbono a partir de um alvo de grafite. Este filme com adição de materiais (a-C:Me) foi obtido a partir de 1995 com a técnica de pulverização de metais com zircônio e titânio e evaporação a arco dos íons de carbono (VETTER, 2014).

Com a busca em atingir uma maior quantidade de hibridizações sp^3, os filmes de carbono tetraédrico não hidrogenado (ta-C), surgiram a partir do fluxo de íons de carbono puro, pela técnica de um arco catódico à vácuo e atualmente podem ser obtidos por deposição à base PVD, dentre outras técnicas, por evaporação de arco catódico direto em vácuo (*Direct Cathodic Vacuum Arc Evaporation* - DCVAE), evaporação de arco catódico filtrado em vácuo (*Filtered Cathodic Vacuum Arc Evaporation* - FCVAE) e Deposição por laser pulsado (*Pulsed Laser Deposition* - PLD) (SILVA; 2014; VETTER; 2014).

Em um sistema tribológico o revestimento de DLC atua como um lubrificante sólido por meio de uma camada de grafite que é formada na superfície revestida, e, portanto, na interface de contato. Assim, há um deslizamento mais suave entre as superfícies de contato, resultando em menor coeficiente de atrito e desgaste (GHOSH et al., 2015). De acordo com Martins (2021), a aplicação do revestimento DLC permite não apenas a melhoria da produtividade das ferramentas como também a utilização em processos de usinagem com mínima quantidade de lubrificante (MQL) ou a seco, trazendo benefícios ambientais com a redução do consumo de fluidos de corte.

Quando voltado à usinagem, o DLC é utilizado para recobrir ferramentas de corte conjugado a substratos de ligas ferrosas e não ferrosas como aço rápido, metal duro, cerâmicas, entre outros. Embora haja grande compatibilidade em diversos substratos, os filmes de DLC são contraindicados na usinagem de metais ferrosos, como aços,

ferros fundidos e superligas. Isso por que há uma grande solubilidade química de carbono nesses materiais, além da elevada temperatura do processo, levando o DLC a uma condição de instabilidade (MARTINS et al., 2021).

Em serviço, falhas em sistemas com revestimentos de DLC tendem a ocorrer na interface entre substrato e recobrimento (falha adesiva), fratura do recobrimento (falha coesiva) ou fratura sub superficial (falha do substrato). Para evitar a falha de adesão, camadas intermediárias entre o filme de DLC e o substrato são utilizadas de forma a aumentar a força de adesão. Vários materiais podem ser utilizados na deposição dessa camada fina, dentre eles silício (Si), cromo (Cr), titânio (Ti), tântalo (Ta), vanádio (V). Revestimentos multicamadas, como SiC, TiC, TiN, TiCN, CN, Ti também podem ser utilizados (CHEN, 2020).

O emprego de revestimentos em ferramentas de corte, como é possível observar na Figura 15, vem crescendo nos últimos anos e, atualmente, 85 % de todas as ferramentas de metal duro são revestidas e a crescente demanda por ferramentas cada vez mais eficientes, é impulsionada pelo uso de novos materiais, bem como pelo aumento da produtividade dos processos de fabricação (BOBZIN, 2017). No ponto 1 é indicado pela seta o revestimento e no ponto 2 é indicado o substrato.

Figura 15: Ferramentas de corte revestidas com DLC



Fonte: BARBOSA (2017).

As condições do processo podem levar a redução da vida da ferramenta é considerada como parâmetro-chave na avaliação da eficácia dos processos de usinagem. Apresenta um impacto nos custos operacionais, na rugosidade e nas tolerâncias geométricas dos produtos (YAŞAR, 2019). A mudança na forma original da ferramenta pode ter por consequência a produção de peças de qualidade inferior à esperada (MACHADO 2015).

De acordo com os experimentos de Silva et al. (2013), quando o DLC foi utilizado o mecanismo de desgaste teve uma significativa redução e a ferramenta revestida apresentou melhor desempenho quando comparado a ferramenta não revestida, levando assim a um ciclo de vida mais longo, com menos desvios de tolerâncias geométricas, menor coeficiente de atrito, menor desgaste, menos adesão do material e melhor rugosidade.

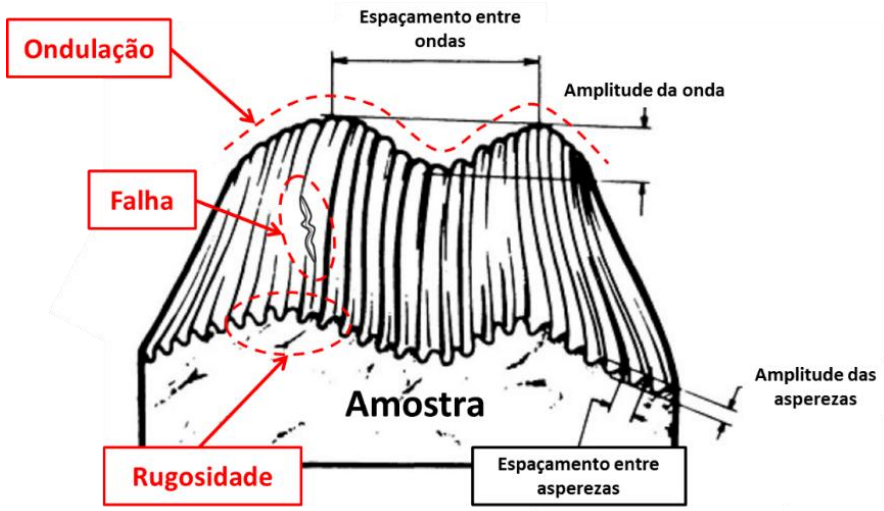
2.4. Parâmetros de caracterização da textura superficial

Todas as superfícies usinadas ou submetidas a quaisquer outros processos de fabricação apresentam desvios microgeométricos (rugosidade) como observado na Figura 16, que fazem parte do estudo da textura superficial ou do acabamento superficial. As falhas são interrupções inesperadas causadas por defeitos do material, como inclusões, trincas ou bolhas (MACHADO et al., 2011). Ondulações são irregularidades que se repetem em menor frequência sobre a superfície. São causadas geralmente por vibrações do processo, seja por erros de fixação e/ou flexão da peça, da ferramenta e demais componentes da máquina-ferramenta (HORVÁTH et al., 2015b). A rugosidade é caracterizada por irregularidades cuja frequência é maior do que as ondulações e essas irregularidades na verdade são asperezas (picos e vales) resultantes do avanço da ferramenta e sua interação (contato e movimento relativo) com o cavaco e a superfície usinada. Pode-se dizer que a rugosidade é a “impressão digital” do processo de usinagem (BARBOSA, 2022).

Os estudos dos níveis de rugosidade influenciam na qualidade do deslizamento, resistência ao desgaste, possibilidade de ajustes, resistência a corrosão e fadiga, aparências dentre outros (SANTOS, 2005). Uma peça usinada pode ser avaliada em termos macro e micrométricos. O primeiro caso corresponde a dimensões, forma e orientação e normalmente vai depender da natureza da operação e da rigidez da máquina ferramenta utilizada. Já o segundo caso diz respeito à rugosidade e tem sua

origem nas imperfeiçoes dos mecanismos das máquinas-ferramenta, nas vibrações no sistema peça-ferramenta, no desgaste das ferramentas e no método de conformação da peça (MACHADO, 2015).

Figura 16: Parâmetros de caracterização de uma superfície



Fonte: BARBOSA (2022).

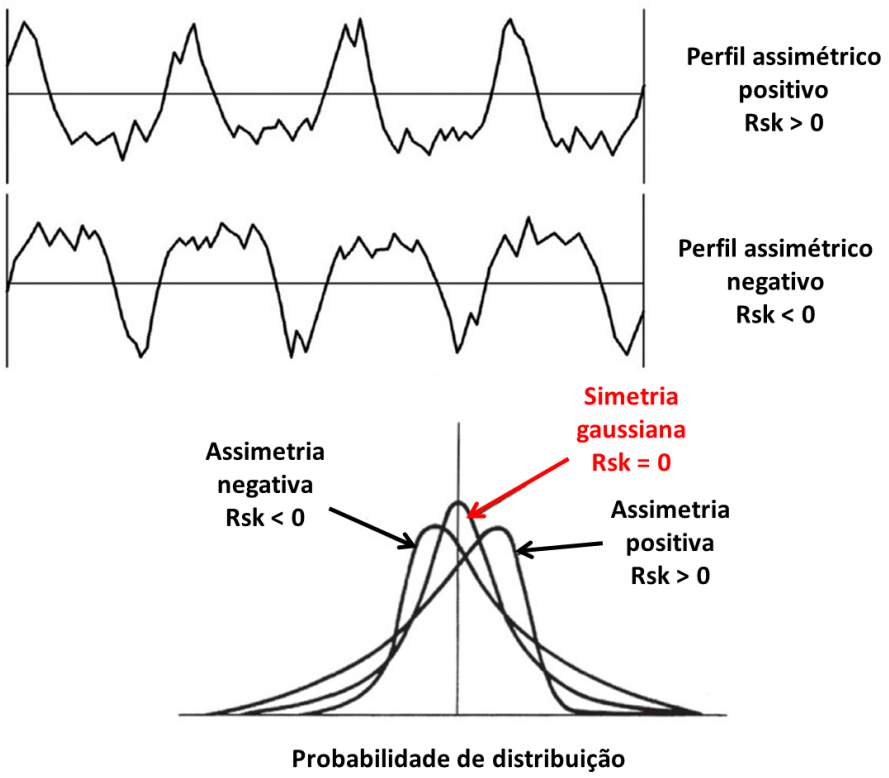
Para medir a rugosidade, podem ser utilizados instrumentos de contato ou óptico. Os instrumentos de contato são conhecidos como rugosímetros em que um apalpador se desloca na direção horizontal acompanhando o perfil da superfície perpendicular e o sinal obtido a partir desse deslocamento é ampliado e pode então ser registrado na forma de um gráfico ou traduzido em valores referentes aos parâmetros medidos. Já no caso dos instrumentos ópticos tem-se um feixe luminoso que incide sobre a superfície e a forma como essa luz é refletida corresponde ao sinal que deverá ser decodificado a fim de que sejam obtidos os parâmetros avaliados. Esses parâmetros podem ser divididos em parâmetros de amplitude que são determinados pela diferença entre a altura dos picos e vales verificados nas regiões avaliadas; parâmetros de espaço em que são determinados pelo espaçamento entre as irregularidades e, por último, parâmetros híbridos que correspondem à combinação dos parâmetros de amplitude e de espaço (Norma ABNT NBR ISO 4287, 2022).

Dos diversos parâmetros de rugosidade disponíveis, muitos estudos mostram que a assimetria e a curtose são parâmetros mais indicados para avaliar o

comportamento tribológico das superfícies (ZHA et al., 2019), pois descrevem a distribuição de picos e vales no perfil de rugosidade (HAMEED et al., 2019; BARBOSA, 2022).

A assimetria (R_{sk}) descreve a probabilidade de distribuição entre picos e vales no perfil de rugosidade, tendo a distribuição gaussiana (normal) como referência, assim como representado na Figura 17. Esse parâmetro determina se a rugosidade de uma superfície é predominante em picos ou em vales. Uma simetria igual a zero, ou simetria gaussiana, significa que há uma distribuição homogênea entre picos e vales. Na prática, são observadas superfícies não gaussianas, ou assimétricas. Acima do valor gaussiano ($R_{sk} = 0$), o perfil é assimétrico positivo, predominando-se em picos altos e vales rasos. Valores negativos mostram que a superfície apresenta um perfil de rugosidade predominante em vales profundos e picos rasos (TO et al., 2018; SEDLAČEK et al., 2017; BARBOSA, 2024).

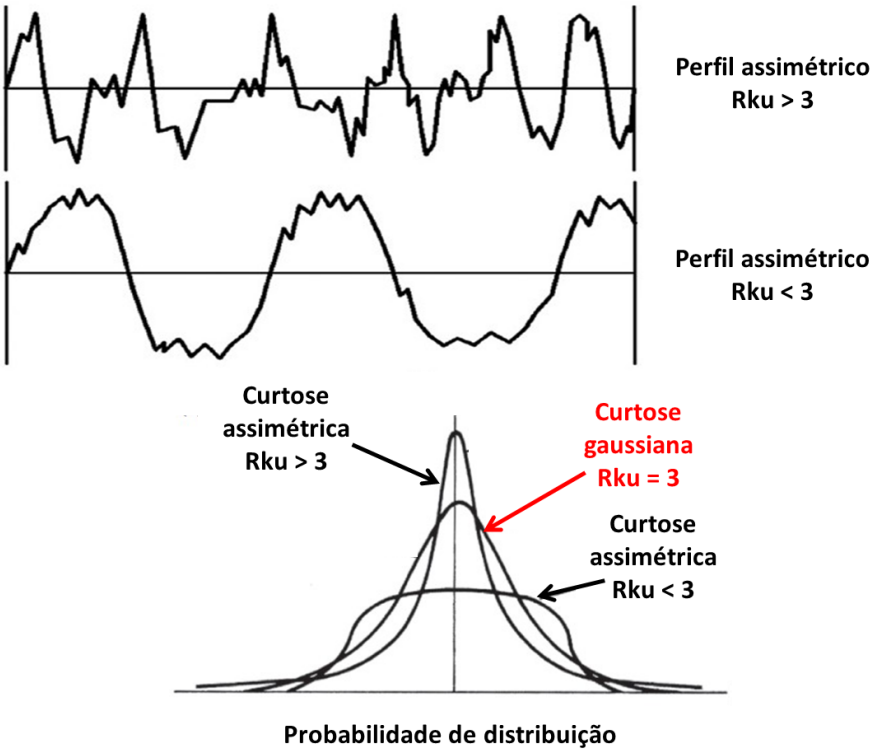
Figura 17: Caracterização da simetria do perfil de rugosidade



Fonte: BARBOSA (2022).

A curtose (R_{ku} ou S_{ku}) refere-se ao fator de achatamento do perfil avaliado e relaciona-se com a geometria dos picos e dos vales, tendo o valor gaussiano igual a três, como representado na Figura 18. Uma superfície com curtose abaixo de três significa que os picos e os vales possuem extremidades mais achatadas e, caso contrário, as asperezas são mais pontiagudas (HE et al., 2018; TO et al., 2018).

Figura 18: Caracterização de achatamento do perfil de rugosidade



Fonte: BARBOSA (2022).

Sedlaček et al. (2017) e Dzierwa (2017) citam que muitas pesquisas na área da tribologia têm mostrado influência dominante dos parâmetros de assimetria e curtose. Kawasegi et al. (2017) e Kawasegi et al. (2019) citam que o atrito entre o cavaco e a ferramenta durante a usinagem tem um impacto relevante sobre o desgaste da ferramenta e a rugosidade do produto acabado e que os esforços de corte, calor e deformação plástica dos materiais estão relacionados com o atrito. Para reduzir o coeficiente de atrito nesse tribossistema, a texturização de superfícies também é aplicada sobre a ferramenta e, de acordo com os autores, bons resultados têm sido

encontrados, por exemplo, na usinagem de ligas de alumínio com ferramentas de diamante.

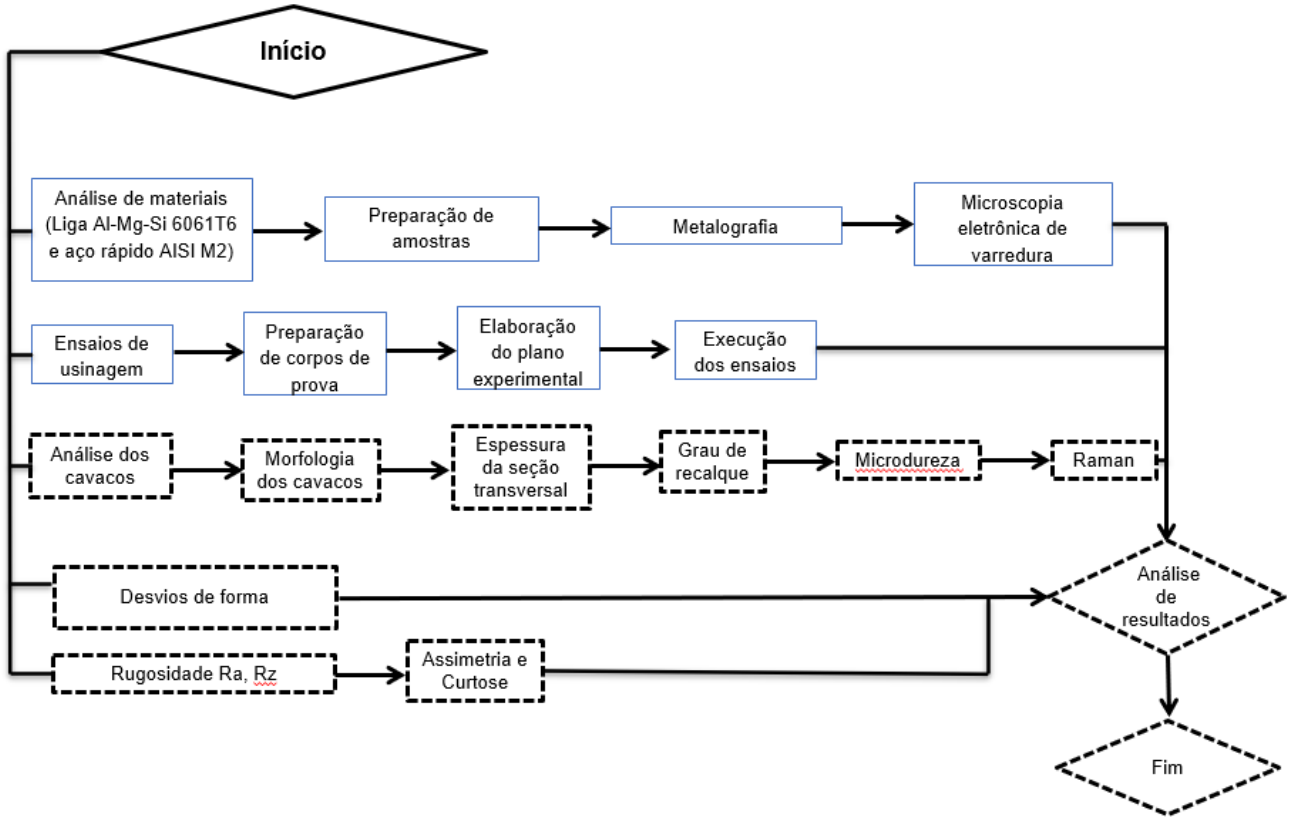
García-Jurado et al. (2015) estudaram as influências dos parâmetros de corte tais como avanço, velocidade corte e profundidade de usinagem sobre a rugosidade (parâmetros de R_{sk} e R_{ku}) e a adesão indireta/secundária durante o torneamento a seco de um liga Al-Cu. A partir desses estudos os autores fizeram algumas conclusões a respeito da rugosidade: em velocidade de corte constante, o R_{sk} foi proporcional ao avanço. Para o R_{ku}, a relação foi contrária, sendo inversamente proporcional ao avanço. Quando os autores mantiveram o avanço constante, R_{sk} e R_{ku} não apresentam tendência linear para a velocidade de corte.

Ba (2022) realizou experimentos para estudar o comportamento dos parâmetros de R_{sk} e R_{ku} na furação a seco da liga Al-Mg-Si 6351-T6 sobre a influência do avanço e da velocidade de corte. De acordo com os estudos, foi verificada a influência significativa da velocidade de corte em efeito quadrático sobre R_{sk}; foi verificado também a transição de R_{sk}, de valores positivos para negativos, com o aumento da V_c, indicando a hipótese de melhoria de rugosidade em função desse parâmetro de usinagem, tanto na redução da amplitude média das asperezas quanto na redução da predominância de picos acima da linha média. Já o parâmetro R_{ku} indicou a predominância de picos e vales com extremidades pontiagudas em todo o domínio experimental, principalmente quando maximizado o avanço. Além disso, o efeito do DLC sobre a rugosidade não foi expressivo conforme esperado, no entanto, não houve perda de qualidade da textura superficial e, além disso, próximo às arestas de corte e transversal foram observadas alterações do DLC que, no entanto, não prejudicaram a rugosidade do ponto de vista estatístico.

3. METODOLOGIA

Para apresentar de forma clara os procedimentos experimentais, foi elaborado um fluxograma na intenção de visualizar e compreender onde resume todas as etapas estabelecidas para alcançar os objetivos do trabalho, apresentado na Figura 19. O presente trabalho foi uma sequência do trabalho desenvolvido por BARBOSA (2024). O processo de furação das barras de Al-Mg-Si 6061-T6 foi realizado e os cavacos gerados no processo foram coletados e armazenados para início dos estudos.

Figura 19: Fluxograma do procedimento experimental do estudo



Fonte: Elaborado pela Autora.

3.1. Materiais utilizados nos experimentos

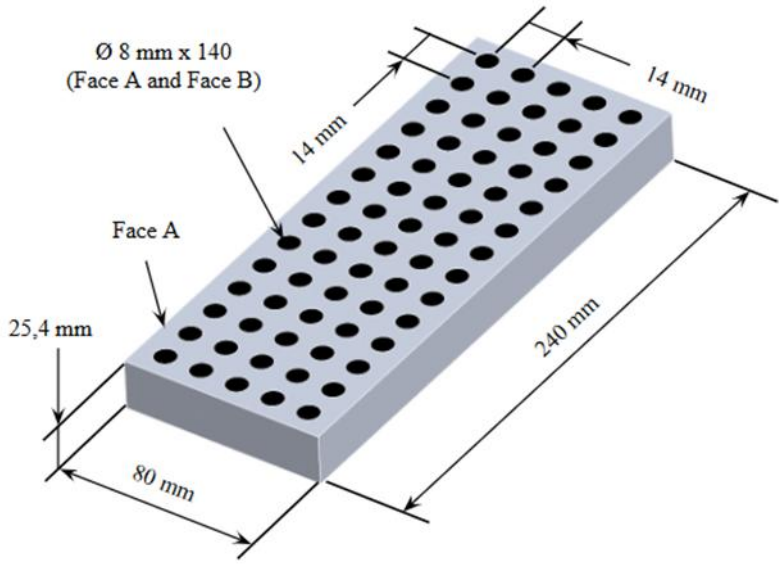
Foram usados os seguintes materiais para a realização do estudo: (1) liga de alumínio Al-Mg-Si 6061-T6 como material de usinagem (corpos de prova para a furação); (2) o aço-rápido AISI M32 para a fabricação das ferramentas de corte; (3) o

revestimento DLC, aplicado sobre uma das ferramentas de corte utilizada no processo de usinagem.

3.1.1. Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova para os ensaios de usinagem foram preparados a partir de barras em liga de alumínio 6061-T6 de seção retangular com 25,4 mm de espessura, 80 mm de largura e 240 mm de comprimento, conforme mostrada na Figura 20.

Figura 20: Barra de alumínio

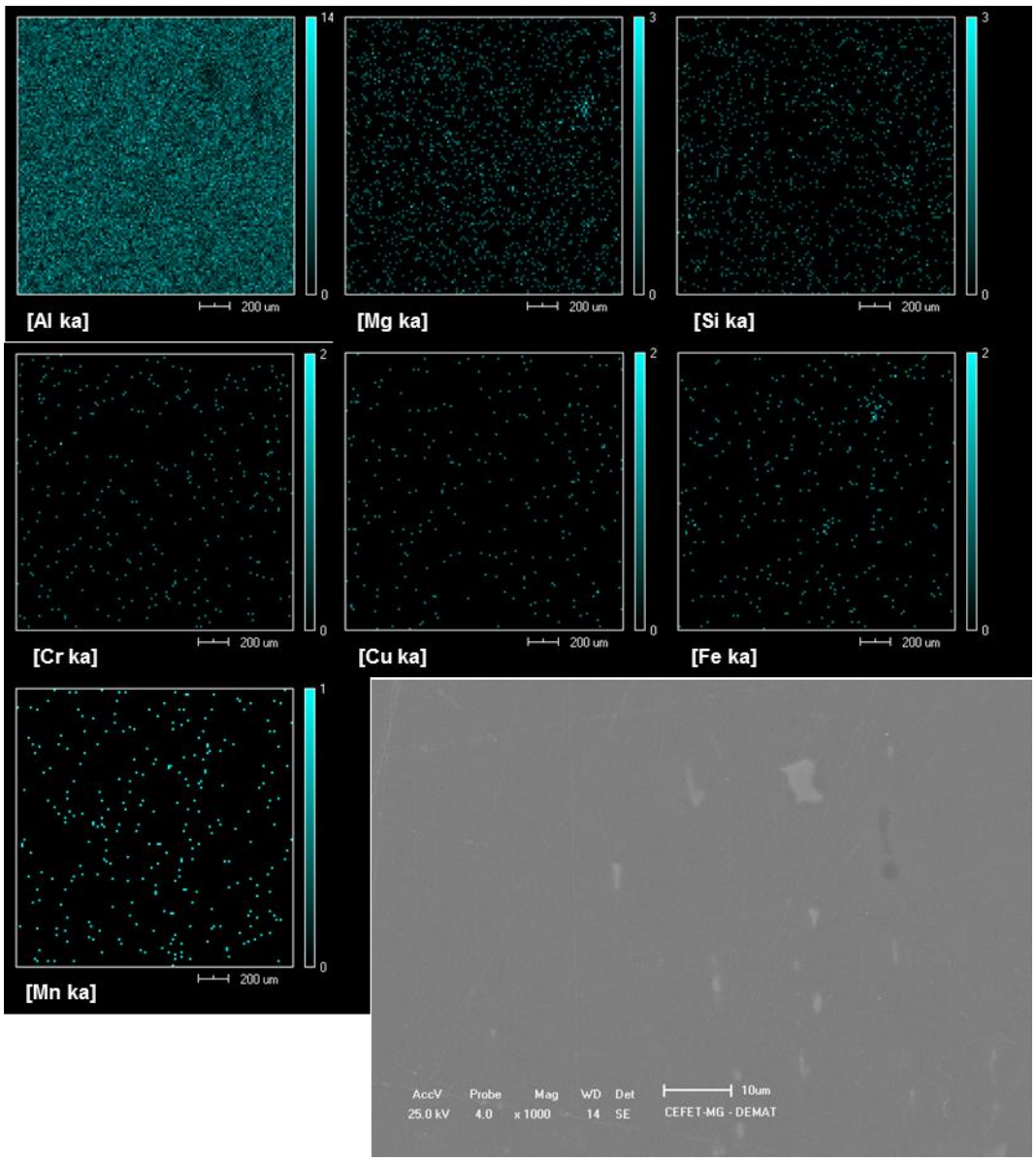


Fonte: Elaborado pela Autora.

A composição química da liga de alumínio, conforme a Aluminium Association (2018), apresenta os elementos químicos dentro das respectivas faixas percentuais em peso: 0,40 % a 0,80 % de silício, 0,8 % a 1,2 % de magnésio, 0,15 % a 0,40 % de cobre, e 0,04 % a 0,35 % de cromo. Elementos como o ferro, o manganês, o zinco e o titânio são especificados de acordo com limites máximos toleráveis, respectivamente em 0,7 %, 0,15 %, 0,25 % e 0,15 %. De acordo com os experimentos de Barbosa (2024), é apresentado na Figura 21 os elementos químicos identificados na análise de mapeamento químico realizado sobre a superfície da liga de alumínio e é possível

observar a predominância do silício e o magnésio que são os principais elementos de liga.

Figura 21: Análise da composição química da liga Al-Mg-Si-T6



Fonte: Barbosa (2024).

3.2. Ensaios de furação com broca com e sem filme DLC

Para cada ensaio estabelecido, cada conjunto de placas formando o corpo de prova (Figura 20) foi enumerado antes de ser utilizado, totalizando 24 corpos de prova sendo divididos em três grupos com 8 corpos de prova para cada grupo. O grupo 1

utilizando ferramentas de aço rápido sem revestimento, grupo 2 com revestimento de DLC Standard e grupo 3 com revestimento de DLC Star (Tabela 5). Para cada corpo de prova, foram usinados 70 furos em cada face da barra, totalizando 140 furos em cada corpo de prova. Ao todo foram usinados 1120 furos em cada grupo, totalizando 3360 furos nas 24 barras. A placa de alumínio foi fixada na mesa do centro de usinagem, como pode ser observado na Figura 22, e o torquímetro foi utilizado no aperto dos parafusos de fixação na máquina. Os parâmetros de corte para ambos os grupos foram V_c = 160 m/min e f = 0,2 mm/rot, trabalhados sem lubrificação.

Tabela 5: Plano experimental para realização dos ensaios de usinagem

Ensaio	Grupo	Revestimento	Quantidade de corpos de prova
1	1	Sem revestimento	8
2	2	DLC Standard	8
3	3	DLC Star	8

Fonte: Elaborado pela Autora.

Os ensaios de usinagem foram realizados no centro de usinagem CNC Romi Discovery 560, ilustrado na Figura 23. A broca foi fixada no mandril hidráulico com pinça de Ø 8 mm, mantendo-se constante a distância de 50 mm entre a ponta da broca e a face de referência do mandril.

Figura 22: Placa de alumínio posicionada para realizar os ensaios de furação



Fonte: Elaborado pela Autora.

Figura 23: Centro de usinagem CNC Romi Discovery 560



Fonte: Elaborado pela Autora.

Antes da realização de cada bloco de teste de furação, foi verificado o batimento radial da ferramenta, o desvio máximo observado foi de 0,01 µm. Na Figura 24 é

mostrado a montagem do relógio comparador analógico para avaliação do batimento. Em todas as verificações foram encontrados valores iguais a 0,01 mm.

Figura 24: Montagem do relógio comparador analógico



Fonte: Elaborado pela Autora.

3.2.1. Ferramentas de corte

As brocas de diâmetro 8mm também em aço rápido AISI M2 fabricadas pela empresa Nipo-tec em Jundiaí, são apresentadas na Figura 25, onde tem-se a primeira broca em AISI M2 e sem revestimento (A), a segunda broca com revestimento DLC STANDARD (B) e a terceira broca em revestimento DLC STAR (C). O processo de deposição dos revestimentos DLC STANDARD e DLC STAR nas brocas e placas em aço AISI M2 foram realizados na empresa Oerlikon Balzers em Jundiaí, São Paulo.

De acordo com Barbosa (2024), a composição química do aço rápido AISI M2 é apresentado na Tabela 6. Os elementos principais identificados na composição foram, carbono, silício, manganês, fósforo, enxofre, cromo, molibdênio, níquel, cobalto, cobre, vanádio, tungstênio, ferro e os elementos residuais identificados durante a análise foram considerados como “outros”.

Figura 25: Brocas em AISI M2 sem revestimento (A), com revestimento DLC STANDARD (B) e com revestimento DLC STAR (C)



Fonte: Elaborado pela Autora.

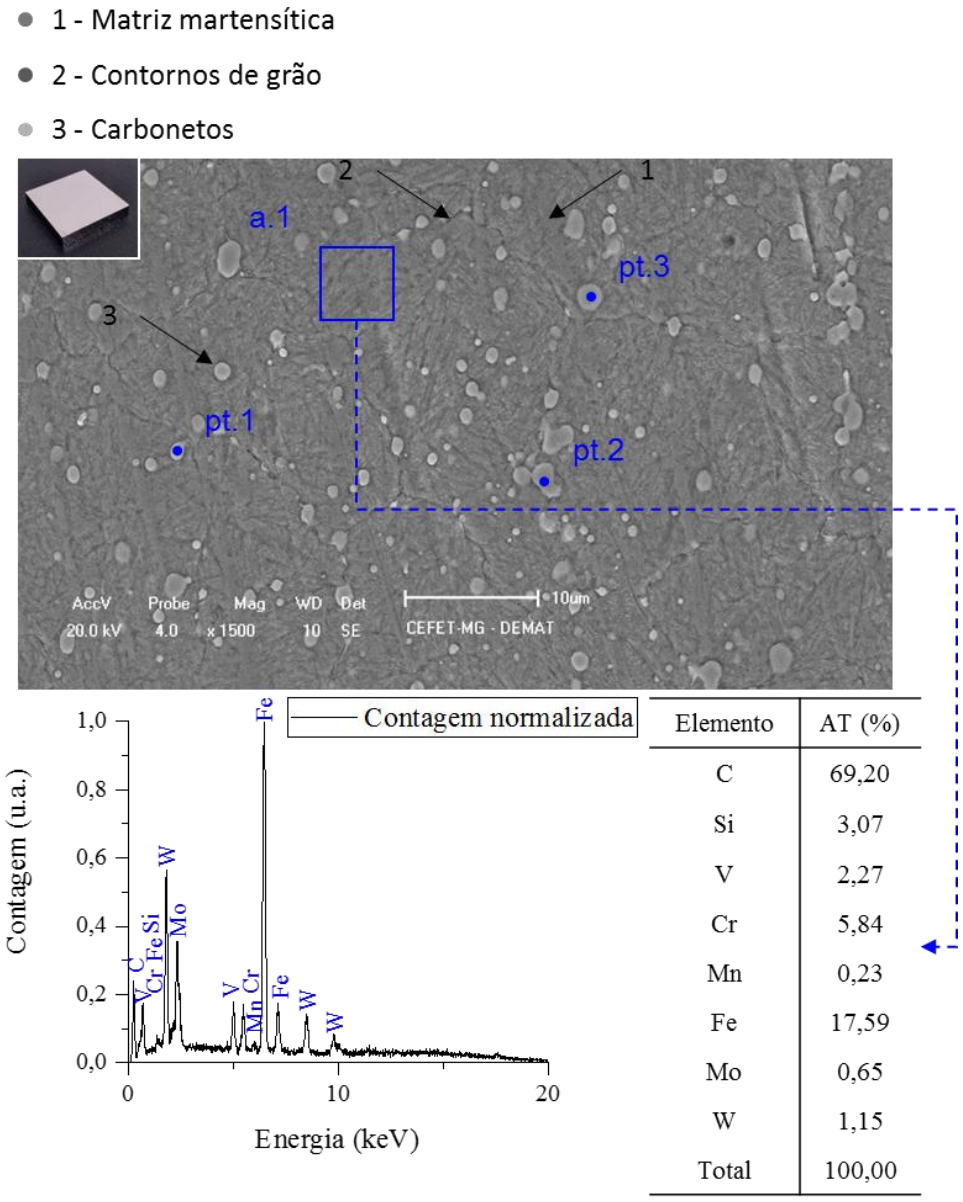
Tabela 6: Composição química do Aço Rápido AISI M2

Elemento	Concentração (%)	Incerteza de medição (%)
Carbono (C)	0,859	0,034
Silício (Si)	0,513	0,012
Manganês (Mn)	0,323	0,004
Fósforo (P)	0,023	0,002
Enxofre (S)	0,007	0,001
Cromo (Cr)	3,717	0,044
Molibdênio (Mo)	4,396	-
Níquel (Ni)	0,425	0,006
Cobalto (Co)	0,811	0,047
Cobre (Cu)	0,198	0,005
Vanádio (V)	1,729	0,102
Tungstênio (W)	5,766	0,167
Outros	0,162	-
Ferro (Fe) Balanço	80,682	-

Fonte: Elaborado pelo Autora.

Na Figura 26 é apresentada a micrografia do aço-rápido AISI M2 após ataque químico com solução Nital 3 % e registrada em MEV.

Figura 26: Análise da microestrutura do aço AISI M2



Elemento	AT (%)
C	69,20
Si	3,07
V	2,27
Cr	5,84
Mn	0,23
Fe	17,59
Mo	0,65
W	1,15
Total	100,00

Fonte: Barbosa (2024).

3.2.2. Revestimentos de DLC

As placas de aço AISI M2 de dimensões (5 x 30 x 30) mm, apresentadas na Figura 27, fabricados pela empresa Nipo-tec em Jundiaí são encontradas, respectivamente, sem revestimento (apenas aço rápido AISI M2), com revestimento de DLC STANDARD e com revestimento de DLC STAR.

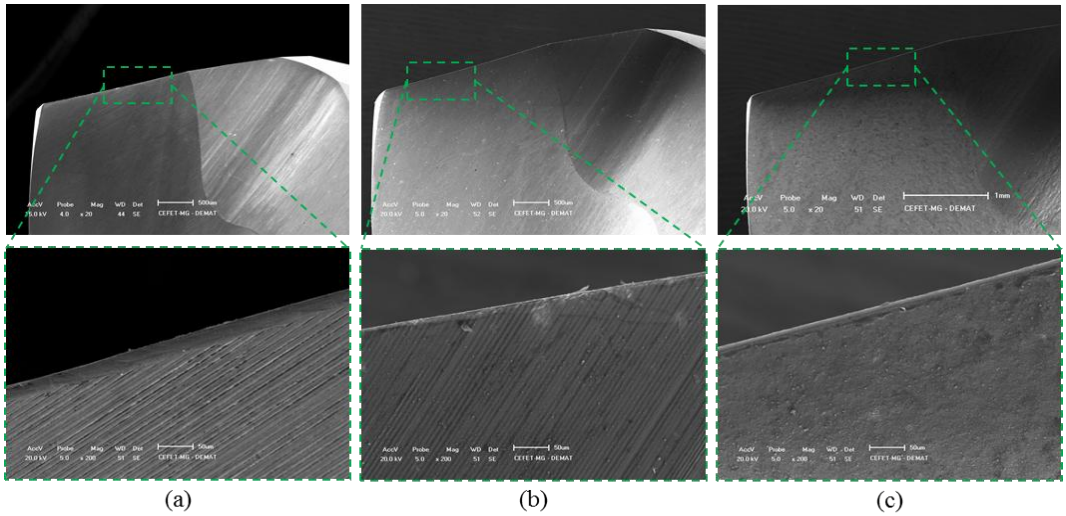
Figura 27: Placas de aço AISI M2 sem revestimento (A), com revestimento DLC STANDARD (B) e com revestimento DLC STAR



Fonte: Elaborado pelo Autora.

Para caracterização dos revestimentos, foi utilizado a microscopia eletrônica de varredura (MEV). Na Figura 28 são apresentadas imagens da superfície de saída das ferramentas de corte sem revestimento (a), com revestimento DLC Standard (b) e com revestimento DLC STAR. Inicialmente, as ferramentas de corte foram observadas com ampliação de 20X, notando-se aparentemente superfícies “lisas”. Em seguida, para aprofundar o nível de análise sobre as superfícies de saída, utilizou-se ampliação de 200X.

Figura 28: Imagens das ferramentas de corte sem revestimento (a), com revestimento Standard (b) e com revestimento Star (c) analisadas em MEV



Fonte: Barbosa (2024).

De acordo com Barbosa (2024), após a deposição do revestimento DLC Standard (Figura 28b), nota-se que as marcas de avanço do processo de retificação ainda permanecem sobre a superfície de saída. Nesse caso, sugere-se que a espessura desse revestimento não foi suficiente para sobrepor completamente as asperezas do substrato, o que não pode ser considerado como falha do processo de deposição. Já na Figura 28c verifica-se uma característica diferente onde existe uma superfície com ausência das marcas de avanço do processo de retificação, as quais foram cobertas completamente pelo revestimento DLC Star, formando uma nova superfície aparentemente porosa podendo indicar que o revestimento DLC Star é mais espesso do que o revestimento DLC Standard, provavelmente devido à camada primária de nitreto de cromo (CrN).

Conforme o estudo de Barbosa (2024) utilizando a Espectroscopia Raman, esses revestimentos são hidrogenados da classe a-C:H contendo estimativas dos conteúdos de hibridizações sp^3 de 33 % e 32 % e de hidrogênio 25 % e 26 %.

3.3. Análises dos Cavacos

Os cavacos oriundos do processo de usinagem foram coletados após algumas etapas durante o processo de furação e separados para análise. Esses cavacos foram separados em três grupos: (G1) cavacos oriundos do processo de furação com brocas sem revestimento; (G2) cavacos oriundos do processo de furação com brocas em revestimento de DLC Standard; (G3) cavacos oriundos do processo de furação com brocas em revestimento de DLC Star. Na Figura 29, é possível observar a forma como os cavacos foram separados em seus respectivos grupos.

Foram 16 pacotes de cavaco para cada um dos três grupos, cada pacote partindo de 1 até 70 furos. No total foram armazenados 48 pacotes contendo os cavacos do experimento.

Figura 29: Amostras de cavacos separados por grupos G1, G2 e G3



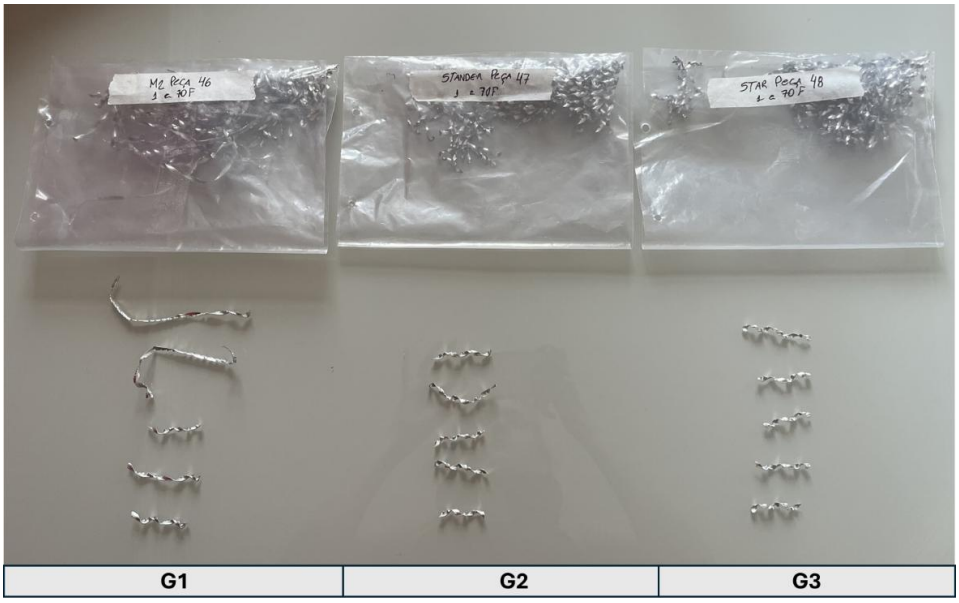
Fonte: Elaborado pelo Autora.

3.3.1. Morfologia e tipo do cavaco

Para cada grupo (G1, G2 e G3), foram separadas cinco amostras para análise da forma como é ilustrado na Figura 30. Para analisar a forma, foram registradas imagens dos cavacos para observar o padrão ligado diretamente ao tipo de processo de usinagem utilizado, no caso a furação, além do formato da ferramenta que é uma broca helicoidal.

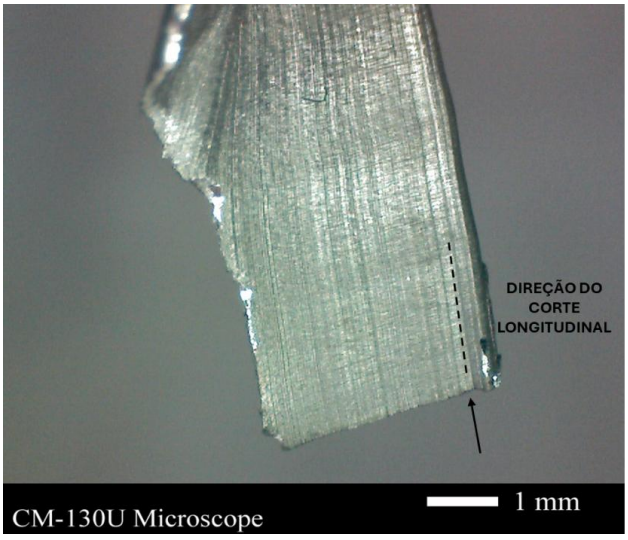
Para a análise do tipo de cavaco, foram separadas três amostras, uma de cada grupo e foi realizado um corte no sentido longitudinal da amostra, conforme representado na Figura 31. Posteriormente, as amostras foram embutidas em resina termofixa de cura a frio, lixada com lixas de granulometria 220, 320 e 500, polidas com pastas de diamante de grãos 6 µm, 3 µm, e 1 µm e, para finalizar, foi feito um ataque químico com ácido fluorídrico a 0,5% para ser analisado através do microscópio óptico com o equipamento Olympus BX60.

Figura 30: Amostras coletadas dos três grupos de cavaco para análise da forma



Fonte: Elaborado pelo Autora.

Figura 31: Corte longitudinal para análise do tipo do cavaco



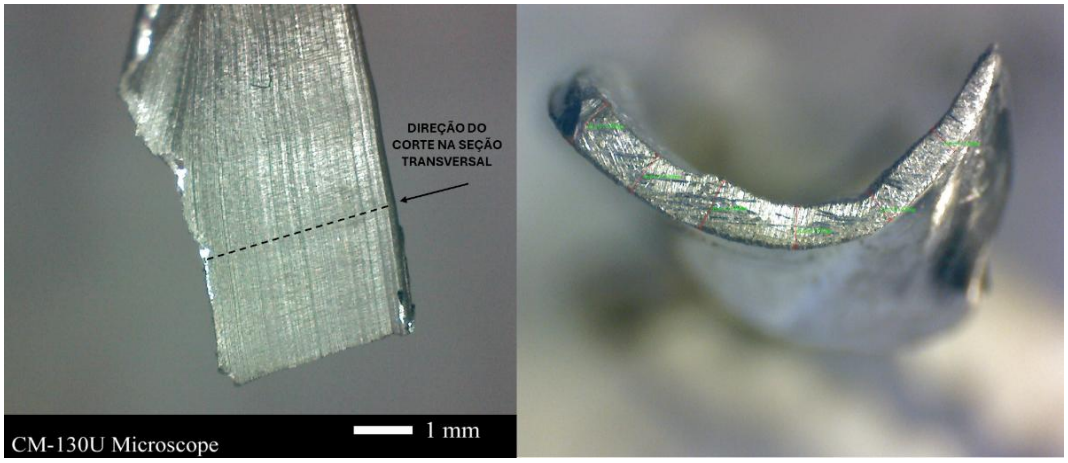
Fonte: Elaborado pelo Autora.

3.3.2. Grau de recalque

Para calcular a espessura do cavaco foi utilizado a micro retífica elétrica da marca WESCO WS3113KU, potência de 160 W, rotação de 8000-35000 rpm e equipado com disco de corte que foi utilizado para fazer um corte na seção transversal dos cavacos, de acordo com a Figura 32 e, posteriormente, foi utilizado a lixa para fazer o lixamento nas bordas para tirar a rebarba. Após esse processo, com o uso da câmera do Micrometer da marca DERMAZOOM com especificações de ampliação real 50 a 300x, iluminação de 8 LED's de luz branca fria que realça problemas e com pontos de foco 2 + 2 com os espaçadores AMPLIX em conjunto com o software DERMAZOOM foi feita a medição da espessura (h') do cavaco.

Cada grupo contém 8 barras de corpos de prova. Cada barra tem duas faces, totalizando 16 peças em cada grupo. Foram separadas 3 amostras de cavaco para cada uma das 16 peças. Em cada uma das amostras analisadas, foram realizadas 5 medições ao longo do cavaco e registrada em captura de imagem. Foram utilizadas 48 amostras em cada grupo. Após as cinco medições de espessura de cada uma das três amostras de cada peça, foi realizado a média aritmética total de cada peça. O processo se repetiu no restante das peças do grupo. Foi calculado a espessura do cavaco representativa de cada peça para avaliar o comportamento da espessura do cavaco ao longo dos 1000 furos usinados.

Figura 32: Corte na seção transversal do cavaco



Fonte: Elaborado pelo Autora.

É possível calcular o grau de recalque através da razão entre a espessura real do cavaco formado (h') e a porção teórica de material removida (h), de acordo com equação (3):

$$Rc = \frac{h'}{h} \tag{3}$$

Como já foi calculado a espessura (h'), foi necessário calcular o valor de (h) a partir da equação (4) para obter o valor de Rc. O ângulo de de posição principal da broca helicoidal é 70 graus.

$$h = f \times_{sin\, X_r} \tag{4}$$

Cada pacote de cavaco vai ter um resultado representativo do grau de recalque e, a partir disso, será possível averiguar o comportamento do grau de recalque ao longo da usinagem. Além disso, será possível fazer a comparação entre o grau de recalque obtido em cada um dos grupos G1, G2 e G3.

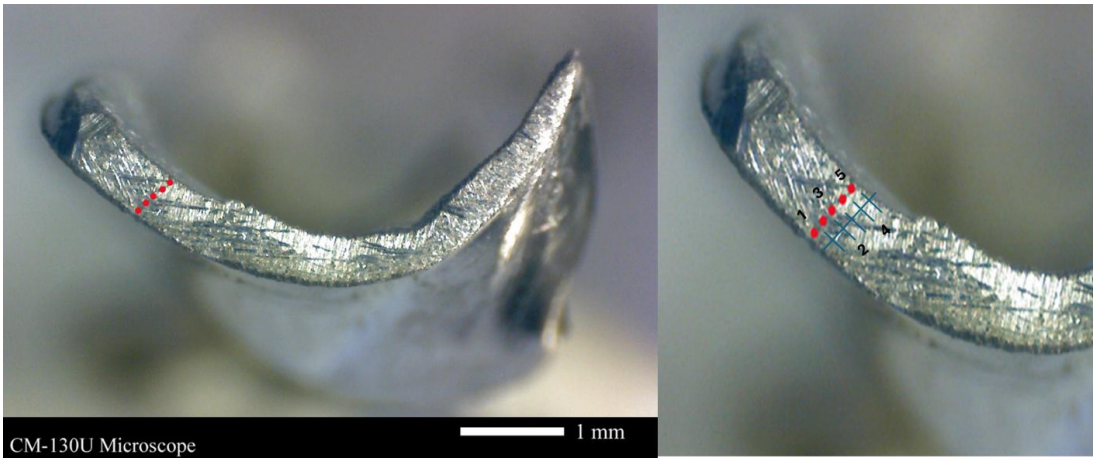
3.3.3. Microdureza do cavaco

Para avaliar a microdureza representativa dos cavacos, foram preparadas cinco amostras de cada grupo (G1, G2 e G3) permitindo que medições fossem realizadas ao longo da seção transversal. As amostras foram embutidas em resina termofixa de cura a frio, lixada com lixas de granulometria 220, 320 e 500, polidas com pastas de diamante de grãos 6 μm, 3 μm, e 1 μm.

Os cavacos foram embutidos em formato de U com as duas pontas de suas seções transversais viradas para cima e foram realizados cinco indentações em uma das seções transversais expostas no embutimento. As medições de microdureza Vickers foram realizadas no microdurômetro HSV-20, aplicando-se cargas constantes de 200 g, com um penetrador de diamante piramidal altamente polido, pontiagudo e de base quadrada com ângulos de face de 136° 0' com tempo de aplicação da força de teste variando entre 5 e 7 segundos e tempo de permanência da força de ensaio compreendido entre 13 e 15 segundos e, após a remoção da força de teste, os comprimentos das duas diagonais da área projetada da indentação são medidos para calcular o número de dureza Vickers.

Foram realizadas cinco indentações na seção transversal do cavaco de cada uma das amostras para obter a média da microdureza, como é representado na Figura 33.

Figura 33: Indentações na seção transversal do cavaco para avaliar microdureza



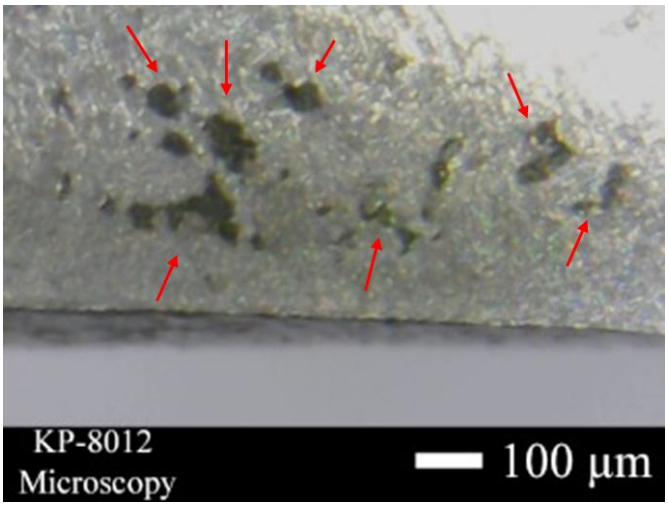
Fonte: Elaborado pelo Autora.

3.3.4. Presença de DLC na superfície do cavaco

Para investigar o comportamento da presença do DLC na superfície do cavaco, a partir das amostras coletadas, foram procurados cavacos que apresentam vestígios de adesão do revestimento e, caso encontrado, as amostras serão analisadas através do ensaio de espectroscopia Raman, realizado na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) no departamento de Química utilizando o equipamento Senterra/Bruker. Na Figura 34 é possível observar uma amostra onde apresenta vestígios de revestimento, identificado pelas setas.

As análises por espectroscopia Raman foram realizadas em um equipamento Senterra da Bruker, conforme Figura 35, com um detector CCD, acoplado a um microscópio ótico (OLYMPUS BX51). Um laser de comprimento de onda 532 nm foi utilizado para excitar as amostras a uma potência de 10 mW. As medidas foram realizadas com 10 acumulações de 10 segundos em 5 diferentes pontos da amostra. Para a construção do espectro foi realizada uma média dessas medidas.

Figura 34: Vestígios de revestimento no cavaco



Fonte: Elaborado pelo Autora.

Figura 35: Equipamento utilizado para análises por espectroscopia Raman



Fonte: Elaborado pela Autora.

3.4. Textura superficial e desvios de forma

3.4.1. Assimetria e Curtose (R_{sk}), (R_{ku}), (R_a) e (R_z)

Parâmetros de assimetria (R_{sk}), curtose (R_{ku}), altura média (R_a) e altura máxima (R_z) foram analisados após os ensaios de usinagem como variáveis de resposta. A rugosidade na parede dos furos foi medida pelo método de contato com o rugosímetro Surtronic 3+ de resolução 0,001 micrometros, conforme Figura 36. As configurações do rugosímetro são apresentadas na Tabela 7.

Figura 36: Rugosímetro utilizado nas análises dos parâmetros de superfície



Fonte: Elaborado pela Autora.

Tabela 7: Configurações do rugosímetro

Norma de medição	ISO 1997
Filtro	GAUSS
Cut-off	0,8 mm
Número de cut-offs	5
Ponta de prova	Diamante
Raio da ponta de prova	5 µm

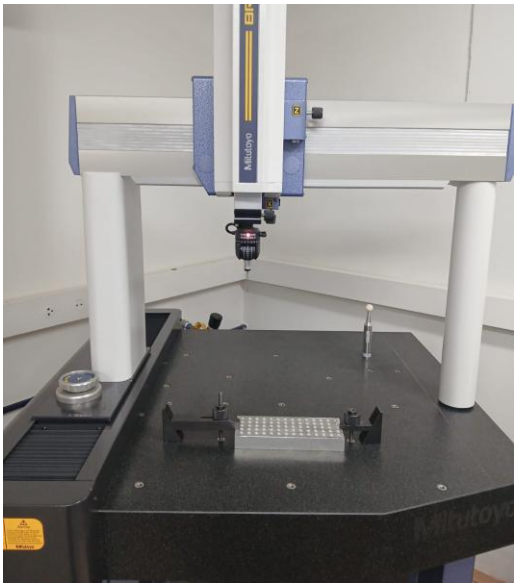
Fonte: Elaborado pela Autora.

Foram selecionados cinco furos de cada face dos corpos de prova e, em cada um deles, foi realizado uma medição na superfície interna dos furos no sentido do comprimento interno. Sendo assim, foi posicionado a ponta de prova na superfície interna do furo e foi percorrido 11mm (profundidade do furo) com a ponta no sentido do comprimento interno. Em seguida, considerou-se um valor médio aritmético dos parâmetros mensurados para todos os furos de prova. Com isso, cada face apresenta um valor representativo dos parâmetros de rugosidade em função das medições unitárias em cada face. A medição foi realizada a (20 ± 1) °C de acordo com o certificado de calibração.

3.4.2. Desvio de cilindricidade e diâmetro

O procedimento para calcular os desvios de diâmetro e de cilindricidade foi realizado no laboratório de Metrologia da Universidade Federal de Uberlândia, em um ambiente climatizado com temperatura de 20 ± 1 °C e humidade relativa de ≈ 50 % e foi utilizado o equipamento Mitutoyo Crysta-Plus BR-M443 como mostra a Figura 37 que é uma máquina de medição em três coordenadas com apalpador esférico (2 mm) de rubi, 0,5 µm de resolução e ± 3,5 µm de precisão (em medição de comprimento). Para obter maior confiabilidade dos resultados de medição, considerou-se um desvio máximo de calibração igual a 2 µm que foi realizada com uma esfera-padrão de cerâmica. Os desvios foram adquiridos por meio do software MCOSMOS que é parte integrante da tecnologia MiCAT do equipamento.

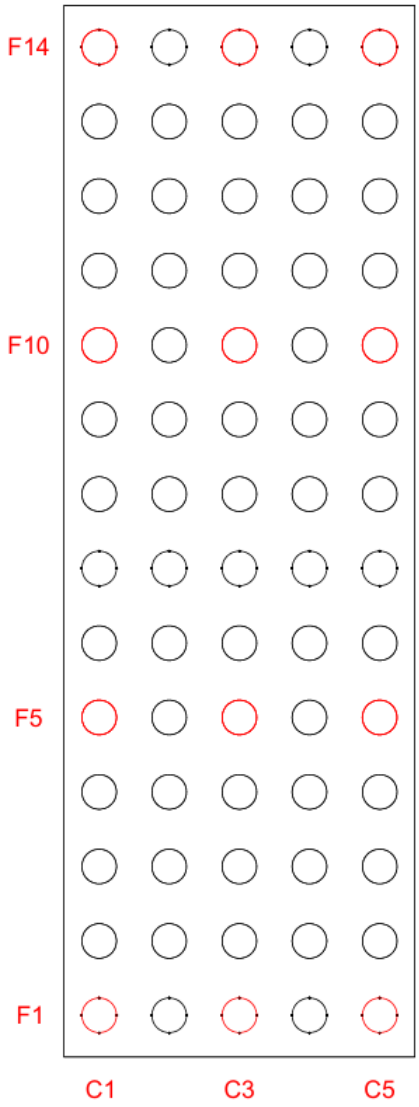
Figura 37: Equipamento utilizado para mensurar os desvios de cilindricidade e diâmetro



Fonte: Elaborado pela Autora.

Para estabelecer o sistema de coordenadas de medição, primeiramente foi selecionada uma região sobre a mesa na qual o corpo de prova seria constantemente fixado. Em seguida, criaram-se os planos de referência XY, XZ e YZ, a partir das faces do corpo de prova. Para medição, foram selecionados os furos 1, 5, 10 e 14 das colunas 1, 3 e 5, conforme representado na Figura 38 onde a letra C significa a coluna e a letra F o furo. Foi realizado um ciclo em cada furo pois não houve variação considerável dentro dos furos e, sendo assim, para cada peça foram feitas 12 leituras.

Figura 38: Representação das medições dos desvios a partir dos furos e colunas



Fonte: Elaborado pela Autora.

Os desvios foram obtidos a partir de quatro pontos de contato do apalpador, defasados em 90° ao longo do perímetro. No caso do desvio de cilindricidade, esses pontos de medição foram estabelecidos em três planos imaginários ao longo do comprimento útil do furo, espaçados em aproximadamente 3 mm a partir do plano XY. Para cada corpo de prova, foi considerado um valor médio aritmético resultante de todos os valores unitários obtidos em cada furo.

3.5. Análise estatística

Para a análise estatística, inicialmente foram realizadas análises descritivas seguidas pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilk (WILK, 1965). Nesse contexto, o valor de *p* obtido no teste indica a probabilidade de observar os dados caso a hipótese nula de normalidade seja verdadeira. Valores de *p* inferiores a 0,05 sugerem que os dados não seguem distribuição normal, enquanto valores superiores a 0,05 indicam que não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese de normalidade.

Nos casos em que os dados apresentaram distribuição normal ($p > 0,05$), foi utilizada a estatística inferencial paramétrica, por meio da ANOVA One-Way, proposta originalmente por Fisher (1925), a fim de comparar as médias entre três ou mais grupos independentes. Por outro lado, quando os dados não atenderam ao pressuposto de normalidade ($p < 0,05$), aplicou-se o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis (WALLIS, 1952), adequado para verificar diferenças significativas entre grupos independentes.

Em ambas as situações, quando os testes inferenciais (ANOVA ou Kruskal-Wallis) indicaram significância estatística ($p < 0,05$), procedeu-se à aplicação de testes post-hoc, com o objetivo de realizar comparações múltiplas entre pares de grupos e identificar quais deles apresentaram diferenças significativas. Nos casos em que não foi observada significância ($p > 0,05$), concluiu-se que a variável dependente não foi influenciada pela variável independente. A ferramenta utilizada para análise foi o software Statistica.

4. RESULTADOS

4.1. Análises do cavaco

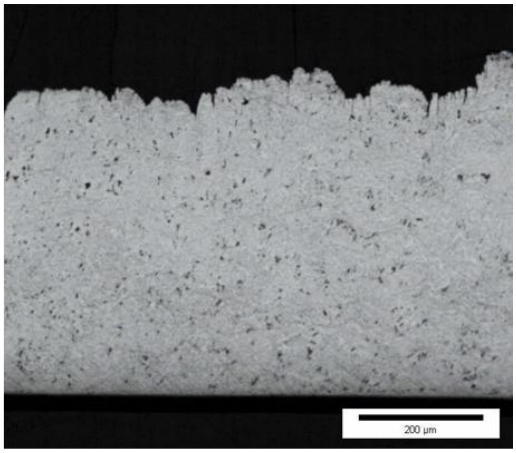
4.1.1. Tipo do cavaco

De acordo com Cavalcanti (2024), o tipo do cavaco está ligado diretamente ao material utilizado no processo, no caso o alumínio que possui como propriedade mecânica a ductilidade. Na Figura 39 são apresentadas a micrografia da seção transversal das amostras de cavacos dos grupos G1 (a), G2 (b) e G3 (c). Em ambas as micrografias, a microestrutura se revelou ser similar em todos os grupos: precipitados de Mg_2Si e/ou vazios, em tonalidades mais escura dispersos na matriz de alumínio, em tonalidade mais clara. Por outro lado, em se tratando da formação do cavaco, a microestrutura não aparentou ser deformada plasticamente pelo efeito da zona de cisalhamento secundária na interface cavaco-ferramenta. Na interface, a adesão é completa e a velocidade de escorregamento também é nula. Na medida em que se afasta dessa interface, ao longo da espessura do cavaco, a velocidade de escorregamento assumi valores crescentes, o que resulta em uma microestrutura com “linhas” de deformação plástica.

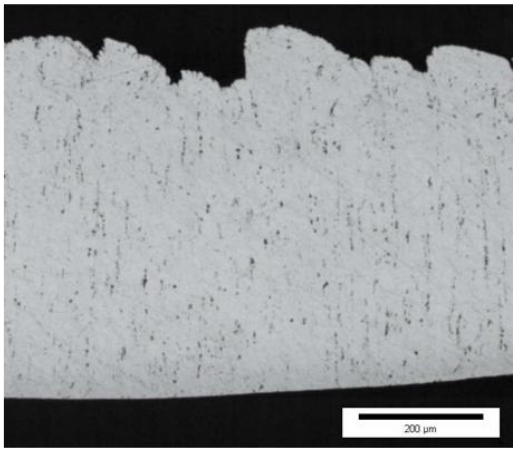
Geralmente, essas linhas que se estendem as extremidades inferior e superior do próprio cavaco, representando a deformação plástica ocorrida no plano de cisalhamento. Na extremidade inferior (raiz do cavaco) onde existe o contato com a ponta da cunha de corte, pode ocorrer a nucleação e a propagação de trinca, gerando a ruptura do material. No entanto, pela natureza do material que é dúctil e suporta as altas tensões de compressão, essa trinca não se propaga completamente ao longo do plano de cisalhamento, caracterizando o tipo do cavaco como contínuo.

Figura 39: Micrografia da seção transversal das amostras de cavacos dos grupos G1 (a), G2 (b) e G3 (c)

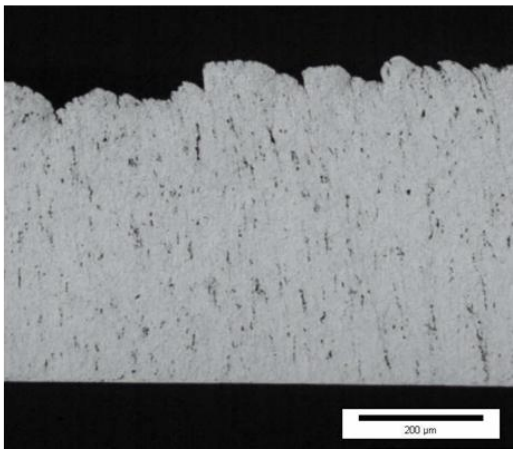
(a)



(b)



(c)

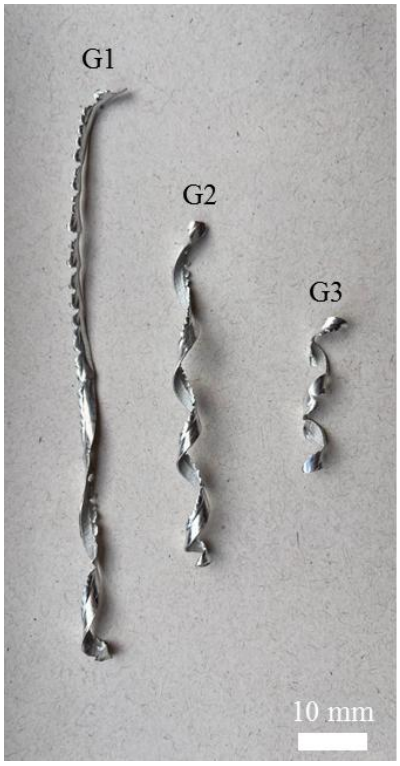


Fonte: Elaborado pela Autora.

4.1.2. Forma do cavaco

Sobre a forma do cavaco, a partir das análises a olho nu dos cavacos coletados, foi possível observar o padrão ligado diretamente ao tipo de processo de usinagem utilizado, no caso, a furação, utilizando uma broca helicoidal dando origem a cavacos de forma cônico helicoidal, conforme Figura 40.

Figura 40: Formato dos cavacos dos grupos G1(a), G2 (b) G3 (c)



Fonte: Elaborado pela Autora.

O cone se forma devido à peculiaridade do processo de furação: a variação da velocidade de corte nas arestas principais de corte. A variação entre um valor próximo ao nulo (no núcleo da ferramenta) até atingir o valor máximo (na extremidade da ferramenta) promover uma variação na velocidade de formação do cavaco ao longo da aresta de corte. Essa variação faz com o que o cavaco escoe sobre a superfície de saída realizando uma espécie de curvatura que gera a formação do cone. Quando se adiciona o movimento de avanço, na medida em que a ferramenta avança linearmente sobre a superfície do material, esses cones se formam continuamente e

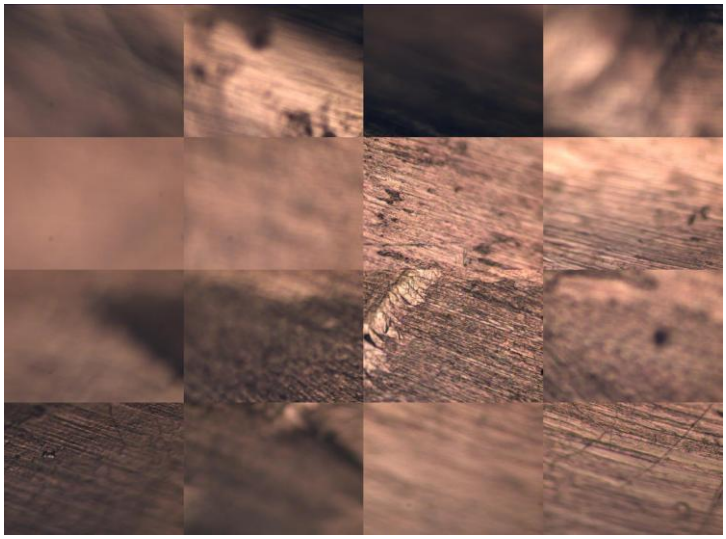
se sobrepõem com um “passo” constante. Daí surge a denominação “cavaco tipo parafuso” que é apresentada em alguns estudos (MUHAMMAD et al., 2020).

Com a ferramenta sem revestimento do G1, foram encontradas algumas amostras de cavaco com características similar a fitas e mais longos que não foram encontrados nos cavacos do G2 e G3, que podem indicar um possível efeito mais acentuado da temperatura de usinagem pois os parâmetros de entrada foram os mesmos. A partir disso, existe uma possibilidade do revestimento de DLC promover um equilíbrio na temperatura, tornando-a mais linear e contribuindo na melhora da formação do cavaco.

4.1.3. Presença de DLC na superfície do cavaco

Na Figura 41 é apresentada a imagem registrada no microscópio durante a análise Raman realizada sobre a superfície da amostra de cavaco do grupo G1. Diferentes qualidades de foco foram obtidas durante a varredura, devido à natureza do equipamento que registra uma imagem geral sobre uma área total. Nessa área existe uma divisão entre pequenas áreas de análise e, devido as diferenças de nível da superfície que está sendo analisada o foco é diferente. Sendo assim, as varreduras Raman foram feitas nas regiões em que os focos foram melhores/mais nítidos.

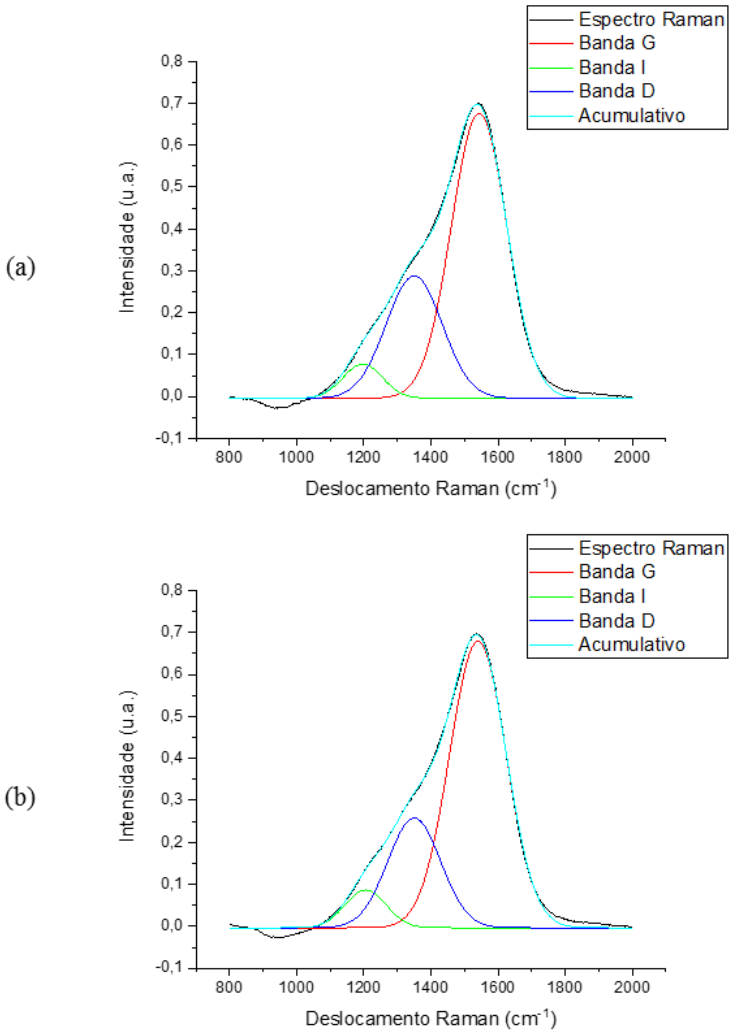
Figura 41: Varreduras realizadas por espectroscopia Raman na amostra do G1



Fonte: Elaborado pela Autora.

Barbosa (2024) realizou as deconvoluções gaussianas nos espectros Raman dos revestimentos de DLC do tipo A e B, apresentados na Figura 42. Sendo assim, é importante ressaltar que o espectro G1 não tem o perfil que se esperava para análise de uma amostra com superfície revestida em DLC pois é o cavaco analisado do grupo em que não foi utilizado ferramenta revestida.

Figura 42: Deconvoluções gaussianas realizadas nos espectros Raman dos revestimentos de DLC Tipo A (a) e Tipo B (b)

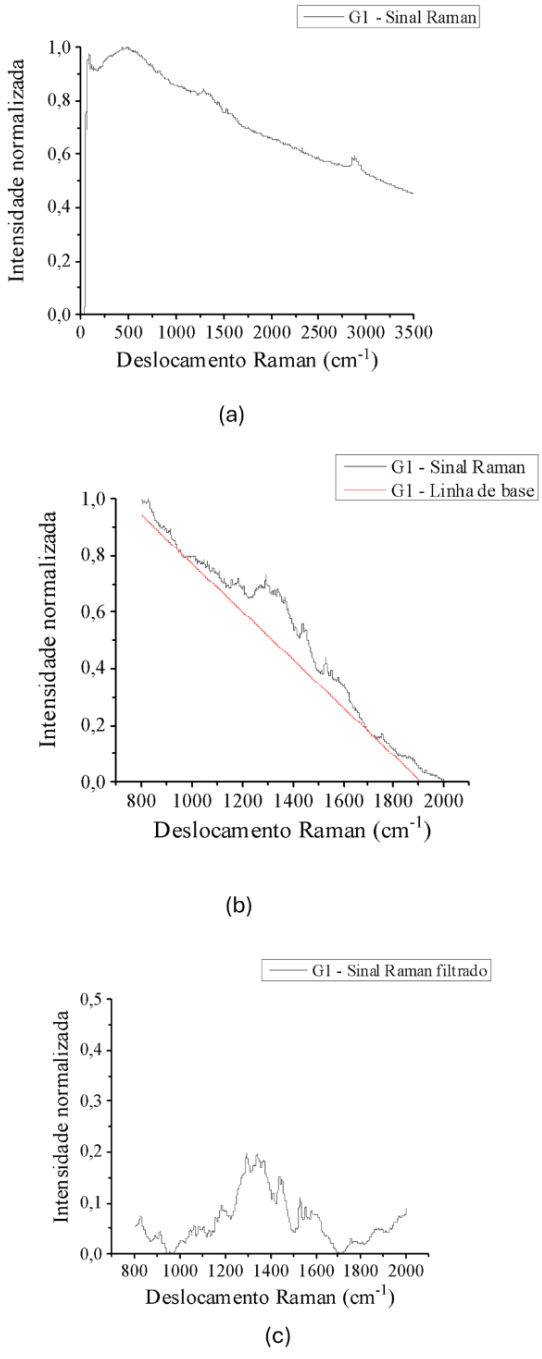


Fonte: BARBOSA (2024).

Na Figura 43(a), é possível observar o deslocamento Raman de 0 a 3500 cm^{-1} que é referente ao espectro geral. Já na Figura 43(b) o espectro está compreendido entre 800 e 2000 cm^{-1} que é intervalo onde geralmente é analisado o espectro para

identificar as bandas D e G do DLC. Além disso, é traçado a linha de base para avaliar o fenômeno de fotoluminescência. Na Figura 43(c) observa-se a subtração da linha de base e o espectro perde a inclinação e é nesse espectro que é feito a deconvolução (Senna et al. 2019).

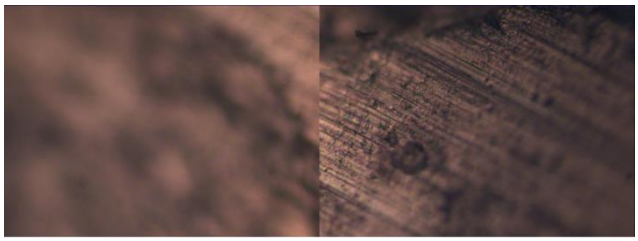
Figura 43: Espectros da análise Raman do G1



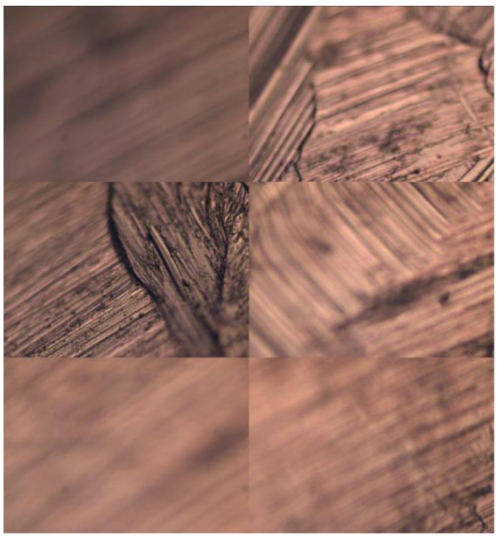
Fonte: Elaborado pela Autora.

A Figura 44(a) e Figura 44 (b) são respectivamente as amostras do Grupo 2 e Grupo 3. Nas figuras, as regiões escuras, observadas nas áreas focalizadas, podem ser efeitos de sombreamento, vazios (falhas) na superfície e/ou formação de óxidos que podem ser formados na própria superfície do cavaco.

Figura 44: Varreduras realizadas por espectroscopia Raman nas amostras do G2 (a) e G3 (b)



(a)



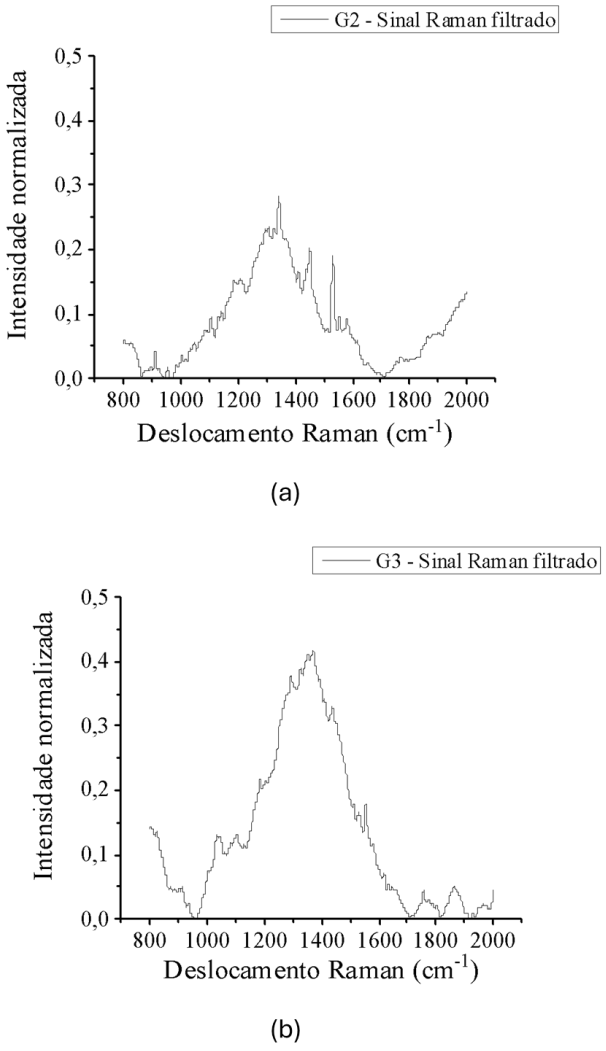
(b)

Fonte: Elaborado pela Autora.

Na Figura 45(a) é representado o sinal Raman filtrado para o G2 e na Figura 45(b) para o G1. Os espectros no G2 e G3 se mantiveram similares ao espectro do G1 não sendo semelhante ao espectro esperado de um DLC puro conforme resultados das deconvoluções gaussianas apresentado por Barbosa et al. (2024), levantando a hipótese de que não foi possível encontrar vestígios de DLC no cavaco

e consequentemente não sendo possível afirmar que houve perda de revestimentos das ferramentas por desplacamento. Sendo assim, através da espectroscopia Raman não foi possível confirmar se houve presença de revestimento de DLC no cavaco pois não foram apresentadas bandas I, D e G, tornando a análise inconclusiva e subjetiva.

Figura 45: Gráficos da análise Raman do G2 (a) e G3 (b)



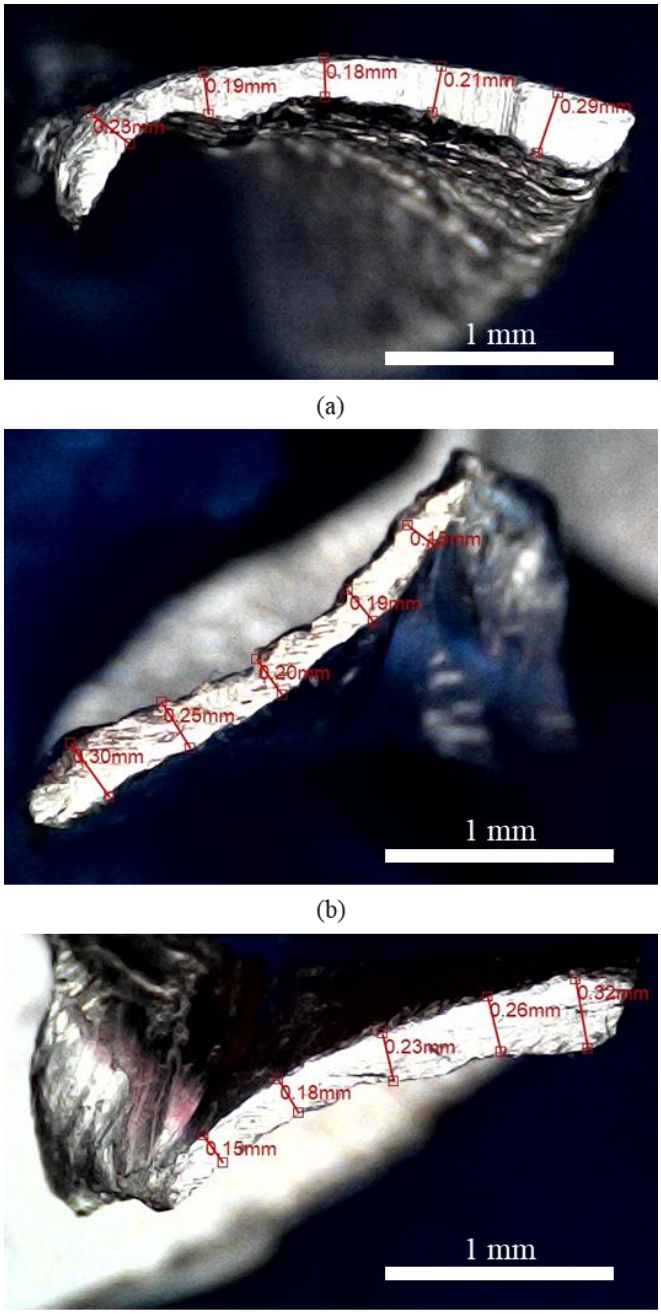
Fonte: Elaborado pela Autora.

4.1.4. Grau de recalque

Na Figura 46 são apresentadas as amostras representativas dos cavacos utilizados para determinar a espessura média aritmética h'. Os valores obtidos nas amostras G1 (Figura 46a), G2 (Figura 46b) e G3 (Figura 46c) foram, respectivamente,

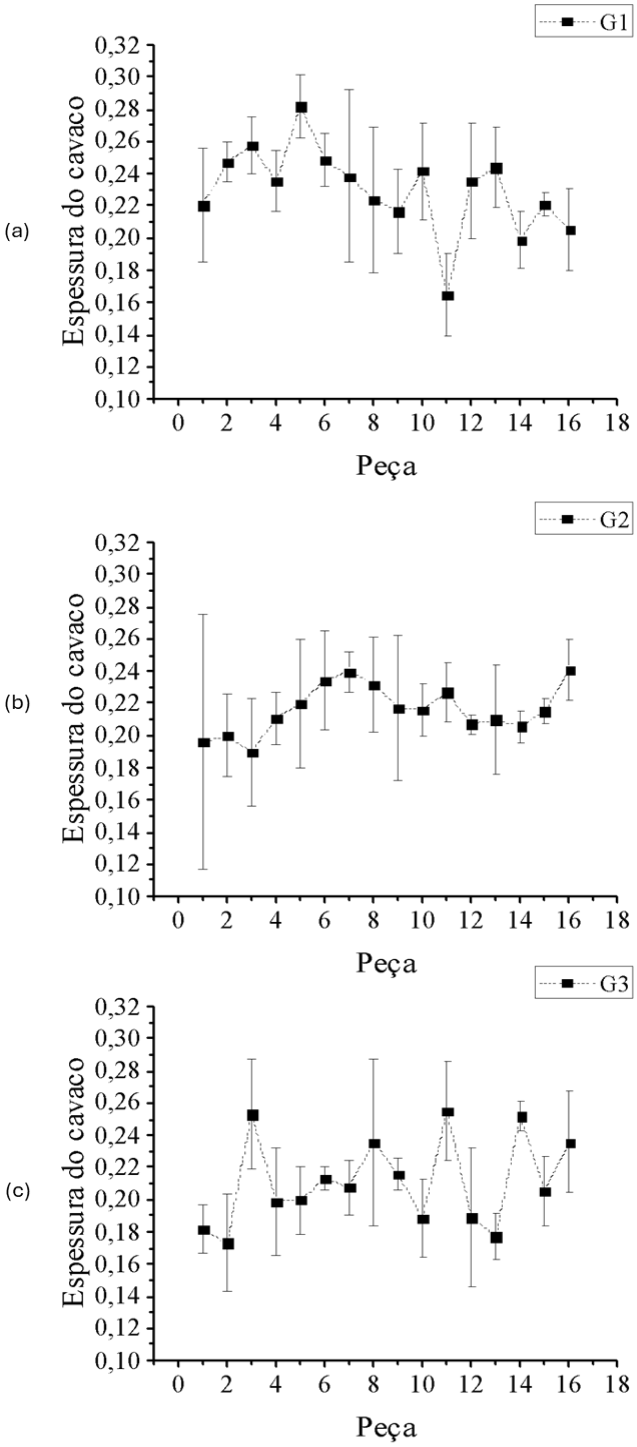
0,23 ± 0,04 mm, 0,22 ± 0,05 mm e 0,23 ± 0,05 mm, conforme representado nos gráficos da Figura 47. Esses resultados não demonstraram, a princípio, haver diferenças na espessura do cavaco em função dos revestimentos.

Figura 46: Ilustração dos valores de espessura obtidos na seção transversal das amostras de cavacos dos grupos G1(a), G2 (b) G3 (c)



Fonte: Elaborado pela Autora.

Figura 47: Ilustração do comportamento da espessura média dos cavacos ao longo da usinagem das peças dos grupos G1 (a), G2 (b) e G3 (c)



Fonte: Elaborado pela Autora.

Em ambas as amostras, é interessante notar a forma como se dá o perfil da seção transversal dos cavacos. O perfil pode ser caracterizado como um arco cuja espessura é crescente entre uma extremidade à outra. Essa característica é intrínseca ao processo de furação, e pode ser justificada pela variação da velocidade de corte ao longo da aresta principal de corte. Apesar do avanço ser diretamente relacionado com a espessura de corte h, é importante salientar a necessidade do movimento de corte para ser formado, no mínimo, um único cavaco. Como o avanço é constante ao longo da aresta principal de corte, a velocidade de corte torna-se a única variável influente na curvatura e na espessura do cavaco. Nesse caso, pode-se supor que a espessura também seja proporcional à velocidade de corte.

Ao mensurar as amostras de cavaco ao longo dos 1120 furos usinados, conforme apresentado em resumo na Figura 46, foi possível observar o comportamento da espessura média do cavaco em todas as peças usinadas, conforme Figura 47. Em geral, pôde-se observar que a maior variação entre os valores médios aritméticos foi compreendida entre 0,16 mm e 0,28 mm no grupo G1, representado pela Figura 47(a). Nos demais grupos, essa variação aparentou ser menor, destacando-se o G2 representado na Figura 47(b) que apresentou um comportamento mais estável ao longo das peças usinadas.

Conforme observado na Tabela 8, O grau de recalque do G1 foi o que apresentou o maior valor: 1,53 ± 0,18. Como o processo de furação foi obtido através da usinagem a seco, a ausência de lubrificação gera um maior atrito além de faltar um meio que favoreça o transporte e a expulsão dos cavacos, provocando um aumento das temperaturas (BA, 2022). Sendo assim, o resultado do G1 apresentando um maior valor de grau de recalque indica que houve maior deformação sofrida pelos cavacos, além de uma baixa velocidade de saída dos cavacos.

Para os grupos G2 e G3 que utilizaram revestimento de DLC, os resultados do grau de recalque foram aproximados, sendo 1,43 ± 0,12 e 1,40 ± 0,16 respectivamente. Esses valores foram menores em relação ao G1, indicando que a deformação sofrida pelos cavacos foi menor utilizando os revestimentos do tipo A (G2) e do tipo B (G3). Os revestimentos atuaram como um lubrificante sólido no processo, assim como observado em outros estudos (GHOSH et al., 2015; Brzezinka et al., 2019; Grigoriev et al., 2022), promovendo um deslizamento mais suave entre as superfícies de contato, diminuindo assim a deformação dos cavacos quando

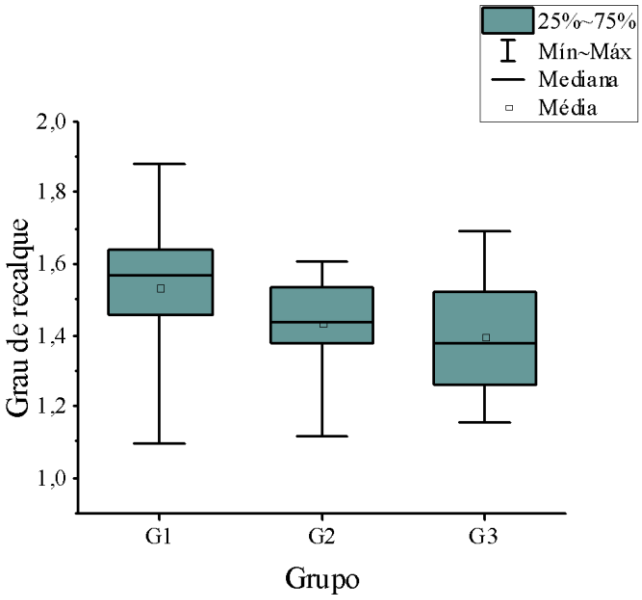
comparado ao grupo em que não foram utilizados revestimentos. Os resultados apresentados na Tabela 8 podem ser observados graficamente na Figura 48.

Tabela 8: Resultados da estatística descritiva e teste de normalidade

Variável	Média	Range do quartil	Desvio padrão	Coef. Var.	p-valor (Teste de normalidade)
G1 - h' (mm)	0,23	0,03	0,03	11,66	0,66
G1 - Rc	1,53	0,18	0,18	11,66	0,66
G2 - h' (mm)	0,21	0,02	0,02	8,90	0,41
G2 - Rc	1,43	0,15	0,13	8,90	0,41
G3 - h' (mm)	0,21	0,04	0,03	11,99	0,50
G3 - Rc	1,40	0,26	0,17	11,99	0,50

Fonte: Elaborado pela Autora.

Figura 48: Gráfico dos valores de Grau de recalque dos grupos G1, G2 e G3



Fonte: Elaborado pela Autora.

Na Tabela 9 são apresentados os resultados da estatística inferencial paramétrica (ANOVA One-Way) que é utilizada para comparar as médias de três ou mais grupos independentes, verificando se existe uma diferença estatisticamente significativa entre elas. Na Tabela 9, é evidenciado que ambas as variáveis dependentes foram influenciadas de forma significativa pela variável Grupo. Sua contribuição foi de aproximadamente 13%. Deve-se destacar a contribuição do efeito do erro, de aproximadamente 87%, maior do que o efeito do Grupo. O erro pode estar associado aos erros de medição e devido à variação da espessura do cavaco ao longo de sua seção transversal. Além disso, pode estar indicando que a variável avaliada pode conter outros fatores externos que contribuíram para esses resultados, como alguma outra variável por exemplo. Além disso, foram usinados 1.120 furos em cada grupo e a amostragem representa uma pequena parcela em relação ao total de furos, sendo uma representatividade pequena em relação a tudo o que ocorreu na usinagem.

Tabela 9: Resultados da estatística inferencial paramétrico

Variável dependente	Efeito	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	p-valor	Contribuição (%)
h'	Constante	1	2,283	2,283	0,000	-
	Grupo	2	0,004	0,002	0,047	13
	Erro	45	0,026	0,001	-	87
	Total	47	0,029	-	-	100
Rc	Constante	1	101,485	101,485	0,000	-
	Grupo	2	0,166	0,083	0,047	13
	Erro	45	1,144	0,025	-	87
	Total	47	1,310	-	-	100

Fonte: Elaborado pela Autora.

Para complementar a análise inferencial, foi necessário aplicar o teste Post Hoc de Tukey HSD para aplicar uma comparação dois-a-dois entre os grupos G1, G2 e G3 para, então, identificar qual deles possui o valor representativo diferente dos demais.

Por meio do p-valor obtido em cada comparação conforme apresentado na Tabela 10, observou que o grupo G3 (p-valor menor do que 0,05) foi o responsável pelo resultado apresentado na Tabela 9. Com isso, pôde-se verificar, ao nível de 95% de confiabilidade, que o DLC tipo B proporcionou reduções significativas na espessura do cavaco e, por consequência, no grau de recalque.

Tabela 10: Teste Post Hoc de Tukey HSD

Variável dependente	Grupo	G1	G2	G3
h'	**G1**	-	0,171	0,046
	G2	0,171	-	0,806
	G3	0,046	0,806	-
Rc	**G1**	-	0,171	0,046
	G2	0,171	-	0,806
	G3	0046	0806	-

Fonte: Elaborado pela Autora.

4.1.5. Microdureza das amostras de cavacos

Os resultados da estatística descritiva da microdureza dos cavacos são apresentados na Tabela 11, destacando-se valores médios aritméticos de 99.56 ± 1.14 HV, 102.08 ± 2.86 HV e 104.01 ± 1.47 HV, respectivamente para os grupos G1, G2 e G3. Esses resultados podem ser também observados na Figura 49. Ao aplicar o teste de normalidade de Shapiro Wilk, identificou-se que a distribuição dos dados dos grupos G1 e G2 não foi semelhante a uma curva Normal, o que levou à utilização posterior de um teste não-paramétrico para comparar os valores representativos de cada grupo (Talibouya Ba et al., 2022).

De acordo com os resultados de microdureza encontrados, quanto maior foi o grau de recalque menor foi a microdureza do cavaco, como exemplo o G1 que obteve o maior grau de recalque e a menor microdureza e o G3 que obteve o menor grau de recalque e a maior microdureza. De acordo com os experimentos de Cunha et al (2023) que fez os estudos da microdureza do cavaco de várias ligas de alumínio e

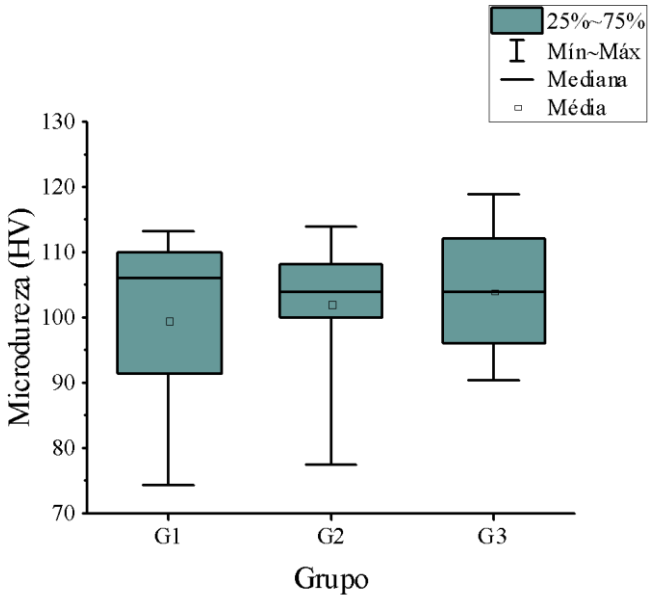
comparou com o grau de recalque, esse comportamento é devido à redução da ductilidade que tem uma grande influência na capacidade de deformação do material e, portanto, no grau de recalque, ou seja, a ductilidade vai aumentar na usinagem com ferramentas sem revestimento.

Tabela 11: Resultados da estatística descritiva e do teste de normalidade obtidos na análise de microdureza dos cavacos

Variável	Média	Range do quartil	Desvio padrão	Coef. Var.	p-valor (Teste de normalidade)
G1	99,56	18,50	13,07	13,12	0,00
G2	102,08	8,00	8,86	8,68	0,01
G3	104,01	15,90	8,74	8,40	0,25

Fonte: Elaborado pela Autora.

Figura 49: Valores de representativos da microdureza dos cavacos obtidos nos grupos G1, G2 e G3



Fonte: Elaborado pela Autora.

Para explicar esses resultados, uma hipótese seria que durante a usinagem a seco, o efeito da temperatura foi maior com a ferramenta sem revestimento que provavelmente gerou uma maior dissipação de energia no cavaco na forma de calor em comparação aos demais grupos que utilizaram a ferramenta com revestimento de DLC. Nesse caso, o aumento da temperatura pode ter reduzido ou mantido a dureza do material e pode estar ligado a hipótese de que o material vai sofrer um menor encruamento quando tem um maior estado de temperatura.

Por outro lado, com as ferramentas revestidas de DLC e considerando a característica de lubrificante sólido do DLC que reduz o coeficiente de atrito na interface ferramenta-cavaco, é provável que o DLC promova a redução da temperatura gerando uma redução da energia dissipada na forma de calor, quando comparado as ferramentas sem revestimento, contribuindo para manter ou aumentar a dureza do material (AL-KHAFAJI et al., 2024).

Apesar de os resultados da estatística descritiva terem indicado possíveis diferenças da microdureza em função dos grupos e que também poderia ter alguma relação com o grau de recalque, o teste de hipótese não-paramétrico Kruskal Wallis ANOVA (ARAVINDKUMAR et al. 2024) indicou, ao nível de 95% de confiabilidade, que a microdureza não foi influenciada pela variável Grupo. Os resultados desse teste são apresentados na Tabela 12, em que a somatória e a média de ranks levaram a um índice estatístico H de 0,57 que foi equivalente a um p-valor de 0,75, valor este maior do que 0,05. O desvio padrão foi considerado elevado e houve dispersão de valores encontrados na microdureza que podem justificar esse resultado.

Tabela 12: Resultado estatístico inferencial não paramétrico obtidos na análise de microdureza dos cavacos

Variável dependente	Grupo	Nº	Soma dos Ranks	Média de Ranks	Resultado principal Kruskal-Wallis
Microdureza	G1	25	910,500	36,420	H (2, N= 75) = 0,574 p-valor = 0,750
	G2	25	922,500	36,900	
	G3	25	1017,000	40,680	

Fonte: Elaborado pela Autora.

4.2. Parâmetros de superfície e desvios de forma

4.2.1. Rugosidade dos furos usinados

Na Tabela 13 estão apresentados os resultados da estatística descritiva dos parâmetros de rugosidade dos quais serão utilizados para discutir os resultados de R_a, R_z, R_{ku} e R_{sk}.

Conforme Tabela 13, os valores médios aritméticos obtidos de R_a para os três grupos G1, G2 e G3 foram 1,40 ± 0,31 µm, 1,43 ± 0,15 µm e 1,26 ± 0,17 µm respectivamente e na Figura 50 é apresentado o comportamento da média aritmética obtida em cada peça usinada.

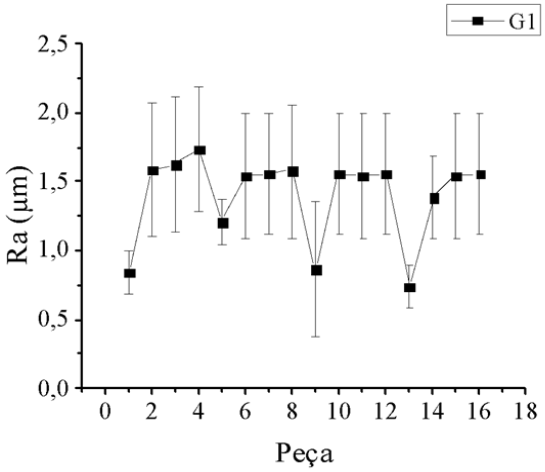
Tabela 13: Resultados da estatística descritiva dos parâmetros de rugosidade

Variáveis	Média	Range do quartil	Desvio padrão	Coef.Var.	p-valor do teste de normalidade para Shapiro Wilk
G1 - R_a (µm)	1,401	0,271	0,312	22,317	0,000
G1 - R_z (µm)	7,693	1,360	1,676	21,788	0,000
G1 - R_{sk}	0,317	0,350	1,354	426,091	0,000
G1 - R_{ku}	6,677	0,634	9,210	137,939	0,000
G2 - R_a (µm)	1,431	0,206	0,151	10,558	0,745
G2 - R_z (µm)	7,958	1,183	0,778	9,775	0,227
G2 - R_{sk}	0,373	0,446	0,558	149,456	0,001
G2 - R_{ku}	4,871	1,385	1,856	38,099	0,000
G3 - R_a (µm)	1,259	0,161	0,170	13,517	0,234
G3 - R_z (µm)	7,262	1,064	0,807	11,124	0,609
G3 - R_{sk}	0,490	0,301	0,303	61,796	0,584
G3 - R_{ku}	4,556	1,135	1,286	28,233	0,013

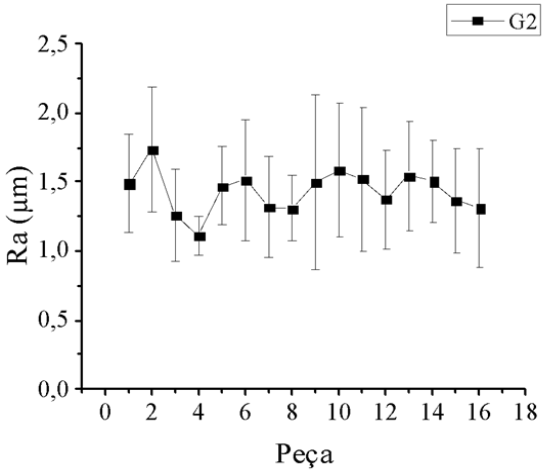
Fonte: Elaborado pela Autora.

Figura 50: Média dos valores de R_a dos grupos G1 (a), G2 (b) e G3 (c) em cada peça usinada

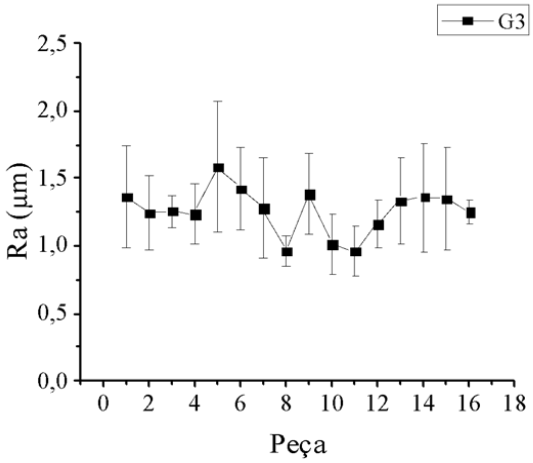
(a)



(b)



(c)



Fonte: Elaborado pela Autora.

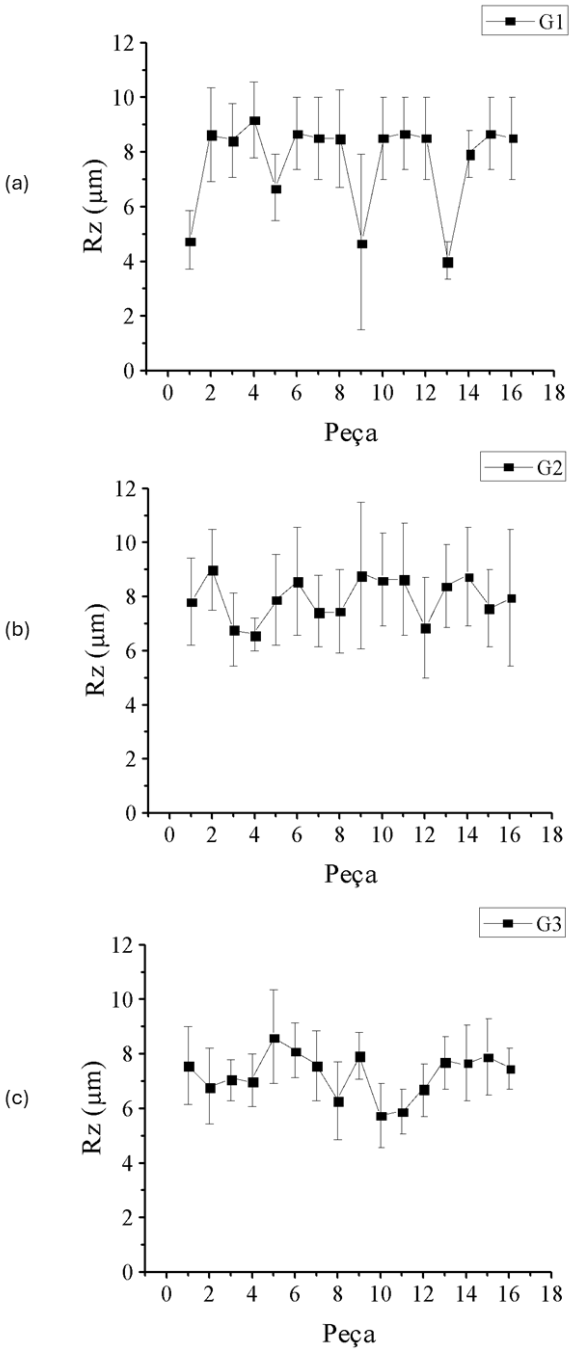
A partir desses resultados foi possível observar que na usinagem a seco independente da presença ou não do revestimento de DLC a média das irregularidades da superfície ao longo de um comprimento apresentou comportamento semelhante, porém com a diferença no desvio padrão. Embora a média aritmética do G1 tenha apresentado condições melhores em relação ao G2, o desvio padrão do G2 e do G3 que utilizaram revestimento de DLC apresentaram melhores valores quando comparados ao G1 que não utilizou revestimento.

De acordo com os resultados encontrados no experimento de SANTOS (2025), acabamento superficial Ra médio obtido nos furos realizados com o robô foi de 3,09 µm, sendo considerado aceitável em comparação com os processos convencionais de usinagem. Já no processo de furação realizado por MARTINS (2021), o valor de Ra foi em torno de 2,7 µm.

Para o parâmetro de R_z, os valores médios aritméticos encontrados foram de 7,69 ± 1,67 µm para o G1, 7,95 ± 0,77 µm para o G2 e 7,26 ± 0,80 µm para o G3. O comportamento da média aritmética obtida em cada peça usinada é apresentado na Figura 51. O parâmetro superficial R_z é medido em um comprimento lm e que é levado em consideração a soma das cinco maiores alturas de picos e das cinco maiores profundidades de vales, o que possibilita uma análise da superfície em padrão das condições entre os picos e vales. Pode-se observar levando em consideração os valores médios e desvio padrão entre os grupos analisados, que o G2 e G3 apresentaram desvio padrão em média de 50% menor em relação ao G1.

A partir dos resultados experimentais de KARKALOS (2021), pode-se observar que os valores de R_z variam entre 2,508 e 8,194 µm. Já Martins (2021), os valores de R_z encontrados operando a 340 m/min iniciaram-se em torno de 18 µm, o que deve se considerar que a velocidade de corte utilizada foi duas vezes maior que a velocidade utilizada nesse experimento.

Figura 51: Média dos valores de R_z dos grupos G1 (a), G2 (b) e G3 (c) em cada peça usinada



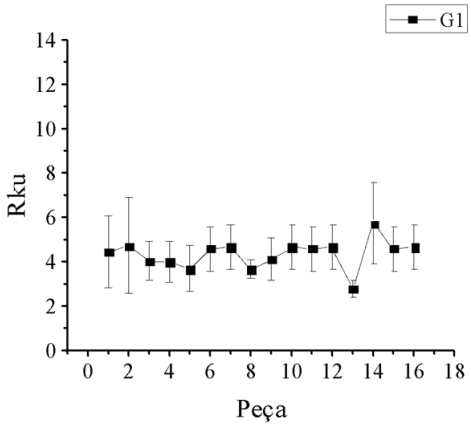
Fonte: Elaborado pela Autora.

Nos resultados referentes à curtose, os valores médios aritméticos encontrados foram de 6,67 ± 9,21 para o G1, 4,87 ± 1,85 para o G2 e 7,26 ± 0,80 para o grupo G3.

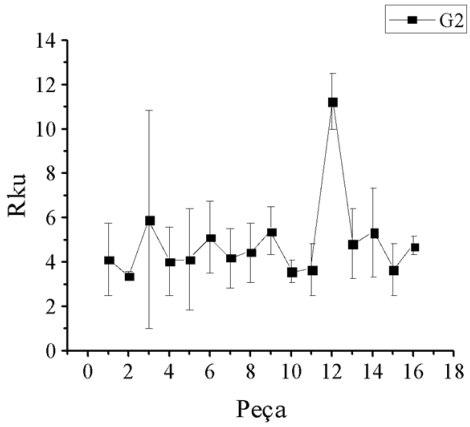
O comportamento da média aritmética de R_{ku} obtida em cada peça usinada é apresentado na Figura 52.

Figura 52: Média dos valores de R_{ku} dos grupos G1 (a), G2 (b) e G3 (c)

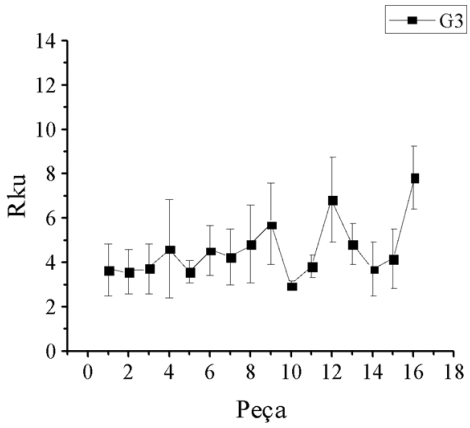
(a)



(b)



(c)

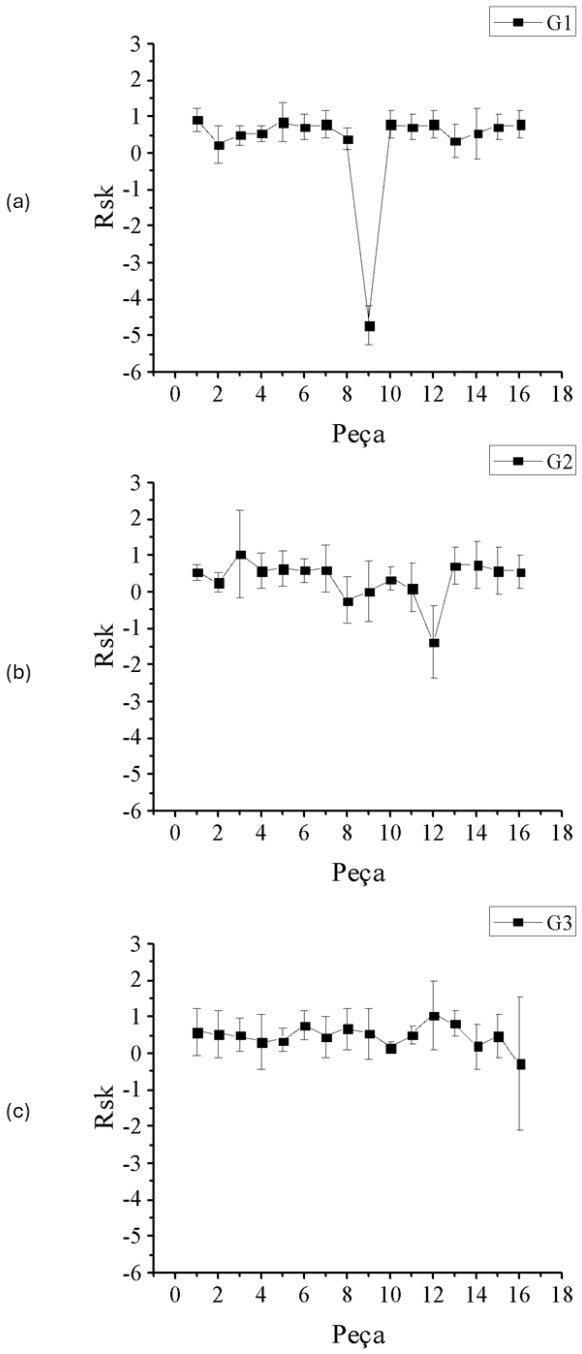


Fonte: Elaborado pela Autora.

Para os três grupos, o R_{ku} foi maior que 3, caracterizando o perfil de rugosidade predominante em picos e vales com extremidades mais pontiagudas (Ba et al., 2024). Não é possível afirmar devido a magnitude do desvio padrão em relação à média que são valores muito altos como, por exemplo, no caso do G1 em que o desvio padrão foi de 9,21. Os valores de R_{ku} encontrados por Ba et al. (2024) no experimento utilizando ferramentas com revestimento de DLC no processo de furação de uma liga de alumínio Al-Mg-Si 6351 foram similares ao encontrados nesse experimento com uma predominância de probabilidade de achatamento ligeiramente acima do valor Gaussiano (R_{ku} = 3). Segundo Ba et al. (2022), é provável que o DLC esteja contribuindo com a redução do coeficiente de atrito, melhorando o escoamento do cavaco na superfície da ferramenta e protegendo a aresta principal de corte com seu nível de desgaste, embora não tenha sido feita medições e análises de desgaste da ferramenta. O filme de DLC vai atuar aumentando significativamente a resistência ao desgaste.

Para os valores de assimetria, os valores médios aritméticos encontrados foram 0,31 ± 1,35 para o G1, 0,37 ± 0,55 para o G2 e 0,49 ± 0,30 para o G3. O comportamento da média aritmética de R_{sk} obtido em cada peça usinada é apresentado na Figura 53. Em todos os grupos, o R_{sk} encontrado foi um pouco acima de zero, logo os perfis de rugosidade estão próximos de uma distribuição homogênea, ou seja, existe uma distribuição quase simétrica entre os picos e vales. No entanto, pode existir a presença de alguns picos mais altos acima da linha média do perfil (TO et al., 2018). Os resultados encontrados por Ba et al. (2024) no processo de furação da liga de alumínio Al-Mg-Si 6351 mostraram um perfil diferente, com uma predominância de médias aritméticas negativas e demonstrou similaridade com a distribuição simétrica entre picos e vales. No entanto, vale considerar que o autor utilizou faixas paramétricas diferentes do atual estudo, como a velocidade de corte que foi de 30 – 60 m/min e o avanço que foi de 0,2 a 0,3 mm/rot. E, além disso, foram ligas diferentes e o autor utilizou também o método de deposição dos revestimentos diferente (método PVD). Maruda et al. (2020) apresentaram resultados de assimetria próximos a -0,2, 0,0 e 0,2, respectivamente para os avanços de 0,085 mm/rot, 0,18 mm/rot e 0,28 mm/rot com velocidade de corte constante (200 m/min).

Figura 53: Média dos valores de R_{sk} dos grupos G1 (a), G2 (b) e G3 (c)



Fonte: Elaborado pela Autora.

Com base na Tabela 13, é interessante observar que o coeficiente de variação dos parâmetros de R_{sk} foi próximo de 212% e R_{ku} foi próximo de 67% em comparação aos valores obtidos para R_a que foram de 15% e R_z de 13%. Isso demonstra que, principalmente para assimetria, o desvio padrão apresentou valores expressivos,

evidenciando que houve uma grande dispersão de dados em torno dos valores médios. Embora esses parâmetros sejam importantes no campo da tribologia e auxiliam no campo da caracterização das superfícies, eles podem vir acompanhados de um alto desvio, como por exemplo Ba et al. (2022) que, em seus experimentos, obteve um padrão de 300% na assimetria e relatou que um alto coeficiente de variação pode indicar que um conjunto de amostras observadas não tem correlação com outras variáveis ou não é influenciado pela variação de parâmetros de controle.

Para comprovar estatisticamente algumas hipóteses realizadas sobre os resultados discutidos na Figura 50 até a Figura 53, aplicou-se a estatística inferencial por meio do teste de hipótese não paramétrico de Kruskal-Wallis para avaliar se houve ou não diferença significativa dos valores representativos dos parâmetros de rugosidade em cada grupo. É importante ressaltar que esse teste de hipótese foi selecionado a partir do resultado do teste de normalidade (Tabela 13), no qual os valores de p-valor foram, em geral, menores do que 0,05 (p-valor referência para 95% de confiabilidade) (Wassenal, 2004).

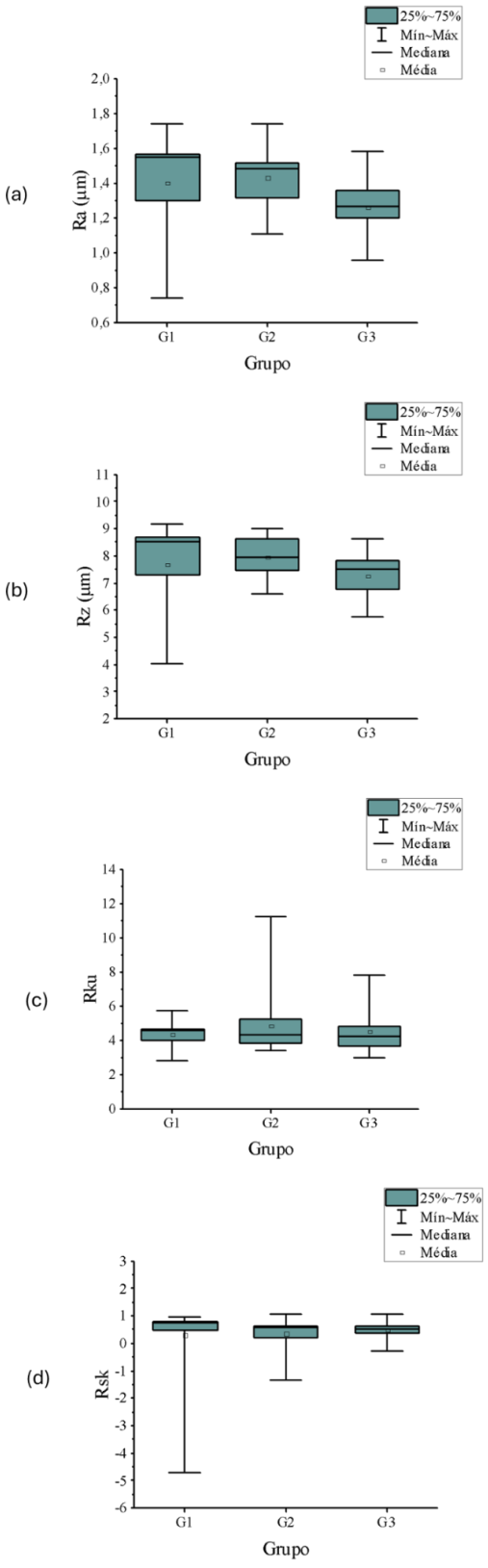
Na Tabela 14 estão apresentados os resultados da estatística inferencial dos parâmetros de rugosidade. Na Figura 54 estão representados os gráficos box-plot que são auxiliares aos resultados da Tabela 14.

Tabela 14: Resultados da estatística inferencial Kruskal-Wallis dos parâmetros de rugosidade

Variável dependente	Grupos	Nº observações	Somatória de Ranks	Média de Ranks	Resultado principal
R_a	G1	16	483,50	30,21	Kruskal-Wallis test: H (2, N= 48) =8,433741 p =,0147
	G2	16	429,50	26,84	
	G3	16	263,00	16,43	
R_z	G1	16	459,50	28,71	Kruskal-Wallis test: H (2, N= 48) =6,241250 p =,0441
	G2	16	438,00	27,37	
	G3	16	278,50	17,40	
R_{sk}	G1	16	468,50	29,28	Kruskal-Wallis test: H (2, N= 48) =2,808554 p =,2455
	G2	16	357,00	22,31	
	G3	16	350,50	21,90	
R_{ku}	G1	16	407,50	25,46	Kruskal-Wallis test: H (2, N= 48) =,3640157 p =,8336
	G2	16	404,00	25,25	
	G3	16	364,50	22,78	

Fonte: Elaborado pela Autora.

Figura 54: Gráfico box-plot dos resultados de R_a (a), R_z (b), R_{ku} (c) e R_{sk} (d)



Fonte: Elaborado pela Autora.

Os parâmetros de assimetria e curtose não tiveram alterações significativas em função do grupo pois o p-valor foi maior que 0,05, possivelmente devido aos valores médios de desvio padrão que foram altos. Por outro lado, os parâmetros R_a e R_z tiveram alterações significativas em função do grupo. A partir disso, o teste de post hoc 2-tailed foi utilizado para comparar, dois-a-dois, os valores obtidos entre cada grupo e, então, identificar qual possui o valor representativo diferente dos demais. Os resultados desse teste estão representados na Tabela 15, referente a R_a, e na Tabela 16 referente a R_z.

Tabela 15: Resultados do teste Post hoc 2-tailed em função de R_a

Variável dependente: R_a	**G1 (R:30,21)**	**G2 (R:26,84)**	**G3 (R:16,43)**
G1		1,00	0,01
G2	1,00		0,10
G3	0,01	0,10	

Fonte: Elaborado pela Autora.

Tabela 16: Resultados do teste Post hoc 2-tailed em função de R_z

Variável dependente: R_z	**G1 (R:28,71)**	**G2 (R:27,37)**	**G3 (R:17,40)**
G1		1,00	0,06
G2	1,00		0,13
G3	0,06	0,13	

Fonte: Elaborado pela Autora.

Para o parâmetro de Ra, quando comparados os grupos, são encontrados p-valor menores que 0,05 e, ao analisar o box-plot apresentado na Figura 54 é possível observar que dentro da variável Grupo, o G3 foi o responsável pelo resultado da Tabela 14. Com isso, pôde-se verificar, ao nível de 95% de confiabilidade, que o DLC

tipo B proporcionou reduções significativas na rugosidade Ra em comparação ao G1 e G2. De acordo com Martins (2021), o uso do revestimento DLC nas brocas de aço rápido melhorou a qualidade da superfície furada, principalmente reduzindo os valores dos parâmetros de rugosidade. Nos seus experimentos, ele afirma que o parâmetro de rugosidade R_a da superfície furada é ligeiramente menor com a broca revestida com DLC.

Para o parâmetro de R_z, foi identificado uma inconsistência entre os resultados pois embora o p-valor na Tabela 14 tenha sido menor do que 0,05, nenhuma diferença significativa foi encontrada ao comparar as médias dos grupos dois-a-dois na Tabela 16. Observando o gráfico box-plot na Figura 54, os valores representativos junto às dispersões podem sugerir que R_z não foi influenciado significativamente pelos grupos, diferentemente do parâmetro R_a. Esse fator pode estar ligado ao fato de que ao selecionar os cinco maiores picos e cinco maiores vales detalham um nível de pontos mais relevantes para análise.

4.2.2. Desvios de cilindricidade e diâmetro

Na Tabela 17 estão apresentados os resultados da estatística descritiva dos erros de forma dos quais serão utilizados para discutir os resultados de diâmetro e cilindricidade.

Tabela 17: Resultados da estatística descritiva e teste de normalidade dos desvios

Variáveis	Média	Range do quartil	Desvio padrão	Coef. Var.	p-valor para teste de normalidade de Shapiro Wilk
G1 - Diâmetro (mm)	8,020	0,006	0,005	0,073	0,008
G1 - Cilindricidade (mm)	0,029	0,006	0,011	39,621	0,000
G2 - Diâmetro (mm)	8,021	0,003	0,002	0,0324	0,440
G2 - Cilindricidade (mm)	0,046	0,007	0,060	128,830	0,000
G3 - Diâmetro (mm)	8,003	0,003	0,002	0,025	0,177
G3 - Cilindricidade (mm)	0,027	0,003	0,006	24,594	0,000

Fonte: Elaborado pela Autora.

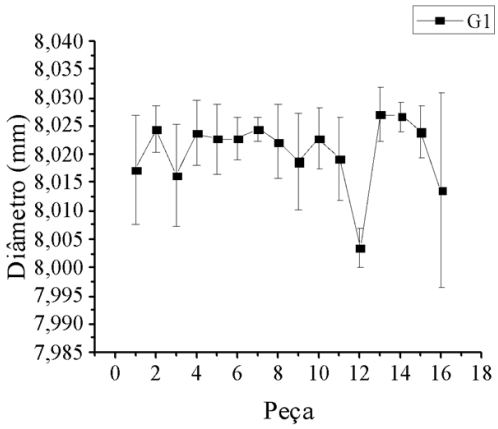
Os valores médios aritméticos dos diâmetros encontrados foram de 8,02 ± 0,005 mm para o G1, 8,02 ± 0,002 para o G2 e 8,00 ± 0,002 mm para o G3. O comportamento da média aritmética do diâmetro obtido em cada peça usinada é apresentado na Figura 55.

O diâmetro nominal da ferramenta utilizada é de 8 (0/+0,021) mm. Os resultados do diâmetro do G1, G2 e G3 estão dentro do padrão estabelecido para o diâmetro nominal da ferramenta. Sendo assim, o processo de usinagem a seco não influenciou significativamente nos valores médios e de desvio padrão dos diâmetros das peças.

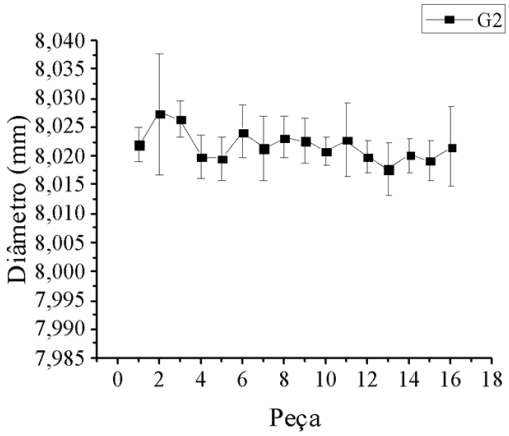
Nos experimentos de SANTOS (2025), os furos produzidos apresentaram diâmetros maiores que o nominal, com variações médias entre 0,02 mm e 0,06 mm acima do valor de referência e que poderia indicar adesão de material na aresta de corte especialmente por ser uma furação a seco. Já nos experimentos de Martins (2021), os diâmetros medidos foram consistentemente inferiores ao diâmetro nominal da broca (6,75 mm) e isso ocorreu desde os primeiros furos, mesmo antes de desgaste significativo da ferramenta. De acordo com eles, à medida que mais furos são feitos, ocorre redução do diâmetro dos furos devido ao desgaste progressivo da ferramenta, especialmente da aresta de corte.

Figura 55: Valores de diâmetro dos grupos G1, G2 e G3

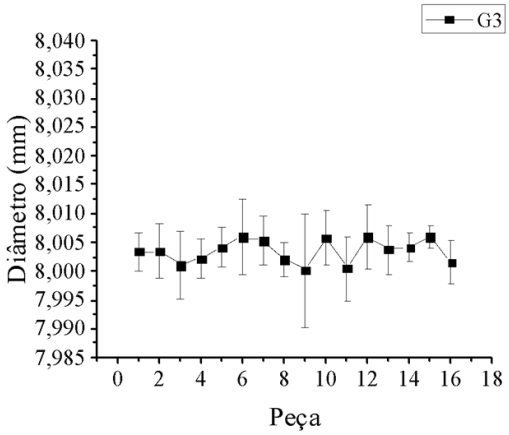
(a)



(b)



(c)



Fonte: Elaborado pela Autora.

Conforme observado na Tabela 17, o grupo G3 apresenta o diâmetro mais próximo ao valor nominal existindo a possibilidade do revestimento de DLC manter melhores condições tribológicas na interface cavaco-ferramenta. Além disso, a dispersão dos resultados encontrados no G1 é maior em comparação ao G2 e ao G3.

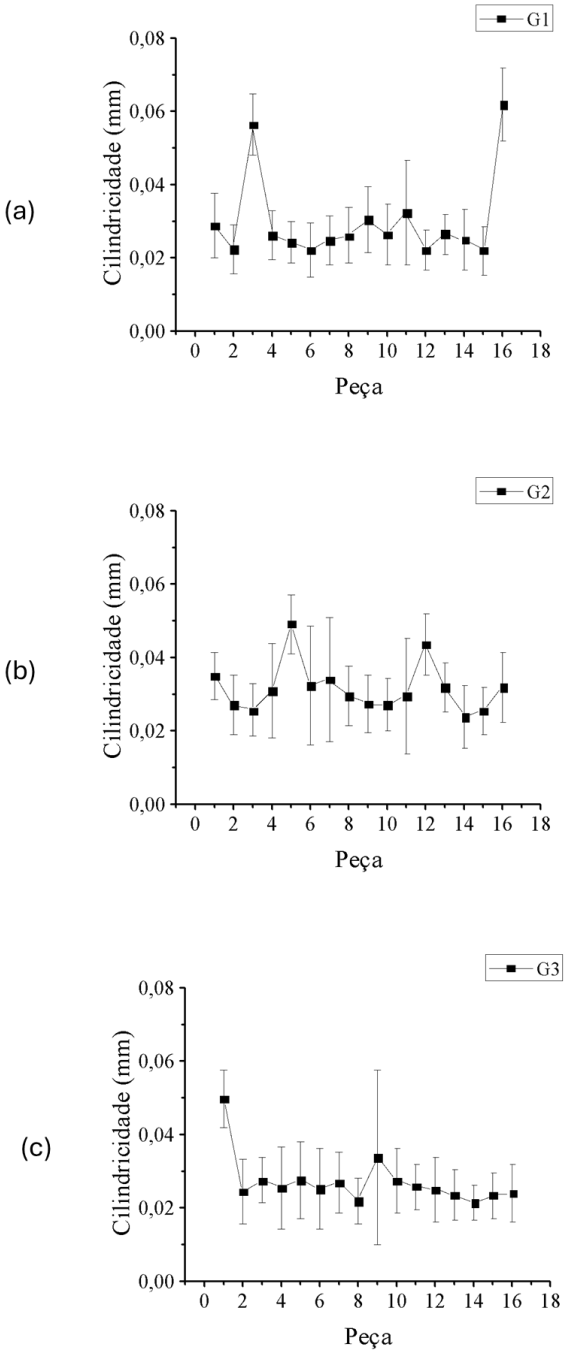
Esse fator pode ser um indício de que, sem o revestimento, existiria um mecanismo cíclico de adesão do material na ferramenta. Esse mecanismo atuaria uma hora aderindo, aumentando assim o diâmetro e depois desprendendo, diminuindo o diâmetro fazendo com que haja um ciclo de variação do diâmetro, gerando uma grande dispersão. Quando comparado ao resultado do G2 com o revestimento tipo A, é possível observar que a dispersão diminui, sugerindo que, apesar da média ter sido igual, a menor dispersão pode indicar que o revestimento do tipo B traz melhorias para o processo.

Ao se discutir os benefícios do revestimento de DLC, observa-se que o comportamento do revestimento tipo B foi melhor que o comportamento do revestimento tipo A. Uma possível explicação é a presença da camada secundária de nitreto de cromo presente no revestimento do tipo B que poderia estar melhorando o desempenho do revestimento como um todo e não só melhorando a adesão.

Os valores médios aritméticos de cilindricidade encontrados foram de 0,03 ± 0,011 mm para o G1, 0,05 ± 0,059 para o G2 e 0,03 ± 0,006 mm para o G3. O comportamento da média aritmética da cilindricidade obtido em cada peça usinada é apresentado na Figura 56.

O G3 apresentou o valor médio de cilindricidade igual ao G1, com menor dispersão, apresentando o melhor desempenho indicando a possibilidade do revestimento do tipo B apresentar uma melhor estabilidade no desvio de cilindricidade. O comportamento da cilindricidade do G2 não apresentou comportamento semelhante ao G3 o que pode justificar a dispersão dos pontos para os valores médios encontrados de desvio padrão. De acordo com MARTINS (2021) foi possível observar que os valores médios de cilindricidade nas velocidades de corte testadas, utilizando brocas com filme de DLC, apresentaram valores semelhantes às brocas sem filme de DLC.

Figura 56: Valores de cilindricidade dos grupos G1, G2 e G3



Fonte: Elaborado pela Autora.

Na Tabela 18 são apresentados os resultados da estatística inferencial dos desvios de forma. Os parâmetros de diâmetro e cilindricidade tiveram alterações significativas em função do grupo pois o p-valor foi menor que 0,05. Na Figura 57

estão representados os gráficos box-plot que são auxiliares aos resultados da Tabela 18.

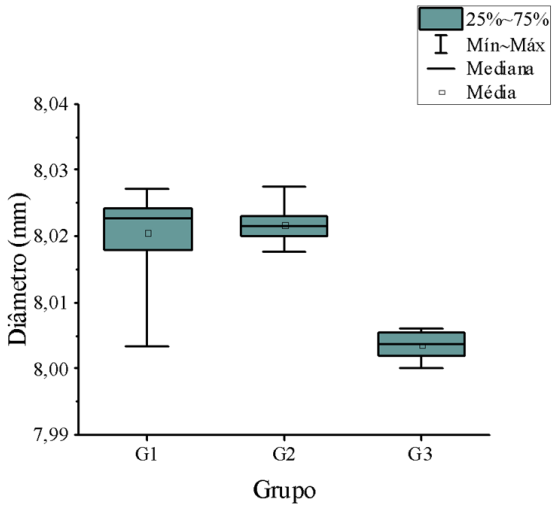
Tabela 18: Resultados da estatística inferencial Kruskal-Wallis dos desvios

Variável dependente	Grupos	Nº observações	Somatória de Ranks	Média de Ranks	Resultado principal
Diâmetro	G1	16	515,00	32,18	Kruskal-Wallis test: H (2, N= 48) =29,30818 p =,0000
	G2	16	516,50	32,28	
	G3	16	144,50	9,03	
Cilindricidade	G1	16	343,00	21,43	Kruskal-Wallis test: H (2, N= 48) =9,220026 p =,0100
	G2	16	529,00	33,06	
	G3	16	304,00	19,00	

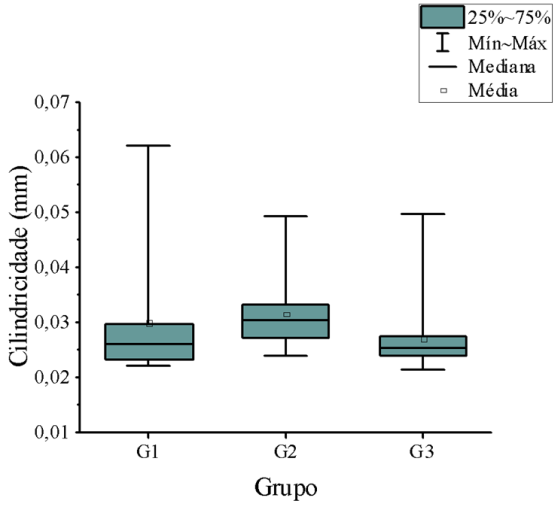
Fonte: Elaborado pela Autora.

Figura 57: Gráfico box-plot dos resultados dos desvios de diâmetro e cilindricidade

(a)



(b)



Fonte: Elaborado pela Autora.

A partir disso, foi realizado o teste de post hoc 2-tailed para aplicar uma comparação dois-a-dois entre os grupos G1, G2 e G3 para, então, identificar qual desses grupos possui o valor representativo diferente dos demais. O teste Post hoc 2-tailed está representado na Tabela 19 em função do diâmetro e na Tabela 20 em função da cilindricidade.

Tabela 19: Resultados do teste Post hoc 2-tailed em função do diâmetro

Variável dependente: Diâmetro	G1 (8,020)	G2 (8,021)	G3 (8,003)
G1		0,663	0,000
G2	0,663		0,000
G3	0,000	0,0001	

Fonte: Elaborado pela Autora.

Tabela 20: Resultados do teste Post hoc 2-tailed em função da cilindricidade

Variável dependente: Cilindricidade	G1 (0,029)	G2 (0,046)	G3 (0,027)
G1		0,380	0,973
G2	0,380		0,272
G3	0,973	0,272	

Fonte: Elaborado pela Autora.

Para o parâmetro de diâmetro (Tabela 19), quando comparados os grupos, temos p-valores menores que 0,05 e, ao analisar o box-plot, é possível observar que dentro da variável grupo, o G3 foi o responsável pelo resultado da Tabela 18. Com isso, pôde-se verificar, ao nível de 95% de confiabilidade, o DLC tipo B proporcionou reduções significativas no diâmetro.

Ao analisar a cilindricidade (Tabela 20), foi identificado uma inconsistência entre os resultados pois embora o p-valor na Tabela 18 tenha sido menor do que 0,05, nenhuma diferença significativa foi encontrada ao comparar as médias dos grupos dois-a-dois na Tabela 20 sugerindo assim que a cilindricidade não foi influenciada significativamente pela variável grupo.

5. CONCLUSÃO

Neste estudo, o objetivo foi investigar o comportamento da formação de cavacos durante o processo de furação a seco da liga de alumínio Al-Mg-Si 6061-T6, utilizando brocas helicoidais com e sem revestimento de DLC. Foram avaliadas as características dos cavacos formados, quanto ao tipo, forma, grau de recalque e microdureza, além dos parâmetros de rugosidade superficial e desvios geométricos dimensionais dos furos produzidos.

O cavaco foi classificado como contínuo, característica típica do alumínio, e apresentou formato cônico helicoidal, relacionado à geometria de afiação das ferramentas utilizadas.

Em relação ao grau de recalque, a análise estatística indicou que os revestimentos de DLC atuaram como um lubrificante sólido durante a usinagem a seco, favorecendo o escoamento e a expulsão dos cavacos, e consequentemente, reduzindo a deformação quando comparado aos cavacos obtidos no grupo sem revestimento (G1). Esse comportamento sugere que as ferramentas sem revestimento elevaram o coeficiente de atrito e reduziram o escorregamento na saída do cavaco, aumentando o grau de recalque.

Embora ambos os revestimentos analisados apresentassem camadas semelhantes de DLC, o revestimento tipo B demonstrou desempenho superior ao tipo A. Essa diferença possivelmente se deve à presença da intercamada de CrN, que melhora a aderência e favorece o escoamento do cavaco, reduzindo o recalque, como constatado nos experimentos.

Os resultados estatísticos mostraram que a microdureza dos cavacos não foi significativamente influenciada pelos diferentes grupos de usinagem (G1, G2 e G3). No entanto, observou-se uma tendência de comportamento inversamente proporcional entre a microdureza e o grau de recalque. Uma hipótese para esse resultado é que o maior coeficiente de atrito entre cavaco e canal de escoamento, nas ferramentas sem revestimento, promoveu maior dissipação de energia no próprio cavaco, o que pode ter reduzido ou mantido a dureza. Por outro lado, o uso do DLC, ao reduzir o atrito na interface cavaco-ferramenta, contribuiu para menor dissipação térmica e, assim, para a preservação ou ligeiro aumento da dureza.

Nos parâmetros microgeométricos, os valores médios de rugosidade Ra obtidos foram:

- G1: 1,40 ± 0,31 µm
- G2: 1,43 ± 0,15 µm
- G3: 1,26 ± 0,17 µm

Embora G1 tenha apresentado valor médio semelhante a G2, os desvios padrão dos grupos com DLC (G2 e G3) foram menores, indicando maior estabilidade. A análise Post Hoc revelou, com 95% de confiabilidade, que o revestimento tipo B (G3) proporcionou reduções significativas em Ra em relação aos demais.

Para o parâmetro R_z, as médias foram:

- G1: 7,69 ± 1,67 µm
- G2: 7,95 ± 0,77 µm
- G3: 7,26 ± 0,80 µm

Apesar do valor médio de G1 ser inferior ao de G2, os desvios padrão de G2 e G3 foram cerca de 50% menores. A análise Post Hoc apontou que o R_z não sofreu influência significativa entre os grupos, diferentemente de R_a.

Quanto aos parâmetros de assimetria (R_{sk}) e curtose (R_{ku}), os valores médios de R_{sk} ficaram ligeiramente acima de zero, indicando perfis próximos a uma distribuição simétrica de picos e vales. Os valores de R_{ku} foram superiores a 3, sugerindo superfícies com extremidades pontiagudas, porém, devido aos altos desvios padrão, como no caso de G1, com 9,21. não se pode afirmar com segurança. Os desvios de R_{sk} chegaram a 212% e de R_{ku} a 67%, e ambos não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre os grupos (p-valor > 0,05), o que pode estar relacionado à dispersão elevada dos dados.

Nos parâmetros macrogeométricos, os diâmetros dos furos produzidos pelos três grupos permaneceram dentro dos limites estabelecidos pelo diâmetro nominal da ferramenta, indicando que a usinagem a seco e os parâmetros de corte não afetaram significativamente os diâmetros médios e seus desvios padrão. O grupo G3 obteve os diâmetros mais próximos do nominal, reforçando a hipótese de que o revestimento DLC tipo B promove melhores condições tribológicas na interface cavaco-ferramenta, além de apresentar menor dispersão em comparação a G1 e G2.

Para a cilindricidade, G3 apresentou valor médio igual ao de G1, porém com menor dispersão, evidenciando o melhor desempenho geral. O comportamento de G2

foi distinto, o que justificou a maior dispersão de seus valores. A análise Post Hoc indicou que, embora o DLC tipo B (G3) tenha proporcionado reduções significativas no desvio do diâmetro, a variável grupo não influenciou significativamente os desvios de cilindricidade.

Por fim, o estudo destaca a importância da manufatura verde, demonstrando que, apesar da eliminação dos fluidos de corte reduzir os impactos ambientais, o processo de usinagem a seco só se torna viável e eficiente com o uso de tecnologias de revestimento. Os revestimentos DLC não apenas reduziram o desgaste das ferramentas, mas também melhoraram a formação dos cavacos e os parâmetros de qualidade superficial.

Os experimentos revelaram-se positivos, fornecendo dados valiosos para a pesquisa científica e para aplicações industriais, além de incentivar práticas sustentáveis que conciliam desempenho e responsabilidade ambiental.

REFERÊNCIAS

AAMIR, Muhammad et al. *A review: Drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications*. Journal of Materials Research and Technology, v. 9, n. 6, p. 12484-12500, 2020.

ABIOYE, T. *E*. et al. Investigation of the microstructure, mechanical and wear properties of AA6061-T6 friction stir weldments with different particulate reinforcements addition. Journal of materials research and technology, v. 8, n. 5, p. 3917-3928, 2019.

ALABOODI, Abdulaziz S.; HUSSAIN, Zahid. *Finite element modeling of nano-indentation technique to characterize thin film coatings*. Journal of King Saud University - Engineering Sciences, v. 31, n. 1, p. 61–69, 2019.

ANTUNES, JMA. *A indentação de materiais maciços e filmes finos: modelação e análise inversa*. 2006. 197 f. UNIVERSIDADE DE COIMBRA, 2006.

ARAÚJO, R. *Análise numérica do comportamento mecânico de um filme [(Cr1- x, Alx)N] durante o ensaio de dureza com penetradores esféricos*. 2011. UFSJ, São João del-Rei., 2011.

ARAÚJO, Rodrigo; DIAS, Avelino Manuel da Silva. *Numerical Evaluation of Strength in the Interface during Indentation Spherical Testing in Thin Films*. Materials Sciences and Applications, v. 05, n. 03, p. 149–157, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO (ABAL). *Têmperas*. Disponível em: http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/temperas/. Acesso em 19/04/24

ASTAKHOV, V. *P*. Tribology of Metal Cutting. Elsevier, 2010.

AVELINO MANUEL DA SILVA DIAS. *Análise Numérica do Processo de Fratura no Ensaio de Indentação Vickers em uma Liga de Carboneto de Tungstênio com Cobalto"*. 2004. 104–110 f. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, 2004.

AZEVEDO, F M. *Método dos elementos finitos*. 1. ed. Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto Portugal, 2003.

BA, Elhadji Cheikh Talibouya et al. *Deconvolution process approach in Raman spectra of DLC coating to determine the sp3 hybridization content using the ID/IG ratio in relation to the quantification determined by X-ray photoelectron spectroscopy*. Diamond and Related Materials, v. 122, n. September 2021, 2022.

BA, Elhadji Cheikh Talibouya. *Análise da influência do avanço e da velocidade de corte no processo de furação sobre os parâmetros de assimetria (RSK) e curtose (RKU) na caracterização superficial utilizando brocas de aço-rápido com e sem revestimento DLC (Diamond-like-carbon)*. 2022.

BOBZIN, K. *High-performance coatings for cutting tools*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, v. 18, p. 1-9, 2017.

BORDINASSI, Éd Claudio et al. *Investigações sobre o processo de furação*. In: Workshop Novos Desenvolvimentos em Engenharia de Fabricação. 2004.

BRASILEIRA, Norma. *ABNT NBR NM 116-1*. . [S.l: s.n.]. , 2005

BUDINAS, R. *G.; NISBETT, J*. K. Elementos de Máquinas de Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica. Mc Graw Hill. [S.l: s.n.]. , 2011

CECH, Vladimir et al. *Elastic Modulus and Hardness of Plasma-Polymerized Organosilicones Evaluated by Nanoindentation Techniques*. Plasma Processes and Polymers, v. 12, n. 9, p. 864–881, 2015.

CHANDRUPATLA, Tirupathi; BELEGUNDU, Ashok. *Introduction to Finite Elements in Engineering*. 5. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

CHARVÁTOVÁ CAMPBELL, Anna et al. *Modeling the influence of roughness on nanoindentation data using finite element analysis*. International Journal of Mechanical Sciences, v. 161–162, n. June, 2019.

CHATTERJEE, Abhishek et al. *Nanoscratch study of hard HfB2 thin films using experimental and finite element techniques*. Wear, v. 268, n. 5–6, p. 677–685, 2010.

CHAUS, A. *S*. et al. Role of microstructural factor in wear resistance and cutting performance of high-speed steel end mills. Wear, v. 474–475, n. December 2020, 2021.

CHAVES FILHO, Ozias Ferreira; DIAS, Avelino Manuel da Silva. *Avaliação dos processos de fratura em filmes finos através da simulação de ensaios de indentação com penetradores esféricos*. Matéria (Rio de Janeiro), v. 24, n. 4, 2019.

CHEN, Cihai et al. *Structure and cutting performance of Ti-DLC films prepared by reactive magnetron sputtering*. Diamond and Related Materials, v. 104, n. January, p. 107735, 2020.

CHEN, H. *et al*. Micro-scale abrasive wear behaviour of HVOF sprayed and laser-remelted conventional and nanostructured WC-Co coatings. Wear, v. 258, n. 1- 4 SPEC. ISS., p. 333–338, 2005.

CHEN, Hsi Chao; HUANG, Chen Yu; CHENG, Po Wei. *Stress mechanisms of SiO2 and Nb2O5 thin films sputtered on flexible substrates investigated by finite element method*. Surface and Coatings Technology, v. 344, n. September 2017, p. 449–457, 2018.

CHEN, J.L.; JI, P.Y.; YANG, Y.; JIN, C.G.; ZHUGE, L.J.; WU, X.M. *The structure and properties of amorphous diamond-like carbon films deposited by helicon wave plasma chemical vapor deposition*. Thin Solid Films. vol. 709, p. 138167, 2020.

CHEN, Ling et al. *Numerical and Experimental Study of the Roughness Effects on Mechanical Properties of AISI316L by Nanoindentation*. Modeling and Numerical Simulation of Material Science, v. 04, n. 04, p. 153–162, 2014.

CHEN, Yangmin et al. *Effect of Alloying and Microalloying Elements on Carbides of High-Speed Steel: An Overview*. Metals, v. 14, n. 2, p. 175, 2024.

CHETAN; GHOSH, S.; RAO, P.V. *Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review*. Journal of Cleaner Production. vol. 100, p. 17-34, 2015.

CHILDs, T. *H*. C. et al. Metal Machining: Theory and Applications. Butterworth-Heinemann, 2000.

COSTA, J. *D*. D.; GOMES, J. O. ANÁLISE DE RUGISIDADE EM SUPERFÍCIES USINADAS DE FORMA COMPLEXA. 2010, São José dos Campos: [s.n.], 2010.

DALIBÓN, E.L.; CZERWIEC, T.; TRAVA-AIROLDI, V.J.; GHAFOOR, N.; ROGSTRÖM, L.; ODÉN, M.; BRÜHL, S.P. *Characterization of DLC coatings over nitrided stainless steel with and without nitriding pre-treatment using annealing cycles*. j mater res technol. vol. 8, n. 2, p. 1653-1662, 2019

DAMON, James et al. *Short-time induction heat treatment of high speed steel AISI M2: Laboratory proof of concept and application-related component tests*. Materials & Design, v. 230, p. 111991, 2023.

DAR, Fazilat H; MEAKIN, Judith R; ASPDEN, Richard M. *Statistical methods in finite element analysis*. Journal of Biomechanics, v. 35, n. 9, p. 1155–1161, 2002.

DAS, Ruchita S.; AGRAWAL, Y. *K*. Raman spectroscopy: Recent advancements, techniques and applications. Vibrational Spectroscopy, v. 57, n. 2, p. 163–176, 2011.

DE NOVAES, FELLIPE BIAZI; DE SOUZA, RAFAEL AGRIZZI. *Análise da formação do cavaco no torneamento do alumínio utilizando câmera de alta velocidade. Monografia (Engenharia Mecânica)*. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitóra–ES, p. 15, 2009.

DEMIR, H., GÜNDÜZ, S., The effects of aging on machinability of 6061 aluminium alloy, J. *Mater*. Design. 1-4,2008.

DENG, Jixi et al. *Extended finite element analysis of plastic and fracture behaviors of SiC-based multi-layer thin films system*. International Journal of Mechanical Sciences, v. 161–162, n. March, p. 2–6, 2019.

DIAS, A. *M*. S.; SOTANI, P.F.B.; GODOY, G.C. Simulação do ensaio de indentação em filmes finos com o uso de modelos de trinca difusa Simulation of indentation testing in thin films using numerical cracking models. Revista Matéria, v. 15, n. 3, p. 422–430, 2010.

DING, H.; LI, W. *A review of cutting dynamics and chip formation in machining of titanium alloys*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018.

DRUMOND, Ramon Martins et al. *Avaliação Do Desgaste Por Microabrasão Do Aço Aisi M-35 Revestido Por Dlc – Diamond-Like Carbon*. Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia - ISSN: 1984-5693, v. 12, p. 199–212, 2020.

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

FERRARI, Andrea C. *Non-destructive characterisation of carbon films*. Tribology of Diamond-Like Carbon Films: Fundamentals and Applications, p. 25–82, 2008.

FISCHER-CRIPPS, A. *C*. Critical review of analysis and interpretation of nanoindentation test data. Surface and Coatings Technology, v. 200, n. 14–15, p. 4153–4165, 2006.

FUJISAWA, Naoki et al. *Substrate-independent stress-strain behavior of diamond-like carbon thin films by nanoindentation with a spherical tip*. Journal of Materials Research, v. 33, n. 6, p. 699–708, 2018.

GADELRAB, Karim R.; CHIESA, Matteo. *Influence of nanoindenter tip radius on the estimation of the elastic modulus*. Materials Research Society Symposium Proceedings, v. 1297, n. May 2014, p. 53–58, 2011.

GARG, S.; GOYAL, R.K. *A Study of Surface Roughness in Drilling of AISI H11 Die Steel using Face Centered Design*. International Journal for Innovative Research in Science & Technology. vol. 1, n. 12, p. 464-474, 2015.

GEE, M. *G*. et al. Progress towards standardisation of ball cratering. Wear, v. 255, n. 1–6, p. 1–13, 2003.

GONÇALVES, R. *A*. G. Investigação da usinabilidade das ligas de alumínio da série 6XXX. Dissertação (Mestrado). Uberlândia: UFU, 2012.

GRZESIK, W. *Advanced Machining Processes of Metallic Materials*. Elsevier, 2017.

GSELLMANN, Matthias et al. *Near-interface cracking in a TiN coated high speed steel due to combined shear and compression under cyclic impact loading*. Surface and Coatings Technology, v. 394, n. March, p. 125854, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125854>.

GUO, Feng et al. *Effect of the anodizing temperature on microstructure and tribological properties of 6061 aluminum alloy anodic oxide films*. Coatings, v. 12, n. 3, p. 314, 2022.

GUO, Y. *B.; YEN, David W*. A FEM study on mechanisms of discontinuous chip formation in hard machining. Journal of Materials Processing Technology, v. 155, p. 1350-1356, 2004.

GUPTA, K. *A review on green machining techniques*. Procedia manufacturing, v. 51, p. 1730-1736, 2020.

HALEEM, Abid et al. *A pervasive study on Green Manufacturing towards attaining sustainability*. Green Technologies and Sustainability, v. 1, n. 2, p. 100018, 2023.

HORVÁTH, R.; CZIFRA, Á.; DRÉGELYI-KISS, Á. *Effect of conventional and nonconventional tool geometries to skewness and kurtosis of surface roughness in case of fine turning of aluminium alloys with diamond tools*. Int J Adv Manuf Technol. vol. 78, p. 297-304, 2015a.

HORVÁTH, R.; DRÉGELYI-KISS, Á.; MÁTYÁSI, G. *the examination of surface roughness parameters in the fine turning of hypereutectic aluminium alloys*. U.P.B. Sci. Bull., Series D. vol. 77, n. 2, p. 205-216, 2015b.

HUANG, Xiaoqin; PELEGRI, Assimina A. *Finite element analysis on nanoindentation with friction contact at the film/substrate interface*. Composites Science and Technology, v. 67, n. 7–8, p. 1311–1319, 1 jun. 2007.

HUNT, R A; MCCARTNEY, L N. *use of models to predict deformation during the elastic-plastic nano-indentation of coatings*. [S.l: s.n.], 2003.

ILYUSCHENKO, Alexandre Ph et al. *On the properties of PVD coating based on nanodiamond and molybdenum disulfide nanolayers and its efficiency when drilling of aluminum alloy*. Surface and Coatings Technology, v. 270, p. 190–196, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.03.004>.

IQBAL S.A. *et al*. A comparative study of the tool–chip contact length in turning of two engineering alloys for a wide range of cutting speeds. SpringerVerlag London Limited, p. 1-11, 2008.

JAVADI, A. *A.; TAN, T*. P.; ZHANG, M. Neural network for constitutive modelling in finite element analysis. Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences, v. 10, n. 4, p. 523–529, 2003.

JIANG, Wu-Gui; SU, Jian-Jun; FENG, Xi-Qiao. *Effect of surface roughness on nanoindentation test of thin films*. Engineering Fracture Mechanics, v. 75, n. 17, p. 4965–4972, 2008.

JIBHAKATE, Rahul A.; NIRWAN, Nilesh W.; RAMBHAD, Kishor S. *Enhancing the effectiveness of green technology in manufacturing industry*. Materials Today: Proceedings, v. 47, p. 4298-4305, 2021.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. *R*. Manufacturing Engineering and Technology. 7. ed. Pearson, 2014.

KAN, Qianhua et al. *Oliver–Pharr indentation method in determining elastic moduli of shape memory alloys—A phase transformable material*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, v. 61, n. 10, p. 2015–2033

KE, Feng; NI, Jun; STEPHENSON, D. *A*. Continuous chip formation in drilling. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 45, n. 15, p. 1652-1658, 2005.

KELLY, J.F.; COTTERELL, M.G. *Minimal lubrication machining of aluminium alloys*. Journal of Materials Processing Technology. vol. 120, p. 327-334, 2002.

KRBATA, Michal et al. *Wear behaviour of high strength tool steel 90mncrv8 in contact with Si3N4*. Metals, v. 10, n. 6, p. 1–17, 2020.

KUMAR, Amit; ZENG, Kaiyang. *Alternative methods to extract the hardness and elastic modulus of thin films from nanoindentation load-displacement data*. International Journal of Applied Mechanics, v. 2, n. 1, p. 41–68, 2010.

KUMAR, B. *Suresh; BASKAR, N.; RAJAGURU, K*. Drilling operation: A review. Materials Today: Proceedings, v. 21, p. 926-933, 2020.

KUMAR, S Suresh et al. *Investigation of WEDM process parameters of Al–SiC–B4C composites using response surface methodology*. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, v. 3, n. 2, p. 127–135, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2588840419301052>.

LEE, Youngmin et al. *Atomistic simulations of incipient plasticity under nanoindentation*. Mechanics of Materials, v. 37, n. 10, p. 1035–1048, 2005.

LENZ, Bastian; HASSELBRUCH, Henning; MEHNER, Andreas. *Automated evaluation of Rockwell adhesion tests for PVD coatings using convolutional neural networks*. Surface and Coatings Technology, v. 385, n. January, p. 125365, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125365>.

LEROY, C. *et al*. Ball cratering an efficient tool for 3 body microabrasion of coated systems. Surface and Coatings Technology, v. 200, n. 1- 4 SPEC. ISS., p. 153–156, 2005.

LI, An et al. *Effect of the Variation of Film Thickness on the Properties of Multilayered Si-Doped Diamond-Like Carbon Films Deposited on SUS 304, Al and Cu Substrates*. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 29, n. 12, p. 8473–8483, 2020.

LI, L. *et al*. Investigation on chip morphology and formation mechanism in high-speed machining of aluminum alloys. Journal of Materials Processing Technology, 2016.

LIBÓRIO, MAXWELL; LEMOS, DIEGO; DIAS, Manuel; Avaliação Numérica da Espessura de Filmes de Nitreto de Titânio Obtidos por Processamento a Plasma . *2014, Juiz De Fora, MG: SIMMEC/EMMCOMP 2014, 2014*. p. 1039–1048.

LIU, Kouqi; OSTADHASSAN, Mehdi; XU, Xiaomeng. *A comparison study of the unloading behavior in shale samples in nanoindentation experiments using different models*. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 186, p. 106715, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106715>.

LU, Yunxiang et al. *(100) Oriented Diamond Film Prepared on Amorphous Carbon Buffer Layer Containing Nano-Crystalline Diamond Grains*. Surface and Coatings Technology, v. 385, n. July 2019, 2020.

LUNG, B. *H.; CHIANG, M*. J.; HON, M. H. Growth characterization and properties of diamond-like carbon films by electron cyclotron resonance chemical vapor deposition. Thin Solid Films, v. 392, n. 1, p. 16–21, 2001.

MACHADO, Á. *R*. et al. Teoria da Usinagem dos Materiais. Ed. Blucher, 2015.

MARTINS, P.S. *Estudo da furação em altas velocidades de corte em ligas de Al-Si utilizando brocas de aço rápido e metal duro sem e com revestimento de DLC (Diamond Like Carbon)*. Tese de Doutorado. Belo Horizonte: PUC-MG, 2016.

MARTINS, Paulo Sérgio et al. *Evaluation of the drilling process in 6061-T6 Al-Mg-Si alloys using AISI M-35 diamond-like carbon coated high-speed steel drill*. Tribology International, v. 192, p. 109250, 2024.

MARTINS, Paulo Sérgio et al. *Study on roughness and form errors linked with tool wear in the drilling process of an Al-Si alloy under high cutting speed using coated diamond-like carbon high-speed steel drill bits*. Journal of Manufacturing Processes, v. 62, n. July 2020, p. 711–719, 2021.

MARTINS, Paulo Sergio et al. *Tribological aspects of the Diamond-like carbon film applied to different surfaces of AISI M2 steel. Wear, v*. 506, p. 204469, 2022.

MARTINS, Paulo Sérgio. *Estudo da furação em altas velocidades de corte em ligas de al-si utilizando brocas de aço rápido e metal duro sem e com revestimento de dlc (diamond like carbon)*. 2016. 209 f. pontifícia universidade católica de minas gerais, 2016.

MARTINS, Paulo Sérgio; ALMEIDA MAGALHÃES JÚNIOR, Pedro Américo; et al. *Study of Diamond-Like Carbon coating application on carbide substrate for cutting tools used in the drilling process of an Al–Si alloy at high cutting speeds*. Wear, v. 498–499, n. March, 2022.

MARTINS, Paulo Sérgio; CARNEIRO, José Rubens Gonçalves; et al. *Study on the Tribological Behavior of Wear and Friction Coefficient on AISI M35 High-Speed Steel with and without DLC Coating*. Materials Research, v. 25, 2022.

MIKI, Y. *et al*. Residual stress measurement in DLC films deposited by PBIID method using Raman microprobe spectroscopy. Surface and Coatings Technology, v. 283, p. 274-280, 2015.

MORENO, D.A.N. *validação de um dispositivo de interrupção súbita da furação com brocas helicoidais para análise da raiz de cavaco*. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.

MRÓWKA-NOWOTNIK, Grażyna; SIENIAWSKI, Jan. *Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6005 and 6082 aluminium alloys*. Journal of Materials Processing Technology, v. 162, p. 367-372, 2005.

NIX, William D; GAO, Huajian. *Indentation size effects in crystalline materials: A law for strain gradient plasticity*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, v. 46, n. 3, p. 411–425, 1998.

OBIKAWA, T.; SHINOZUKA, J. *Chip control in high speed machining of Inconel 718*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013.

OLIVER, W C; PHARR, G M. *An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments*. Journal of Materials Research, v. 7, n. 6, p. 1564–1583, 1992.

ONODERA, Shu et al. *Antibacterial property of F doped DLC film with plasma treatment*. Diamond and Related Materials, v. 107, p. 107835, 1 ago. 2020.

PANDURE, Pravin S.; JATTI, VijayKumar S.; SINGH, T.P. *Finite Element Simulation of Nano-indentation of DLC Coated HSS Substrate*. Procedia Materials Science, v. 6, n. Icmpc, p. 1619–1624, 2014.

PANG, Xiaolu; GAO, Kewei; VOLINSKY, Alex A. *Microstructure and mechanical properties of chromium oxide coatings*. Journal of Materials Research, v. 22, n. 12, p. 3531–3537, 2007.

PODGORNIK, B. *et al*. Tribological behaviour of WC/C coatings operating under different lubrication regimes. Surface and Coatings Technology, v. 177–178, p. 558–565, 2004.

POLMEAR, I. *J*. Light alloys: metallurgy of the light metals. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006.

POPOV, Ilya V. *et al*. Relative stability of diamond and graphite as seen through bonds and hybridizations. Physical Chemistry Chemical Physics, v. 21, n. 21, p. 10961–10969, 2019.

QIN, J et al. *The equivalence of axisymmetric indentation model for three-dimensional indentation hardness*. Journal of Materials Research, v. 24, n. 3, p. 776–783, 2009.

QU, S et al. *Indenter tip radius effect on the Nix–Gao relation in micro- and nanoindentation hardness experiments*. Journal of Materials Research, v. 19, n. 11, p. 3423–3434, 2004.

SALAH, Numan et al. *Tribological behavior of diamond-like carbon thin films deposited by the pulse laser technique at different substrate temperatures*. Tribology International, v. 103, p. 274–280, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2016.07.013>.

SAMUEL, A. *U*. et al. Effect of machining of aluminium alloys with emphasis on aluminium 6061 alloy–a review. In: IOP conference series: materials science and engineering. IOP Publishing, 2021. p. 012157.

SANTOS, S. *C.; Sales W.F*. Aspectos tribológicos da usinagem de metais. São Paulo: ArtLiber, 2005.

SCHINO, A. *D.I.; CORRADI, M*. Quenching and tempering (Q&T) effect on a steel for forging with Cr and mo addition. Anali Zavoda za Povijesne Znanosti Hrvatske Akademije Znanosti i Umjetnosti u Dubrovniku, v. 57, n. 4, p. 307–309, 2018.

SEDLAČEK, M.; GREGORČIČ, P.; PODGORNIK, B. *Use of the Roughness Parameters Ssk and Sku to Control Friction—A Method for Designing Surface Texturing*. TRIBOLOGY TRANSACTIONS. vol. 60, n. 2, p. 260-266, 2017.

SEDLAČEK, M.; VILHENA, L.M.S.; PODGORNIK, B.; VIŽINTIN, J. *Surface Topography Modelling for Reduced Friction*. Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering. vol. 57, n. 9, p. 674-680, 2011.

SHAHSAVARI, Fatemeh et al. *A comparative study of surface morphology, mechanical and tribological properties of DLC films deposited on Cr and Ni nanolayers*. Ceramics International, v. 46, n. 4, p. 5077–5085, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.10.251>.

SHANKAR, M. *Ravi et al*. Characteristics of aluminum 6061-T6 deformed to large plastic strains by machining. Materials Science and Engineering: A, v. 410, p. 364-368, 2005.

SHARIFAHMADIAN, Omid; MAHBOUBI, Farzad; YAZDANI, Sepehr. *Comparison between corrosion behaviour of DLC and N-DLC coatings deposited by DC-pulsed PACVD technique*. Diamond and Related Materials, v. 95, n. March, p. 60–70, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2019.04.007>.

SHI, Z. *et al*. The equivalent axisymmetric model for Berkovich indenters in power-law hardening materials. International Journal of Plasticity, v. 26, n. 1, p. 141–148, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijplas.2009.06.008>.

SILVA, A. *L*. C.; MEI, P. R.; Aços e ligas especiais. 3ª ed. São Paulo: Edgar Bluncher, 2010.

SILVA, Fernando De Azevedo; CHAVES, Carlos Alberto; SANTOS, Jefferson Rodrigo Marcelino. *Uniabeu, v*. 10, n. 24, p. 158–170, 2017.

SINGH, S. *Prathap et al*. Effect of heat treatment on the hardness behaviour of the aluminium 6061 alloy. Materials Today: Proceedings, 2023.

SOUSA, Marcelo do Nascimento et al. *Influência das propriedades mecânicas das ligas de alumínio na usinabilidade foco no grau de recalque, na dimensão da zona de fluxo e na microdureza dos cavacos*. 2013.

SUGITA, Naohiko et al. *Dedicated drill design for reduction in burr and delamination during the drilling of composite materials*. CIRP Annals, v. 68, n. 1, p. 89–92, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.094>.

SUN, J.; GUO, Y. *B*. A new multi-view approach to characterize 3D chip morphology and properties in end milling titanium Ti–6Al–4V. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 48, n. 12-13, p. 1486-1494, 2008.

Sun, S., Brandt, M. *and Dargusch, M.S., 2009, "Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys", International Journal of Machine Tools & Manufacture, No*. 49, pp. 561-568.

TALIBOUYA BA, Elhadji Cheikh et al. *Investigation of the effects of skewness Rsk and kurtosis Rku on tribological behavior in a pin-on-disc test of surfaces machined by conventional milling and turning processes*. Materials Research, v. 24, n. 2, p. 1–14, 2021.

TAVARES, Joao; PADILHA, A. *Introdução ao método dos elementos finitos*. 1 jan. 1998.

TSHABALALA, Lerato et al. *Axial fatigue behaviour of additively manufactured tool steels*. Materials Today: Proceedings, v. 38, n. xxxx, p. 789–792, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.548>.

VETTER, J. *60 years of DLC coatings: historical highlights and technical review of cathodic arc processes to synthesize various DLC types, and their evolution for industrial applications*. Surface & Coatings Technology, v. 257, p. 213-240, 2014.

VICENTE, Geraldo Candido Maia. *caraterização de filmes dlc com potencial de utilização em motores de combustão interna*. 2005. 96 f. Universidade Federal do Paraná, 2005.

VIEIRA, Vitor Ferreira et al. *Nanoindentation test of a DLC coated high-speed steel substrate using a two-dimensional axisymmetric finite element method*. Diamond and Related Materials, v. 134, n. February, 2023.

WARSI, Salman Sagheer et al. *Development and analysis of energy consumption map for high-speed machining of Al 6061-T6 alloy*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 96, p. 91-102, 2018.

WIATROWSKI, A. *et al*. Deposition of diamond-like carbon thin films by the high power impulse magnetron sputtering method. Diamond and Related Materials, v. 72, p. 71–76, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.diamond.2017.01.007>.

XIAO, Yangyi et al. *Evaluation of failure properties of a DLC/steel system using combined nanoindentation and finite element approach*. Diamond and Related Materials, v. 93, n. February, p. 159–167, 2019.

XIAO, Yangyi et al. *Residual stress and its effect on failure in a DLC coating on a steel substrate with rough surfaces*. Diamond and Related Materials, v. 66, p. 23–35, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.diamond.2016.03.009>.

YILMAZ, Bahattin; KARABULUT, Şener; GÜLLÜ, Abdulkadir. *A review of the chip breaking methods for continuous chips in turning*. Journal of Manufacturing Processes, v. 49, p. 50-69, 2020.

ZDUNEK, Krzysztof et al. *Characterization of sp3 bond content of carbon films deposited by high power gas injection magnetron sputtering method by UV and VIS Raman spectroscopy*. Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, v. 194, p. 136–140, 2018.

LIBÓRIO, MAXWELL; LEMOS, DIEGO; DIAS, Manuel; Avaliação Numérica da Espessura de Filmes de Nitreto de Titânio Obtidos por Processamento a Plasma . *2014, Juiz De Fora, MG: SIMMEC/EMMCOMP 2014, 2014*. p. 1039–1048.

LIU, Kouqi; OSTADHASSAN, Mehdi; XU, Xiaomeng. *A comparison study of the unloading behavior in shale samples in nanoindentation experiments using different models*. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 186, p. 106715, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106715>.

LU, Yunxiang et al. *(100) Oriented Diamond Film Prepared on Amorphous Carbon Buffer Layer Containing Nano-Crystalline Diamond Grains*. Surface and Coatings Technology, v. 385, n. July 2019, 2020.

LUNG, B. *H.; CHIANG, M*. J.; HON, M. H. Growth characterization and properties of diamond-like carbon films by electron cyclotron resonance chemical vapor deposition. Thin Solid Films, v. 392, n. 1, p. 16–21, 2001.

MACHADO, Á. *R*. et al. Teoria da Usinagem dos Materiais. Ed. Blucher, 2015.

MARTINS, P.S. *Estudo da furação em altas velocidades de corte em ligas de Al-Si utilizando brocas de aço rápido e metal duro sem e com revestimento de DLC (Diamond Like Carbon)*. Tese de Doutorado. Belo Horizonte: PUC-MG, 2016.

MARTINS, Paulo Sérgio et al. *Evaluation of the drilling process in 6061-T6 Al-Mg-Si alloys using AISI M-35 diamond-like carbon coated high-speed steel drill*. Tribology International, v. 192, p. 109250, 2024.

MARTINS, Paulo Sérgio et al. *Study on roughness and form errors linked with tool wear in the drilling process of an Al-Si alloy under high cutting speed using coated diamond-like carbon high-speed steel drill bits*. Journal of Manufacturing Processes, v. 62, n. July 2020, p. 711–719, 2021.

MARTINS, Paulo Sergio et al. *Tribological aspects of the Diamond-like carbon film applied to different surfaces of AISI M2 steel. Wear, v*. 506, p. 204469, 2022.

MARTINS, Paulo Sérgio. *Estudo da furação em altas velocidades de corte em ligas de al-si utilizando brocas de aço rápido e metal duro sem e com revestimento de dlc (diamond like carbon)*. 2016. 209 f. pontifícia universidade católica de minas gerais, 2016.

MARTINS, Paulo Sérgio; ALMEIDA MAGALHÃES JÚNIOR, Pedro Américo; et al. *Study of Diamond-Like Carbon coating application on carbide substrate for cutting tools used in the drilling process of an Al–Si alloy at high cutting speeds*. Wear, v. 498–499, n. March, 2022.

MARTINS, Paulo Sérgio; CARNEIRO, José Rubens Gonçalves; et al. *Study on the Tribological Behavior of Wear and Friction Coefficient on AISI M35 High-Speed Steel with and without DLC Coating*. Materials Research, v. 25, 2022.

MIKI, Y. *et al*. Residual stress measurement in DLC films deposited by PBIID method using Raman microprobe spectroscopy. Surface and Coatings Technology, v. 283, p. 274-280, 2015.

MORENO, D.A.N. *validação de um dispositivo de interrupção súbita da furação com brocas helicoidais para análise da raiz de cavaco*. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.

MRÓWKA-NOWOTNIK, Grażyna; SIENIAWSKI, Jan. *Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6005 and 6082 aluminium alloys*. Journal of Materials Processing Technology, v. 162, p. 367-372, 2005.

NIX, William D; GAO, Huajian. *Indentation size effects in crystalline materials: A law for strain gradient plasticity*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, v. 46, n. 3, p. 411–425, 1998.

OBIKAWA, T.; SHINOZUKA, J. *Chip control in high speed machining of Inconel 718*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013.

OLIVER, W C; PHARR, G M. *An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments*. Journal of Materials Research, v. 7, n. 6, p. 1564–1583, 1992.

ONODERA, Shu et al. *Antibacterial property of F doped DLC film with plasma treatment*. Diamond and Related Materials, v. 107, p. 107835, 1 ago. 2020.

PANDURE, Pravin S.; JATTI, VijayKumar S.; SINGH, T.P. *Finite Element Simulation of Nano-indentation of DLC Coated HSS Substrate*. Procedia Materials Science, v. 6, n. Icmpc, p. 1619–1624, 2014.

PANG, Xiaolu; GAO, Kewei; VOLINSKY, Alex A. *Microstructure and mechanical properties of chromium oxide coatings*. Journal of Materials Research, v. 22, n. 12, p. 3531–3537, 2007.

PODGORNIK, B. *et al*. Tribological behaviour of WC/C coatings operating under different lubrication regimes. Surface and Coatings Technology, v. 177–178, p. 558–565, 2004.

POLMEAR, I. *J*. Light alloys: metallurgy of the light metals. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006.

POPOV, Ilya V. *et al*. Relative stability of diamond and graphite as seen through bonds and hybridizations. Physical Chemistry Chemical Physics, v. 21, n. 21, p. 10961–10969, 2019.

QIN, J et al. *The equivalence of axisymmetric indentation model for three-dimensional indentation hardness*. Journal of Materials Research, v. 24, n. 3, p. 776–783, 2009.

QU, S et al. *Indenter tip radius effect on the Nix–Gao relation in micro- and nanoindentation hardness experiments*. Journal of Materials Research, v. 19, n. 11, p. 3423–3434, 2004.

SALAH, Numan et al. *Tribological behavior of diamond-like carbon thin films deposited by the pulse laser technique at different substrate temperatures*. Tribology International, v. 103, p. 274–280, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2016.07.013>.

SAMUEL, A. *U*. et al. Effect of machining of aluminium alloys with emphasis on aluminium 6061 alloy–a review. In: IOP conference series: materials science and engineering. IOP Publishing, 2021. p. 012157.

SANTOS, S. *C.; Sales W.F*. Aspectos tribológicos da usinagem de metais. São Paulo: ArtLiber, 2005.

SCHINO, A. *D.I.; CORRADI, M*. Quenching and tempering (Q&T) effect on a steel for forging with Cr and mo addition. Anali Zavoda za Povijesne Znanosti Hrvatske Akademije Znanosti i Umjetnosti u Dubrovniku, v. 57, n. 4, p. 307–309, 2018.

SEDLAČEK, M.; GREGORČIČ, P.; PODGORNIK, B. *Use of the Roughness Parameters Ssk and Sku to Control Friction—A Method for Designing Surface Texturing*. TRIBOLOGY TRANSACTIONS. vol. 60, n. 2, p. 260-266, 2017.

SEDLAČEK, M.; VILHENA, L.M.S.; PODGORNIK, B.; VIŽINTIN, J. *Surface Topography Modelling for Reduced Friction*. Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering. vol. 57, n. 9, p. 674-680, 2011.