



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE FURAÇÃO EM LIGAS AL-MG-SI 6061-T6
UTILIZANDO BROCAS DE AÇO RÁPIDO AISI M-35 RETIFICADAS
E REVESTIDAS COM DLC - DIAMOND-LIKE CARBON**

Ramon Martins Drumond

Belo Horizonte

Mai de 2021

Ramon Martins Drumond

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE FURAÇÃO EM LIGAS AL-MG-SI 6061-T6
UTILIZANDO BROCAS DE AÇO RÁPIDO AISI M-35 RETIFICADAS
E REVESTIDAS COM DLC - DIAMOND-LIKE CARBON**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva

Coorientador Prof. Dr. Paulo Sérgio Martins

Belo Horizonte

Mai de 2021

Drumond, Ramon Martins.
D795a Avaliação do processo de furacão em ligas AL-MG-SI 6061-T6 utilizando brocas de aço rápido AISI M-35 retificadas e revestidas com DLC - Diamond-Like Carbon / Ramon Martins Drumond. – 2021. 126 f. : il.

Orientador: Ernane Rodrigues da Silva
Coorientador: Paulo Sérgio Martins

Dissertação (Mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2021.
Bibliografia.

1. Atrito. 2. Desgaste. 3. Furação. 4. Filmes finos. 5. Usinagem. I. Silva, Ernane Rodrigues da. II. Martins, Paulo Sérgio.

CDD: 620.1124



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS - NS



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 6 / 2021 - POSMAT (11.52.07)

Nº do Protocolo: 23062.023202/2021-33

Belo Horizonte-MG, 21 de maio de 2021.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**"AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE FURAÇÃO EM LIGAS AL-MG-SI 6061-T6
UTILIZANDO BROCAS DE AÇO RÁPIDO AISI M-35 RETIFICADAS E REVESTIDAS
COM DLC-DIAMOND-LIKE CARBON"**

Autor: Ramon Martins Drumond

Orientador: Prof. Ernane Rodrigues da Silva

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Paulo Sérgio Martins (COORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Marcello Rosa Dumont (MEMBRO INTERNO)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG

Prof. Dr. Luis Henrique de Andrade Maia (MEMBRO EXTERNO)
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUCMinas

(Assinado digitalmente em 01/06/2021 12:04)
ERNANE RODRIGUES DA SILVA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
CEMAT (11.51.06)
Matrícula: 392338

(Assinado digitalmente em 04/06/2021 10:03)
MARCELLO ROSA DUMONT
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEMAT (11.55.06)
Matrícula: 2143739

(Assinado digitalmente em 08/06/2021 12:13)
LUIS HENRIQUE ANDRADE MAIA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 050.341.546-41

(Assinado digitalmente em 27/05/2021 19:13)
PAULO SÉRGIO MARTINS
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 031.148.096-93

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp>
informando seu número: 6, ano: 2021, tipo: **ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**, data de emissão: 21/05/2021
e o código de verificação: **55b9a71f3a**

Dedico este trabalho a João, meu filho, que todos os dias me dá o privilégio de presenciar o brilho em seus olhos ao se admirar com as coisas do dia-a-dia. Emoção própria de quem está descobrindo o mundo, assim como o pesquisador.

AGRADECIMENTOS

À Michele Duarte, minha companheira, por toda a renúncia que foi feita para que eu pudesse concluir essa etapa.

Aos meus pais e a meu irmão, por todo o apoio, sem o qual eu não teria sequer iniciado essa caminhada.

Ao CEFET-MG pela acolhida e fomento à minha pesquisa.

Ao prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva pelo acompanhamento e orientação.

Ao prof. Dr. Paulo Sérgio Martins, não apenas pela coorientação, mas também pela amizade e estímulo.

Ao amigo Elhadji Cheikh pelo apoio, discussões e por ser presença constante ao longo da elaboração desse trabalho.

À empresa Oerlikon Balzers, por ser parceira nesse estudo, na deposição do filme DLC, em especial a Rodrigo Bernardinelli.

À empresa Nipo-Tec, por ter cedido e preparado as amostras de aço rápido, em especial a João Isamu Arakaki e José Ivair de Oliveira.

À empresa Stellantis, pelas análises realizadas, em especial, a Leonardo José Dutra Silva, Gustavo Eufemia do Carmo e Renato Silva.

Ao INPE - Instituto de Pesquisas Espaciais, em especial à Bárbara da Silva Pinheiro, por todo o auxílio nas análises por Raman e XPS.

Ao prof. Dr. Rogério Xavier, do Departamento de Engenharia Mecânica do CEFET-MG pela cessão do laboratório para realização dos ensaios de caloteste.

À Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, em especial, ao prof. Dr. Luís Henrique Andrade Maia pelo apoio na cessão do mandril hidráulico utilizado na usinagem da liga de alumínio.

À Universidade Federal de Uberlândia pelo apoio na execução das análises do material, principalmente, a Augusto Peixoto, Gustavo Fernandes e Pedro França.

À profa. Dra. Elaine Carballo, pela cessão do laboratório, auxílio na realização dos testes e por todo o acolhimento.

Ao professor Victor Lima pelo apoio na etapa de execução da usinagem.

Aos demais professores do POSMAT, pelo apoio e pelo conhecimento transmitido ao longo do curso.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“O importante e bonito do mundo é isso: que as pessoas não estão sempre iguais, ainda não foram terminadas, mas que elas vão sempre mudando. Afinam e desafinam”.

João Guimarães Rosa

RESUMO

As propriedades mecânicas atingidas pelas ligas de alumínio como conformabilidade, densidade e resistência mecânica as tornam uma opção muito presente em setores como automotivo e aeronáutico. A usinagem delas, por outro lado, constitui-se como tarefa complexa, já que, em função de sua alta ductilidade, é marcada por altas temperaturas e, conseqüentemente, por um acabamento superficial que tende a ser mais grosseiro. A maneira comum de se atuar sobre altas temperaturas de usinagem é utilizando-se fluido de corte. Contudo, devido a questões ambientais e de saúde dos operadores, tem se buscado alternativas ao uso desses produtos. Uma delas é a utilização de ferramentas de corte revestidas por filmes finos como o *Diamond-like Carbon (DLC)*, que proporciona alta dureza e baixo coeficiente de atrito, e cujo bom desempenho encontra-se relacionado à sua adesão à superfície da ferramenta. O presente trabalho investigou o desempenho de brocas em aço rápido com acabamento superficial retificado e revestidas em *DLC* no processo de furação de uma liga Al-Mg-Si 6061-T6, que foi usinada sem fluido de corte. Sua execução seguiu o caminho da caracterização do material e análise dos erros macro e microgeométricos da liga usinada. A análise do revestimento DLC permitiu concluir tratar-se de carbono amorfo não tetraédrico, tipo a:C. O coeficiente de desgaste obtido no ensaio de desgaste por microabrasão foi 142 vezes maior no aço não revestido por DLC. Após o revestimento das amostras, verificou-se um acréscimo médio de 2,7% no parâmetro R_a . A adesão do revestimento foi classificada como dentro dos limites aceitáveis. Os resultados obtidos na análise da liga usinada foram, em grande parte, uniformes. A análise dos resultados também permitiu verificar um aumento na vida útil da ferramenta, que foi capaz de usinar 1000 furos a seco. Por outro lado, foram verificadas evidências da adesão do material usinado à sua superfície.

Palavras Chave: *atrito; desgaste; DLC por PVD; furação; parâmetros superficiais; usinagem em alumínio.*

ABSTRACT

The mechanical properties achieved by aluminum alloys such as formability, density and mechanical strength make them very present in sectors such as automotive and aeronautics. Their machining, although, constitutes a complex task, since, due to its high ductility, it is marked by high temperatures and, consequently, by a surface finish that tends to be poor. The common way to act at high machining temperatures is to use cutting fluid. However, due to environmental and health of the operators, alternatives to these products have been looked for. One of them is the use of cutting tools coated with thin films such as Diamond-like Carbon (DLC), which combines high hardness and low friction coefficient, and whose good performance is related to its adhesion to the tool surface. The present work investigated the performance of drills in high-speed steel with rectified surface finish and coated in DLC in the drilling process of an Al-Mg-Si 6061T6 alloy, which was machined without cutting fluid. Its execution followed the path of material characterization and analysis of macro and microgeometric errors in the machined alloy. The analysis of the DLC coating made it possible to conclude that it was non-tetrahedral amorphous carbon, type a: C. The results of the wear coefficient obtained in the microabrasion wear test was 142 times higher for uncoated steel. After coating the samples, there was an average increase of 2.7% in the R_a parameter. The adhesion of the coating was classified as within acceptable limits. The results obtained in the analysis of the machined alloy were, to a large extent, uniform. Their analysis allowed to verify an increase in the tool life, which was capable of machining 1000 dry holes. Although, evidence of the adhesion of the machined material to its surface was verified.

Keywords: friction; *wear*; *DLC on PVD process*; *drilling*; *superficial parameters*; *aluminum machining*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cinemática do processo de furação	36
Figura 2: Arestas e superfícies de broca helicoidal	37
Figura 3: Rugosidade média R_a	47
Figura 4: Vista lateral da montagem do equipamento de caloteste	53
Figura 5: Vista lateral da esfera posicionada sobre a amostra	54
Figura 6: Vista superior da calota impressa sobre a amostra	54
Figura 7: Padrões de falha de adesão do filme	56
Figura 8: Avaliação da circularidade	59
Figura 9: Avaliação da cilindricidade	60
Figura 10: Equipamento Circularímetro	60
Figura 11: Fluxograma	61
Figura 12: Desenho esquemático dos corpos de prova	62
Figura 13: Amostras antes e após o revestimento com DLC	63
Figura 14: Espectrômetro de Emissão Ótica	64
Figura 15: Microscópio Eletrônico de Varredura	64
Figura 16: Rugosímetro Mitutoyo SJ-210	65
Figura 17: Amostra de aço AISI M-35 destinada à medição do R_a prévia à deposição de DLC	66
Figura 18: Durômetro utilizado na análises	66
Figura 19: Caloteste Anton Paar	67
Figura 20: Agitador magnético	68
Figura 21: Amostra revestida por DLC	69
Figura 22: Equipamento de espectroscopia Raman	70
Figura 23: Equipamento de XPS	70
Figura 24: Desenho esquemático dos corpos de prova da liga Al-Mg-Si 6061-T6	72
Figura 25: Corpo de prova em liga Al-Mg-Si 6061-T6	72
Figura 26: Desenho da broca	73
Figura 27: Broca revestida por DLC	74
Figura 28: Centro de Usinagem Romi Discovery	74
Figura 29: Broca montada no sistema de fixação por mandril hidráulico	75
Figura 30: Planejamento da furação nas placas de Alumínio	76
Figura 31: Equipamento de medir coordenadas tridimensional	78
Figura 32: Lupa digital utilizada na análise de desgaste das brocas	80
Figura 33: Mapa dos pontos de desgaste analisados	81

Figura 34: Análise química por MEV/EDS em diferentes pontos da superfície do aço AISI M-35	84
Figura 35: Análise da estrutura do AISI M-35 obtida por MEV	85
Figura 36: Dispersão entre os valores de R_a antes e após o revestimento com filme DLC	87
Figura 37: Imagens das calotas obtidas no aço AISI M-35 não revestido por DLC...	89
Figura 38: Imagens das calotas obtidas no aço AISI M-35 revestido por DLC.....	89
Figura 39: Análise do coeficiente de desgaste do aço AISi-M35 sem revestimento DLC	90
Figura 40: Análise do coeficiente de desgaste do aço AISi-M35 revestido por DLC.	91
Figura 41: Diâmetro médio das calotas obtidas no ensaio de desgaste por microabrasão.....	91
Figura 42: Espectrograma Raman da amostra revestida por DLC – 1ª análise	93
Figura 43: Espectrograma Raman da amostra revestida por DLC – 2ª análise.	93
Figura 44: Análise do DLC por XPS	95
Figura 45: Regiões submetidas às indentações para análise da adesão do filme	96
Figura 46: Imagens ampliadas das indentações	97
Figura 47: Análise química do ponto de indentação 1.....	98
Figura 48: Análise química do ponto de indentação 2.....	99
Figura 49: Análise da espessura do filme DLC depositado sobre aço AISI-M35	99
Figura 50: Espessura do revestimento DLC.....	101
Figura 51: (a, b, c e d) Parâmetros de superfície R_a , R_z , R_q e R_t ao longo do número de peças usinadas	104
Figura 52: Evolução do diâmetro por número de peças.....	108
Figura 53: Imagens da aresta de corte anteriores à usinagem da 16ª peça	109
Figura 54: (a e b) Erros de cilindricidade e circularidade	110
Figura 55: (a) e (b) Detalhe da presença de material aderido à aresta principal de corte em grande proporção	112
Figura 56: Mapa para obtenção das imagens	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparativo entre as propriedades físicas típicas de alumínio, aço e cobre	23
Tabela 2: Comparativo entre as resistências específicas de aço e alumínio	24
Tabela 3: Classificação das ligas de alumínio	24
Tabela 4: Aplicação das ligas de Alumínio	25
Tabela 5: Limites de composição química da liga Al-Mg-Si 6061	26
Tabela 6: Significado das designações dos tratamentos das ligas Al	27
Tabela 7: Propriedades mecânicas da liga Al-Mg-Si 6061-T6	27
Tabela 8: Propriedades de alguns materiais	38
Tabela 9: Composição química do aço AISI M-35.	40
Tabela 10: Faixas de temperatura do tratamento térmico do aço AISI M-35.	41
Tabela 11: Parâmetros de desgaste em ferramentas de corte.....	41
Tabela 12: Parâmetros de rugosidade	48
Tabela 13: Classificação da adesão de revestimentos segundo VDI 3198.....	56
Tabela 14: Resultados encontrados na análise Raman para materiais carbonosos.	58
Tabela 15: Parâmetros utilizados no teste para obtenção do coeficiente de desgaste	68
Tabela 16: Parâmetros utilizados na usinagem.....	75
Tabela 17: Amostras analisadas	77
Tabela 18: Planejamento para avaliação da evolução do desgaste das arestas de corte por meio de lupa digital	79
Tabela 19: Aço AISI M-35: comparação entre os limites de composição e a composição média obtida.....	82
Tabela 20: Valores médios de R_a obtidos nas amostras anterior e posterior ao revestimento com DLC.....	86
Tabela 21: Análise da dureza do aço AISI M-35	88
Tabela 22: Coeficientes de desgaste específico	90
Tabela 23: Resultados obtidos através da deconvolução do espectrograma Raman	94
Tabela 24: Resultados obtidos no XPS.....	95
Tabela 25: Espessura do revestimento DLC sobre aço AISI-M35	100
Tabela 26: Análise da espessura do revestimento DLC em varios pontos do aço AISI-M35	100
Tabela 27: Composição química da amostra de Alumínio	102

Tabela 28: Dureza da liga Al-Mg-Si 6061-T6	103
Tabela 29: Avaliação das medidas e desvios padrões dos diâmetro, cilidricidade e circularidade	107
Tabela 30: Análise EDS ponto 1 – anterior à decapagem.....	114
Tabela 31: Análise EDS ponto 2 – anterior à decapagem.....	114
Tabela 32: Análise EDS ponto 1 posterior à decapagem.....	115
Tabela 33: Análise EDS ponto 2 posterior à decapagem.....	116

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAL	Associação Brasileira de Alumínio
AISI	Instituto Americano de Ferro e Aço (<i>American Iron and Steel Institute</i>)
CEFET	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CVD	Deposição Química à Vapor (<i>Chemical Vapor Deposition</i>)
DLC	Carbono tipo diamante (Diamond-Like Carbon)
EDS	Espectroscopia de Raio-X por Energia Dispersiva (<i>Energy dispersive X-rays Spectrometry</i>)
HSS	Aço rápido (<i>High Speed Steel</i>)
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura (<i>Scanning Electron Microscopy</i>)
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante (<i>Minimum Quantity Lubricant</i>)
POSMAT	Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais
PVD	Deposição Física à Vapor (<i>Physical Vapor Deposition</i>)
SAE	Sociedade de Engenheiros Automotivos (<i>Society of Automotive Engineers</i>)
VDI	Associação dos engenheiros alemães (<i>Verein Deutscher Ingenieure</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Grau Celsius	-
µm	Micrometros	10 ⁻⁶ m
A	Diâmetro interno da calota	µm
a-C	Carbono amorfo duro não hidrogenado	-
a-C:H	Carbono amorfo hidrogenado	-
a-C:H:Me	Carbono amorfo hidrogenado com adição de metal	-
Al	Alumínio	-
Al-Si	Alumínio e silício	-
Al ₂ O ₃	Alumina	-
B	Diâmetro externo da calota	µm
B	Boro	-
Bar	Pressão	10 ⁵ N/m ²
C	Carbono	-
Cr	Cromo	-
Cu	Cobre	-
Dd	Distância deslizada	m
g/cm ³	Densidade - Gramas por centímetro cúbico	-
HRc	Dureza Rockwell C	-
K	Coeficiente de desgaste específico	-
Kgf	Quilogramas-força	9,81N
m	Metros	-
Mg	Magnésio	-
Min	Minutos	60s
Mm	Milímetros	10 ⁻³ m
mm ³	Milímetros cúbicos	10 ⁻⁹ m ³
Mn	Manganês	-
Mo	Molibidênio	-
mW	MiliWatts	10 ⁻³ W
N	Newton	kg * m/s ²
N/m ²	Newton por metro quadrado	-
nm	Nanômetros	10 ⁻⁹ m
R	Raio da esfera	mm
R _a	Rugosidade média	µm

R _q	Desvio médio quadrático	µm
R _t	Altura total do perfil	µm
R _z	Altura máxima do perfil	µm
S	Segundos	-
Si	Silício	-
SiC	Carbeto de silício	-
sp ¹	Hibridização 1 do carbono	-
sp ²	Hibridização 2 do carbono	-
sp ³	Hibridização 3 do carbono	-
T	Espessura do revestimento	µm
ta-C	Carbono amorfo tetraédrico	-
ta-C:H	Carbono amorfo tetraédrico hidrogenado	-
ta-C:Me	Carbono amorfo tetraédrico com adição de metal	-
TiN	Nitreto de titânio	-
V	Volts	-
V	Volume de material desgastado	m ³
V	Vanádio	-
Z	Número atômico	-
Zn	Zinco	-
W	Tungstênio	-

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	21
2.1	Objetivo geral	21
2.2	Objetivos específicos	21
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1	As ligas de Alumínio	22
3.2	Processo de Usinagem	28
3.2.1	<i>As grandezas físicas envolvidas no processo de usinagem</i>	28
3.2.2	<i>A influência da temperatura no processo de usinagem</i>	29
3.2.3	<i>A formação dos cavacos no processo de usinagem</i>	30
3.2.4	<i>Aplicação do fluido de corte no processo</i>	32
3.2.5	<i>Processo de usinagem sem fluido de corte</i>	33
3.3	Processo de furação	35
3.3.1	<i>A geometria das ferramentas de corte</i>	36
3.4	Materiais utilizados em ferramentas de corte	37
3.4.1	<i>Aços rápidos para ferramentas</i>	39
3.5	Desgaste em ferramentas de corte	41
3.6	Revestimentos para ferramentas de corte	43
3.6.1	<i>O revestimento DLC aplicado a ferramentas de corte</i>	44
3.7	Engenharia de superfície	46
3.7.1	<i>Análise do atrito em superfícies</i>	46
3.7.2	<i>Parâmetros geométricos de superfícies</i>	46
3.8	Caracterização dos Materiais	51
3.8.1	<i>A técnica do caloteste e a avaliação da espessura do filme e do coeficiente de desgaste</i>	51
3.8.2	<i>A caracterização de superfícies</i>	55
3.8.3	<i>Análise da composição química</i>	58
3.8.4	<i>Avaliação dos erros de forma no processo de furação</i>	59

4 METODOLOGIA	61
4.1 Caracterização dos materiais	62
4.2 Caracterização do aço rápido AISI M-35	62
4.2.1 <i>Obtenção das amostras</i>	62
4.2.2 <i>Caracterização da composição química e microestrutura</i>	63
4.2.3 <i>Obtenção dos parâmetros de rugosidade superficial</i>	65
4.2.4 <i>Obtenção da dureza</i>	66
4.2.5 <i>Obtenção do coeficiente de desgaste</i>	67
4.3 Caracterização do revestimento DLC	68
4.3.1 <i>Obtenção das amostras</i>	69
4.3.2 <i>Análise da estrutura do filme</i>	69
4.3.3 <i>Avaliação da adesão do filme</i>	70
4.3.4 <i>Avaliação da espessura do revestimento DLC</i>	71
4.4 Caracterização da liga Al-Mg-Si 6061-T6	71
4.4.1 <i>Obtenção das amostras</i>	71
4.4.2 <i>Caracterização da composição química</i>	72
4.4.3 <i>Obtenção da Macro dureza Rockwell</i>	73
4.5 Análise de acabamento superficial, erros de forma, desgaste e adesão do material usinado à superfície da ferramenta durante o processo de usinagem da liga Al-Mg-Si 6061-T6	73
4.5.1 <i>Realização do processo de usinagem</i>	73
4.5.2 <i>Obtenção dos parâmetros de rugosidade</i>	77
4.5.3 <i>Avaliação da evolução do diâmetro e dos erros de forma macrogeométricos</i>	78
4.5.4 <i>Análise da evolução do desgaste das arestas de corte e da adesão de material usinado sobre a superfície da ferramenta</i>	78
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	82
5.1 Caracterização do aço AISI M-35	82
5.1.1 <i>Caracterização da composição química e microestrutura</i>	82
5.1.2 <i>Obtenção dos parâmetros de rugosidade superficial</i>	85
5.1.3 <i>Obtenção da dureza</i>	88

5.1.4	<i>Obtenção do coeficiente de desgaste</i>	88
5.2	Caracterização do revestimento DLC	92
5.2.1	<i>Análise da estrutura do filme</i>	92
5.2.2	<i>Avaliação da adesão do filme</i>	96
5.2.3	<i>Avaliação da espessura do revestimento</i>	99
5.3	Caracterização da liga Al-Mg-Si 6061-T6	101
5.3.1	<i>Caracterização da composição química</i>	101
5.3.2	<i>Obtenção da Dureza</i>	103
5.4	Análise de acabamento superficial, erros de forma, desgaste e adesão do material usinado à superfície da ferramenta durante o processo de usinagem da liga Al-Mg-Si 6061-T6	103
5.4.1	<i>Obtenção dos parâmetros de rugosidade</i>	103
5.4.2	<i>Avaliação da evolução do diâmetro e dos erros de forma macrogeométricos</i>	107
5.4.3	<i>Análise da evolução do desgaste das arestas de corte e da adesão de material usinado sobre a superfície da ferramenta</i>	111
6	CONCLUSÕES	118
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121

1 INTRODUÇÃO

A furação é um processo de usinagem por remoção de material muito utilizado na indústria. Estimativas do início dos anos 2000 afirmam que, na época, ela seria responsável por mais de 30% de todas as operações de usinagem e também por cerca de 40% das operações nos setores automotivo e aeroespacial (MARTINS, 2016).

Assim como outros processos existentes, a furação pode ser considerada de alta complexidade ao envolver fenômenos como deformação plástica, fratura, desgaste, dentre outros. Além disso, nela também ocorrem a geração de calor e a consequente presença de elevadas temperaturas de corte, que se constituem como importantes pontos de atenção, uma vez que podem contribuir para o processo de desgaste precoce da ferramenta de corte e para a piora no acabamento superficial da peça (RAHMATI, SARHAN, SAYUTI, 2014).

A maneira mais comum de se promover a refrigeração durante o processo de usinagem e minimizar os efeitos indesejáveis das altas temperaturas originadas, é por meio da utilização de fluido de corte. O uso de tais produtos, porém, pode ter como efeito a ocorrência de impactos ambientais, uma vez que promove a geração de resíduos, além de oferecer riscos à saúde dos operadores (GAJRANI, SURESH, SANKAR, 2018). Uma alternativa que, devido às suas propriedades de lubrificidade, pode ser considerada complementar ao emprego dos fluidos de corte é a utilização de revestimentos superficiais baseados no carbono, como o *Diamond-like Carbon (DLC)*. Esse material é capaz de combinar altos níveis de dureza, baixo coeficiente de atrito e boa resistência ao desgaste abrasivo e à corrosão, além de alta condutividade térmica e inércia química (FUKUI et al., 2004).

Os revestimentos à base de carbono amorfo já existem há mais de 60 anos, mas apenas nos últimos anos têm sido incorporados a processos em escalas industriais. Isso ocorre devido ao avanço tecnológico das técnicas de deposição, que foram capazes de ampliar consideravelmente suas aplicações, além da exploração das áreas de materiais avançados, que trouxe a flexibilização do comportamento das superfícies revestidas. Sua aplicação, além de nas ferramentas de corte, se dá também em componentes submetidos à impacto, como moldes para estampagem e trefilação, e em utilizações que envolvem atrito contínuo, como em engrenagens e pistões e em componentes submetidos à aquecimento e resfriamento rápido como moldes para injeção de plásticos (BALINIT, 2017). Segundo Silva (2014) e Zhang et al. (2015), para que a gama de aplicações desse filme continue a avançar, é necessário que seja garantida uma forte adesão ao substrato, além de um entendimento detalhado do comportamento tribológico do filme em diferentes

condições, visto que, sabe-se que o comportamento desse revestimento em serviço pode variar, a depender do substrato em que ele foi aplicado.

O alumínio é o terceiro elemento metálico mais abundante disponível no planeta (ABAL, 2020). Seu uso, principalmente, na forma de ligas, quando ele se encontra combinado com outros elementos, apresentou um grande crescimento nos últimos anos. Dentre os motivos para esse destaque estão sua baixa densidade, que contribui para que ele seja amplamente aplicado em vários setores da indústria, principalmente, quando se busca obter produtos de baixa massa, como costuma ocorrer no setor automobilístico (LIU. et al., 2020) (FARID, YUSSOF, 2020). Por outro lado, o fato do alumínio ser um material que apresenta alta ductilidade, mesmo em temperatura ambiente, faz com que, no seu processo de usinagem, ocorra um aumento das forças e uma dificuldade no controle dos cavacos, o que propicia a obtenção de peças com acabamento superficial de menor qualidade. É então com o objetivo de melhorar seu desempenho que comercialmente são utilizadas as ligas, nas quais, elementos como o Cobre (Cu), Magnésio (Mg), Manganês (Mn), Zinco (Zn), Ferro (Fe), Silício (Si), dentre outros, são adicionados (SANTOS Jr. et al., 2016).

É o caso da liga Al-Mg-Si 6061, que possui, dentre outros, magnésio e silício em sua composição. A presença desses elementos traz à liga, além da baixa densidade, própria do alumínio, propriedades como alta resistência mecânica e boa soldabilidade, características desejadas em produtos destinados a diferentes áreas, como aeroespacial, automotiva, ferroviária, marítima, dentre outras (RAHMATI, SARHAN, SAYUTI, 2014).

Martins (2016), ao realizar um estudo comparativo sobre o processo de furação em ligas de Al-Si utilizando-se tanto de brocas revestidas por DLC, quanto sem revestimento, obteve como resultado a produção de um número maior de peças com as brocas revestidas, assinalando um ganho na vida útil da ferramenta a partir da deposição do filme em média de 15%.

Ao realizar uma pesquisa sobre os aspectos tribológicos do revestimento DLC aplicado em superfícies de aço rápido, no qual foram comparados os desempenhos do revestimento DLC sobre três acabamentos diferentes, a saber, bruto, retificado e polido, Pires (2018) observou melhores resultados no acabamento retificado em relação ao desgaste abrasivo.

É então a partir desses dois estudos e de seu potencial de proporcionar melhores resultados nos processos de usinagem e, conseqüentemente, melhorias como aumento da produtividade, maior controle no acabamento superficial dos produtos, redução de custos de produção e de impacto ambiental e à saúde, que a presente pesquisa, onde se busca

avaliar a qualidade do processo de usinagem de uma liga Al-Mg-Si 6061-T6 realizado a seco, com uma ferramenta com acabamento retificado e revestida por DLC, se justifica.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar o processo de furação em ligas Al-Mg-Si 6061-T6 realizado com brocas de aço rápido AISI M-35 com acabamento retificado e revestidas por DLC.

2.2 Objetivos específicos

- Comparar os parâmetros de rugosidade superficial R_a , R_q , R_t e R_z , obtidos por rugosímetro, de amostras de aço AISI M-35 com acabamento retificado anterior e posterior à deposição de revestimento DLC.
- Caracterizar as amostras de aço AISI M-35 em relação à composição química, coeficiente de desgaste e dureza anterior e posterior à deposição de revestimento DLC.
- Caracterizar o revestimento DLC em relação ao tipo de ligações de carbono presentes através de espectroscopia Raman, ao percentual de cada um desses tipos de ligações e à presença de outros elementos químicos por XPS, e à adesão ao substrato pelo método VDI.
- Caracterizar a liga Al-Mg-Si 6061-T6 em relação à sua morfologia, composição química e dureza.
- Avaliar os erros macrogeométricos de circularidade e cilindridade, a evolução do diâmetro e o acabamento superficial, por meio dos parâmetros R_a , R_q , R_t e R_z , nos furos gerados no processo de usinagem a seco na liga de Al-Mg-Si 6061-T6, utilizando-se de brocas de aço rápido AISI M-35 revestidas por DLC.
- Analisar a evolução do desgaste das arestas de corte e a adesão de material usinado sobre a superfície da ferramenta utilizada no processo de usinagem a seco na liga de Al-Mg-Si 6061-T6, utilizando-se de brocas de aço rápido AISI M-35 revestidas por DLC.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados artigos sobre os temas tratados neste estudo como as ligas de alumínio; os processos de usinagem, principalmente, o de furação; os materiais utilizados na fabricação de ferramentas de corte; a atuação dos principais mecanismos de desgaste nessas ferramentas; o impacto da aplicação de filmes de DLC sobre a vida útil delas e; as técnicas de caracterização utilizadas.

3.1 As ligas de Alumínio

O alumínio é o terceiro elemento metálico mais abundante no planeta. Ele, contudo, não é encontrado de forma direta, em estado metálico, na crosta terrestre, mas combinado com oxigênio e outros elementos. Sua obtenção se dá por meio de um processo que tem início na mineração da bauxita que, para ser considerada economicamente viável, deve apresentar em sua composição, pelo menos, 30% de Al_2O_3 , o óxido de alumínio, também conhecido como alumina. Após sua retirada do solo, a bauxita deve ser beneficiada, o que ocorre, num primeiro momento, por meio da britagem da rocha. Em seguida, o minério é lavado com água com o intuito de reduzir o teor de sílica e então tem início a secagem. Ao final dessa etapa, é então obtida a alumina, insumo para obtenção do alumínio primário. A alumina, além de servir como insumo para a produção do alumínio, também tem várias aplicações, como a fabricação de materiais refratários, o tratamento de água, o uso em produtos abrasivos e de polimento, entre outros (ABAL, 2020) (SANTOS Jr. et al., 2016).

Após sua obtenção, a alumina deve passar por um processo que visa sua purificação. O processo mais utilizado é o chamado Bayer, nesse processo, após ser dissolvida em hidróxido de sódio, ela passa por filtragem, secagem e então é enviada à redução. Nessa etapa, a alumina é transformada no metal primário, o alumínio metálico, por meio de um processo eletrolítico, no qual, a passagem de uma corrente elétrica promove sua redução, que ocorre por meio da decantação do alumínio metálico e liberação de oxigênio (ABAL, 2020).

Dentre os principais atrativos para a utilização do alumínio está o fato dele ser considerado de fácil processamento, significando que na fabricação de produtos em alumínio, vários processos de produção podem ser utilizados. Além disso, muitas vezes, o aspecto do alumínio, simplifica ou mesmo dispensa a utilização de outros processos que visam o acabamento. Também a alta resistência à corrosão é um ponto que torna favorável

a utilização do alumínio em determinadas aplicações (LIU et al., 2020) (FARID, YUSSOF, 2020).

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. Tais características do alumínio aliadas à sua baixa densidade, contribuem para que ele seja amplamente aplicado em vários setores da indústria, inclusive, automobilístico e aeroespacial (ABAL, 2020).

Quando comparadas aos aços, as ligas de alumínio apresentam cerca de um terço da densidade e do módulo de elasticidade, além de alta condutividade térmica e elétrica e baixo ponto de fusão (SANTOS Jr. et al., 2016). Algumas propriedades físicas de alumínio, aço e cobre são apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1: Comparativo entre as propriedades físicas típicas de alumínio, aço e cobre

Propriedades físicas típicas	Alumínio	Aço	Cobre
Densidade (g.cm ⁻³)	2,70	7,86	8,96
Temperatura de fusão (°C)	660	1500	1083
Módulo de elasticidade (MPa)	70000	205000	110000
Coefficiente de dilatação térmica (L.°C ⁻¹);	23.10 ⁻⁶	11,7.10 ⁻⁶	16,5.10 ⁻⁶
Condutibilidade térmica a 25°C (Cal/cm/°C)	0,53	0,12	0,94
Condutibilidade elétrica (%IACS)	61	14,5	100

Fonte: ABAL, 2020.

O alumínio com altos teores de pureza é caracterizado por uma baixa resistência mecânica. Assim, na prática, quando uma maior resistência mecânica se faz necessária, a aplicação do alumínio costuma ocorrer na forma de ligas. Estes, por sua vez, podem ser divididos entre aqueles que conferem à liga as chamadas características principais, como é o caso da resistência mecânica, e os responsáveis pelas características acessórias, e que tem por função, por exemplo, controlar a microestrutura favorecendo a fabricação e aplicação dos produtos (GONÇALVES, 2012) (SANTOS Jr. et al., 2016).

Por outro lado, segundo Pires (2018), ao ser considerada sua resistência mecânica específica, que corresponde à razão entre a resistência mecânica e o peso específico, o alumínio apresenta valores superiores ao aço, conforme apresentado na Tabela 2:

Tabela 2: Comparativo entre as resistências específicas de aço e alumínio

Material	Resistência específica (g.cm ⁻³)
Aço	17,8 x 10 ⁵
Alumínio	21,8 x 10 ⁵

Fonte: Pires, 2018.

Os principais elementos utilizados nas ligas são o cobre (Cu), o manganês (Mn), o silício (Si), o magnésio (Mg) e o Zinco (Zn), e sua classificação é feita tendo em vista os principais elementos utilizados em cada caso, conforme apresentado na Tabela 3:

Tabela 3: Classificação das ligas de alumínio

Série	Principais elementos de liga	Trabalhável mecanicamente/ tratado termicamente
1XXX	Alumínio comercialmente puro (pureza > 99%)	Trabalhável mecanicamente
2XXX	Cu (tratado termicamente)	Tratado termicamente
3XXX	Mn (não tratado termicamente)	Trabalhável mecanicamente
4XXX	Si (não tratado termicamente)	Trabalhável mecanicamente
5XXX	Mg (não tratado termicamente)	Trabalhável mecanicamente
6XXX	Mg, Si (tratado termicamente)	Tratado termicamente
7XXX	Zn (tratado termicamente)	Tratado termicamente
8XXX	Outros elementos	
9XXX	Ainda não utilizado	

Fonte: Gonçalves, 2012 e Santos Jr. et al., 2016

Segundo Gonçalves (2012), quando fundido, o alumínio dissolve outros metais e substâncias que também agem como os metais, consideradas metaloides, como é o caso do silício. Após o resfriamento e solidificação, alguns dos constituintes ficam retidos na liga, alterando a estrutura atômica do metal, tornando-o mais rígido. Também nesse sentido, Santos Jr. et al. (2016) afirmam que a precipitação de elementos nas ligas termicamente tratáveis e o endurecimento nas ligas mecanicamente trabalháveis, promovem o aumento de propriedades mecânicas como dureza e resistência das ligas de alumínio. Isso se dá devido ao fato de compósitos como SiC, Al₂O₃, silicato de alumínio e grafite, possuírem baixa densidade específica, alta resistência mecânica, baixo coeficiente de expansão térmica, boa resistência ao desgaste, alto módulo de elasticidade, baixa ductilidade e alta condutividade térmica, sendo assim, capazes de reforçar matrizes de alumínio e dar origem

a diversificadas ligas. Isso permite uma grande variação de combinações de propriedades (SANTOS Jr. et al., 2016).

As ligas de alumínio podem ser divididas entre as conformadas, que são transformadas por meio de processos mecânicos a quente ou a frio e que são destinadas à produção de produtos semiacabados como placas e tarugos e; as ligas trabalháveis, que são ligas fundidas, que se destinam à fabricação de componentes fundidos como carcaças de motores à combustão e de caixas de transmissão (SANTOS Jr. et al., 2016) (GONÇALVES, 2012).

Tanto dentro dos grupos das ligas conformadas quanto das trabalháveis, são encontrados materiais passíveis de receberem tratamento térmico e outros que não respondem a tal tratamento, sendo passíveis apenas de serem submetidas a trabalho a frio (ABAL, 2020).

No que se refere à sua aplicação, as ligas das classes 2XXX, 6XXX e 7XXX, por exemplo, são empregadas na construção de aeronaves desde 1930 e são também as mais utilizadas nos processos de usinagem em indústrias aeroespaciais e automotivas. Isso se dá devido à sua capacidade de substituir aço e ferro fundido e à boa relação resistência-peso apresentada por elas (SANTOS Jr. et al., 2016). São mostradas na Tabela 4, algumas aplicações dessas ligas:

Tabela 4: Aplicação das ligas de Alumínio

Série	Principais aplicações
2014	Câmara de foguetes
2024-T3	Recobrimento de fuselagem e asas de aeronaves
6061	Algumas estruturas, painéis e rodas
6061-T6	Nanoestruturas de alta resistência mecânica e estabilidade térmica
6061 + partícula dura de carbeto de silício 6061 + partícula dura de óxido de alumínio Ligas Al-Si com mais de 20% de Si	Pistões, discos e tambores de freio
7050	Estruturas de aeronaves
Ligas de Al sinterizadas	Indústria automotiva

Fonte: Santos Jr. et al., 2016

A liga de alumínio 6061, assim como as outras da série 6XXX, é marcada pela presença de silício e magnésio em proporções que favorecem a formação de silicato de magnésio (Mg_2Si), o que permite que ela seja tratada termicamente. Além disso, ela

apresenta média resistência mecânica, além de boa conformabilidade, soldabilidade, usinabilidade e resistência à corrosão. Tais características fazem com que a liga 6061 seja usada com frequência em aplicações como as indústrias de aeronaves e automóveis (GONÇALVES, 2012). Os limites de sua composição química, segundo a NBR 6834 (2000), são apresentados na Tabela 5:

Tabela 5: Limites de composição química da liga Al-Mg-Si 6061

Elemento	%
Si	0,4 a 0,8
Fe	0,7
Cu	0,15 a 0,4
Mn	0,15
Mg	0,8 a 1,2
Cr	0,04 a 0,35
Zn	0,25
Ti	0,15
Outros (cada)	0,05
Outros (total)	0,15
Al	Restante

Fonte: Gonçalves, 2012.

As diferentes proporções nas quais os elementos se fazem presentes acarretam efeitos diversificados sobre as propriedades das ligas de Al. A presença de Silício (Si), por exemplo, contribui para o aumento da dureza do material. Já o Cobre (Cu) promove a melhora da usinabilidade, por diminuir a faixa da temperatura de solidificação (MARTINS, 2016).

Os tratamentos térmicos aplicados às ligas de alumínio também têm por objetivo promover o aumento da 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). São apresentadas na Tabela 6, algumas das designações utilizadas e seu significado:

Tabela 6: Significado das designações dos tratamentos das ligas Al

Designação	Significado
F	Como fabricados
O	Recozidos
H	Endurecidos por deformação
W	Solucionado
T	Tratado termicamente

Fonte: Santos Jr. et al., 2016.

No caso do Al-Mg-Si 6061, um dos tratamentos utilizados é o T6, no qual ocorre a solubilização, seguida do envelhecido artificial. O metal passa por um aquecimento até a faixa de 500°C. Esse aquecimento promove a dissolução dos elementos de liga na solução. Em seguida, é realizado resfriamento rápido, usualmente em água, que previne a precipitação dos elementos de liga. A prevenção não elimina a precipitação, que ocorre de maneira bastante fina, alcançando altos níveis de endurecimento e continua a acontecer mesmo após alguns dias. Um dos efeitos do tratamento é o aumento substancial do limite de resistência à tração e uma redução da ductilidade (ABAL, 2020) (GONÇALVES, 2012). São apresentadas na Tabela 7, suas propriedades mecânicas:

Tabela 7: Propriedades mecânicas da liga Al-Mg-Si 6061-T6

Propriedades	
Limite de resistência à tração (MPa)	310
Limite de escoamento (MPa)	275
Alongamento em 50mm (%) (Espessura da amostra 1,6 mm)	12
Dureza HB	95
Limite de resistência ao cisalhamento (MPa)	205
Resistência à fadiga (MPa)	95
Módulo de elasticidade (GPa)	69

Fonte: Gonçalves, 2012.

3.2 Processo de Usinagem

A usinagem é um processo de fabricação capaz de conferir forma, dimensões e acabamento a uma peça por meio da retirada de material em formato irregular, que recebe o nome de cavaco. Dependendo da quantidade de material retirado, o processo pode ser considerado como de desbaste, semiacabamento ou acabamento. Ele também pode ser classificado como convencional e não-convencional, a partir do método utilizado para a retirada do material. Se ele se der por meio da ação de uma força de cisalhamento executada por uma ferramenta de corte de geometria definida, é considerado convencional. Se a ferramenta utilizada não tiver geometria definida ou se forem empregadas outras modalidades de ação, como jatos d'água ou de abrasivos, ultrassom, eletroerosão, dentre outras, será considerado não-convencional (FERRARESI, 2006) (MARTINS, 2016).

A usinagem é reconhecida como o processo de fabricação mais utilizado mundialmente e, o atingimento de bons resultados em sua execução depende da definição de uma série de parâmetros em busca de uma condição ideal. Para se chegar a esse ponto, contudo, faz-se necessário um árduo trabalho de experimentação e análise de resultados. Nesse sentido, pode-se afirmar que a evolução na área da usinagem tanto da prática, quando da reflexão acerca dela.

3.2.1 *As grandezas físicas envolvidas no processo de usinagem*

Segundo NBR ISO 3002-1 (ABNT, 2013), as grandezas físicas envolvidas no processo de usinagem são responsáveis por determinar o movimento relativo que deve ocorrer entre a peça e a ferramenta. Dentre essas grandezas estão as direções, percursos e velocidade:

- Movimento de corte: ocorre entre a peça e a aresta de corte. Se não for simultâneo ao movimento de avanço, produz uma retirada única de cavaco.
- Movimento de avanço: ocorre entre a peça e a aresta de corte e, em conjunto com o movimento de corte, produz a retirada contínua de cavaco.
- Movimento efetivo: resultante dos movimentos de corte e de avanço.

As direções desses movimentos são as seguintes:

- Direção de corte: instantânea do movimento de corte.
- Direção de avanço: instantânea do movimento de avanço.
- Direção efetiva: instantânea do movimento efetivo de corte.

Os percursos da ferramenta na peça são descritos por:

- Percurso de corte (L_c): espaço percorrido pelo ponto de referência da aresta cortante sobre a peça, de acordo com a direção de corte.
- Percurso de avanço (L_f): espaço percorrido pelo ponto de referência da aresta cortante sobre a peça, de acordo com a direção de avanço.
- Percurso efetivo (L_e): espaço percorrido pelo ponto de referência da aresta cortante sobre a peça, de acordo com a direção efetiva de corte.

As velocidades são definidas por:

- Velocidade de corte (V_c): velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido do corte. É calculada a partir da equação (1):

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (1)$$

Onde d é o diâmetro da peça ou ferramenta em mm; n é o número de rotações por minuto (rpm)

- Velocidade de avanço (V_f): velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido do avanço. É calculada a partir da equação (2):

$$V_f = f \cdot n \quad (2)$$

Onde f é o avanço em mm/rev; n é o número de rotações por minuto (rpm)

- Velocidade efetiva (V_e): velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido efetivo do corte. É calculada a partir da equação (3):

$$V_e = V_c + V_f \quad (3)$$

3.2.2 A influência da temperatura no processo de usinagem

Um dos mais importantes resultados do trabalho mecânico sobre os materiais é a geração de calor. De todo o calor gerado, cerca de 70% tem origem na deformação plástica do material, enquanto os 30% restantes vem do atrito entre a ferramenta e a peça. No

segundo caso, o calor é gerado na região de cisalhamento e então conduzido para peça, cavaco e ferramenta (ENKE, 1999).

Em muitas situações, o aquecimento da peça pode ser considerado benéfico, uma vez que contribui para a redução da tensão de cisalhamento do material, o que acarreta uma diminuição na força de corte necessária. Por outro lado, em algumas situações, o aquecimento pode ter consequências como o surgimento de problemas dimensionais ou de mudança de fase nas regiões próximas à superfície usinada, o que pode acarretar mudanças em suas propriedades, além de problemas relacionados ao acabamento superficial (SANTOS, 2005), (RAHMATI, SARHAN, SAYUTI, 2014).

Em relação ao aquecimento da ferramenta, uma das consequências é a redução de sua resistência à deformação plástica e a criação de condições favoráveis a alguns mecanismos de desgaste. Isso pode resultar em uma diminuição da vida útil da ferramenta e a tentativa de controle dessa situação, por outro lado, pode trazer limitações na escolha das condições de corte, principalmente, velocidade de corte e avanço. Apesar da maior parte do calor gerado ser dissipada pelo cavaco e apenas 8% a 10% dele ser transmitida à ferramenta, a elevação da temperatura desta pode chegar a 1100°C (BRZEZINKA et al., 2019). Por isso, uma das primeiras propriedades que deve ser levada em conta na seleção dos materiais a serem utilizados nas ferramentas é a dureza à quente. Essa propriedade se refere à capacidade do material de manter os níveis de dureza originais quando submetido a altas temperaturas, e juntamente da resistência ao desgaste, se relaciona de maneira direta à capacidade de se utilizar de altas velocidades nos processos de usinagem (ROUSSEAU, 2016).

3.2.3 *A formação dos cavacos no processo de usinagem*

A formação dos cavacos tem início já na deformação, que antecede a separação do material da peça. Segundo Santos Jr. et al. (2016), o estudo de sua formação tem papel fundamental na compreensão e no aperfeiçoamento dos processos de usinagem. Machado (2015) divide esse processo de sua formação em quatro eventos:

- Recalque inicial: no momento da penetração da cunha cortante na peça, uma parte é pressionada contra a superfície de saída da ferramenta.
- Deformação e ruptura: em seguida, ocorre deformação elástica, depois, deformação plástica e então a ruptura do material, que se separa da peça. Nesse momento estão presentes não apenas tensões de cisalhamento, mas também de compressão/tração, assim como a formação de trincas.

- Deslizamento de lamelas: as características do material e as condições de avanço e velocidade utilizadas irão determinar a extensão da propagação da trinca, originando cavacos contínuos ou descontínuos.
- Saída do cavaco: a porção de material deformada e rompida então escorrega sobre a superfície de saída da ferramenta. Nesse momento, o processo tem início novamente.

Também a morfologia é um aspecto a ser analisado. Os cavacos podem ser classificados como contínuos, parcialmente contínuos, descontínuos e segmentados. Segundo o autor, a obtenção dos três primeiros tipos está relacionada à ductilidade do material usinado e aos parâmetros de corte utilizados. Já os segmentados são próprios de materiais de baixa condutividade térmica (MACHADO, 2015).

Materiais de alta ductilidade como alumínio, cobre e aços de baixa liga costumam formar cavacos contínuos, uma vez que eles passam por grandes deformações antes de cisalhar. Já o bronze e os ferros fundidos cinzentos, por não apresentarem grande ductilidade e, portanto, não suportarem grandes deformações, dão origem a cavacos descontínuos (MACHADO, 2015).

As grandes deformações, que estão presentes nos materiais dúcteis, fazem com que a área de contato peça-ferramenta seja maior do que nos materiais menos dúcteis, fazendo com que, no primeiro caso, sejam aumentadas as forças e a potência de usinagem, culminando em uma maior geração de calor. Para se combater tais fenômenos, podem ser utilizadas a adição de elementos químicos e a realização de tratamentos térmicos ou mecânicos. Essas medidas, por promoverem o aumento da dureza e da resistência mecânica, contribuem para a redução da área de contato peça-ferramenta e, conseqüentemente, para a redução das forças de usinagem e produção de calor (BRZEZINKA et al., 2019). Segundo Santos Jr. et al. (2016), em um estudo realizado, percebeu-se que a presença de partículas duras, aliada ao processo de envelhecimento do material, foi capaz de reduzir as forças de corte no processo de usinagem de algumas ligas de alumínio em, pelo menos, 10%.

Quando comparado a ligas ferrosas, como os aços, o alumínio apresenta forças de usinagem bem mais baixas, o que faz com que as tensões de corte possam ser até 70% menores que na usinagem dos aços. Por outro lado, no caso da usinagem a altas velocidades, o aumento excessivo das taxas de deformação pode aumentar as forças de usinagem. Isso pode ter um efeito mais pronunciado no alumínio que, em função de seu maior nível de ductilidade, já apresenta, naturalmente, maiores taxas de deformação e, conseqüentemente, maiores forças de usinagem (SANTOS Jr. et al., 2016).

Outros aspectos que podem contribuir para o aumento das forças de usinagem são o desgaste excessivo do flanco da ferramenta em função da presença de partículas duras na liga de alumínio e, a adesão de material da peça na superfície de corte, aumentando a área de contato peça-ferramenta, que ocorre nesses casos (SANTOS Jr. et al., 2016).

De acordo com Santos Jr. et al. (2016), em um estudo, verificou-se que a utilização de ferramentas que receberam um filme de carbono por meio de processo *Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HFCVD)* na usinagem de ligas de alumínio, permitiu a produção de menores forças de usinagem. Isso se deu devido aos altos níveis de dureza alcançados e à baixa afinidade química existente entre o revestimento e o alumínio, que propiciaram uma baixa adesividade.

Segundo Bhowmick et al. (2015), ao se analisar o comportamento tribológico de ligas Al-Si de diferentes concentrações de silício durante a furação a seco com ferramentas revestidas por diferentes tipos de Carbono, percebeu-se que houve uma grande redução na formação de aresta postiça de corte nas brocas. Por outro lado, a furação utilizando ferramentas revestidas por DLC hidrogenado em ligas de Al-Si hipereutéticas deu origem ao pior desempenho em relação à vida útil das ferramentas, uma vez que partículas de silício removeram o revestimento e então aumentaram o atrito. Ao final, os autores perceberam que o DLC hidrogenado é capaz de substituir ferramentas de diamante CVD.

A usinagem de alumínio exige a utilização de altas velocidades de corte. As forças de corte geradas, porém, são cerca de um terço daquelas geradas na usinagem do aço. A combinação de altas velocidades e altas taxas de avanço faz com que a energia de corte específica, que relaciona a energia de corte ao volume de material retirado seja baixa, devido a grandes volumes de material serem removidos. Isso se deve ao fato da energia de corte específica tender a aumentar conforme dureza e resistência mecânica aumentam, e diminuir quando taxa de avanço e velocidade de corte aumentam, já que a taxa de avanço aumenta a taxa de remoção e a velocidade de corte reduz a força de corte (SANTOS Jr. et al., 2016).

3.2.4 *Aplicação do fluido de corte no processo*

Os fluidos de corte podem ser utilizados nas formas líquida, sólida ou gasosa e sua aplicação tem, dentre outros, a capacidade de melhorar as características tribológicas dos materiais usinados (RAHMATI, SARHAN, SAYUTI, 2014). Ferraresi (2006) afirma que a função dos fluidos de corte está ligada à melhora nos processos de usinagem, podendo ser classificada como de caráter funcional ou econômico. O primeiro diz respeito à melhoria do

desempenho do processo e se relaciona a fatores como redução do coeficiente de atrito entre ferramenta e peça, maior facilidade de expulsão do cavaco da região de corte, melhorias relacionadas à refrigeração da ferramenta e da peça e ao acabamento superficial da peça. Já as melhorias de caráter econômico estão relacionadas a reduções no consumo de energia e aumento da durabilidade da ferramenta, além de proteção da peça contra corrosão.

Tais melhorias são obtidas a partir de diferentes funções desempenhadas pelo fluido de corte como lubrificação, transferência de calor e auxílio na expulsão do cavaco. No caso da lubrificação, elas podem ser percebidas quando o uso do fluido de corte promove a redução do coeficiente de atrito, favorecendo desde a diminuição na geração de calor própria do cisalhamento até a redução do consumo de energia. Essa redução do coeficiente de atrito ocorre porque o fluido de corte se insere entre as duas superfícies, separando-as. Em relação à transferência de calor ocorrida entre o conjunto peça-ferramenta e o fluido de corte, está se dá pelo aumento da área de contato entre as superfícies que é proporcionado pelo fluido de corte (ENKE, 1999). Essa redução no aquecimento da peça propicia a obtenção de peças de melhor qualidade. O auxílio na expulsão do cavaco pode ser percebido em processos como o de furação, nos quais a movimentação do fluido de corte também atua com essa função (GAJRANI, SURESH, SANKAR, 2018).

Liu et al. (2020), mencionam uma pesquisa sobre o comportamento em relação ao atrito de chapas da liga Al-Mg-Si 6061, submetidas ao processo de estampagem no qual foi comparado o desempenho a seco e com a utilização de lubrificante, notou-se que quando foi utilizado grafite como lubrificante, foram encontradas condições melhoradas de lubrificação, inclusive, com um baixo coeficiente de atrito.

Por outro lado, também é importante mencionar que o uso de fluidos de corte tem impactos nos custos de produção devido à necessidade de sua aquisição, armazenamento, preparo, controle, descarte e reciclagem, por isso, seu uso deve ser feito de forma assertiva. Há, inclusive, estudos que apontam que o custo da utilização de fluidos de corte pode ser superior ao empregado em ferramentas de corte (RAHMATI, SARHAN, SAYUTI, 2014).

3.2.5 *Processo de usinagem sem fluido de corte*

Frente à complexidade envolvida no uso de fluidos de corte, há uma série de estudos sobre esse tema. Parte deles refere-se à utilização de uma mínima quantidade de fluido de corte, técnica conhecida como técnica *Minimal Quantity Lubrication (MQL)* ou Mínima Quantidade de Fluido de Corte (MQFC). Outros estudos são a respeito da utilização de

fluidos de corte ambientalmente amigáveis. E outra parcela é realizada sobre situações em que nenhum tipo de fluido é utilizado, quando é realizada a usinagem é realizada a seco (GAJRANI, SURESH, SANKAR, 2018).

Segundo Castro (2001), foi a necessidade da redução do impacto ambiental gerado pelos meios de produção que surgiu como um dos propulsores dos estudos relacionados à diminuição do uso de fluidos de corte e da usinagem a seco.

A técnica MQFC representa uma alternativa intermediária entre a usinagem convencional e a usinagem a seco. Sua aplicação é realizada em situações nas quais não é possível abrir mão integralmente do fluido de corte, mas em que é possível utilizar-se de pequenas quantidades dele. De uma maneira específica, na técnica MQFC, o fluido é aplicado diretamente na zona de corte. O uso de menores quantidades de fluido promove uma redução de custos, além de proporcionar melhores condições de segurança ambiental e de saúde dos trabalhadores (RAHMATI, SARHAN, SAYUTI, 2014).

Por outro lado, tanto na usinagem realizada a seco quanto utilizando-se de uma mínima quantidade de fluido de corte, as funções realizadas pelo fluido como lubrificação, refrigeração e transporte de cavacos, são inexistentes ou diminuídas. A diminuição ou ausência de lubrificação gera um maior atrito, provocando o aumento das temperaturas na região. Além disso, 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. De acordo com Dasch et al. (2006), a esse fenômeno causador de desgaste está relacionado o fato de, em uma pesquisa realizada sobre o processo de furação em uma liga de alumínio, realizado sem fluido de corte, a vida útil da ferramenta de corte ter sofrido uma redução de 10.000 para 40 furos.

Uma alternativa que pode auxiliar na viabilização da usinagem a seco é por meio da aplicação de revestimentos às ferramentas de corte. Materiais capazes de aliar baixo coeficiente de atrito e elevada dureza a quente aliados à utilização de parâmetros específicos de usinagem são capazes de permitir a eliminação da utilização de fluidos de corte em determinadas situações. Tais materiais são capazes de impedir o aumento das temperaturas proveniente do atrito, característica própria do processo de usinagem. Assim, uma quantidade menor de calor precisa ser dissipada (ENKE, 1999).

Segundo Dasch et al. (2006), ao se 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 100 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.

De acordo com Fukui et al. (2004), na comparação dos valores de rugosidade superficial obtidos a partir do fresamento de ligas de alumínio em duas condições: revestido em DLC e executado a seco e, sem revestimento e com uso de fluido de corte, 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. Também no que refere à adesão de alumínio à ferramenta, os autores relatam que tal fenômeno foi verificado apenas na ferramenta sem revestimento por filme e por meio de imagens obtidas em Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e análise por *Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)*. Essa característica também foi observada no teste de pino-sobre-disco, destinado à obtenção do coeficiente de atrito, e que foi realizado pelos autores nos pares tribológicos DLC/liga de alumínio e metal duro/liga de alumínio. O resultado obtido foi cerca de 87,5% menor no primeiro caso, se comparado ao segundo.

Também foram encontrados estudos a respeito da relação entre a espessura do filme depositado sobre a ferramenta e alterações verificadas na rugosidade da superfície após a deposição. A conclusão a que se chegou foi de que, revestimentos de maior espessura costumam resultar em maiores valores de R_a (Fukui et al., 2004).

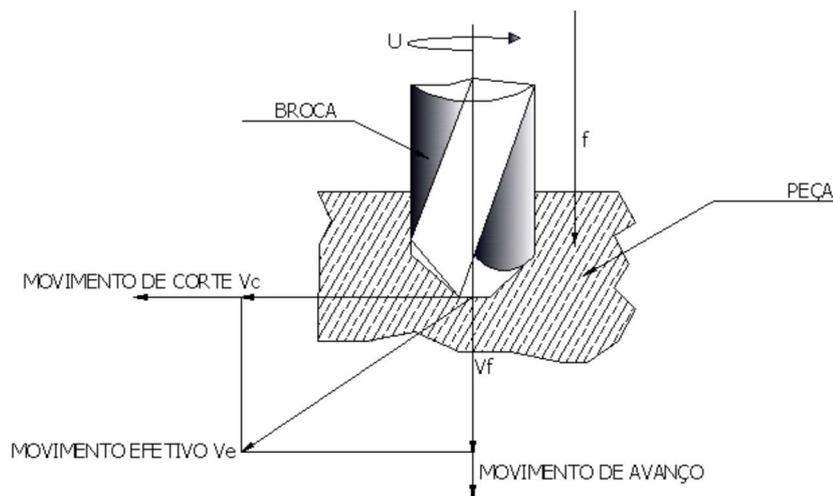
3.3 Processo de furação

A furação é um processo de usinagem convencional. Seu objetivo é o de obtenção de uma superfície cilíndrica interna, coaxial ao eixo de rotação do movimento de corte. O material é removido da peça por cisalhamento e a essa porção que foi retirada, dá-se o nome de cavaco. Para a abertura dos furos são utilizadas as brocas, que podem ser de vários tipos, dentre os quais, as helicoidais, que são as mais comumente utilizadas (SANTOS, 2005) (STEMMER, 1995).

Por ser um processo de alta complexidade, a furação pode envolver vários fenômenos como deformação plástica, fratura, impacto, desgaste, dentre outros. Além deles, 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, por exemplo, a inexatidão dimensional dos furos, além de danos ao

acabamento superficial (BRZEZINKA et al., 2019) (MARTINS, 2016). A cinemática do processo de furação é apresentada na Figura 1:

Figura 1: Cinemática do processo de furação



Fonte: Martins, 2016

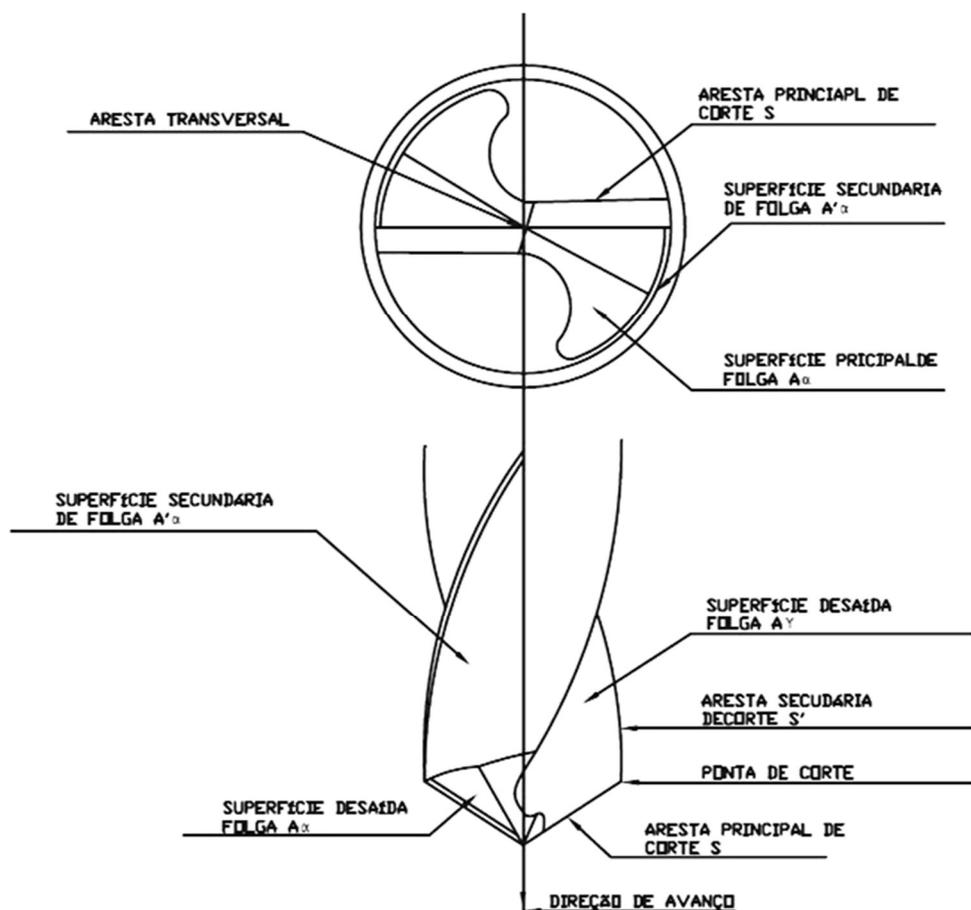
3.3.1 A geometria das ferramentas de corte

A utilização de ferramentas de corte com geometria adequada ao processo é condição essencial para que a operação de usinagem aconteça de maneira exitosa. As definições a seguir são apresentadas por NBR ISO 3002-1 (ABNT, 2013). A partir delas são determinados os ângulos da cunha cortante das ferramentas de usinagem:

- Superfície de saída (A_γ): superfície sobre a qual o cavaco se move.
- Superfícies principal e secundária de folga (A_α e A_α'): superfícies que determinam a folga entre a ferramenta e a superfície a ser usinada. A partir da intersecção dessas duas superfícies tem-se as arestas de corte:
- Aresta principal de corte (S): indica a direção de avanço.
- Aresta secundária de corte (S'): indica a direção contrária à direção de avanço.

A intersecção das duas arestas corresponde à ponta de corte. As arestas e superfícies de uma broca helicoidal são apresentadas na Figura 2:

Figura 2: Arestas e superfícies de broca helicoidal



Fonte: Machado, 2015

3.4 Materiais utilizados em ferramentas de corte

Para que ocorra a remoção de material, é necessário que a fabricação da ferramenta seja realizada utilizando-se de um material mais resistente que o da peça que está sendo produzida. Até o início do século XIX, os aços-carbono eram os materiais mais utilizados na fabricação de ferramentas de corte. Com o passar do tempo, ainda no século XIX, foram introduzidas as baixas e médias ligas de aço carbono, o que representou uma primeira inovação no que se refere aos materiais utilizados nas ferramentas de usinagem. Uma importante limitação, porém, era encontrada nesses aços, que perdiam a dureza quando eram aquecidos na faixa entre 300°C e 600°C, temperaturas que podem estar presentes em determinadas situações de usinagem. Com o passar do tempo, novos materiais surgiram e essas ligas deixaram de ser as mais utilizadas, apesar de ainda hoje serem aplicadas em determinadas situações, como quando são utilizadas baixas velocidades de corte, e na confecção de ferramentas de conformação (MACHADO, 2015).

Dentre os novos materiais citados, está o primeiro aço rápido. Surgido no final do século XIX, ele continha Carbono, Tungstênio, Cromo, Manganês e Vanádio em sua composição, elementos que já estavam presentes nas ligas baixas e médias de aço carbono, porém, em composições diferentes. A utilização de novas composições fez com que o tratamento térmico que até então era realizado nos aços carbono também tivesse de ser alterado para ser aplicado no aço rápido. Na época, as velocidades de corte e, conseqüentemente, a produtividade, puderam ser aumentadas em cerca de dez vezes. Foi isso, inclusive, que fez com que eles recebessem o nome aço rápido, originalmente, *High Speed Steel (HSS)*. Até os dias atuais, as ferramentas em aço rápido continuam a ser largamente utilizadas, apesar de novos materiais já terem sido desenvolvidos (ROUSSEAU, 2016).

Apesar do desenvolvimento de pesquisas na área, não há, contudo, um material considerado perfeito a ser utilizado na confecção de ferramentas de usinagem, de maneira que, faz-se necessários definir quais materiais utilizar a partir da análise de cada situação. Estão relacionadas na

Tabela 8, algumas propriedades de materiais como o aço rápido M2, a alumina branca e o diamante natural:

Tabela 8: Propriedades de alguns materiais

Propriedades	Aço rápido (M2)	Alumina branca	Diamante Natural
Composição básica (% em massa)	0,85 C; 4 Cr; 5 Mo; 6,5 W; 2 V	90-95 Al ₃ O ₃ ; 5-10 ZrO ₂	100 C
Densidade (g/cm ³)	7,85	3,8 - 4,0	3,5
Dureza a TA (HV)	850	1700	n.a
Dureza a 1000°C (HV)	n.a	650	n.a
Resistencia à fratura ou tenacidade (MPa.m ^{1/2})	17	1,9	3,4
Condutividade térmica (W/m °C)	37	8-10	900
Módulo de Young (kN/mm ²)	250	380	964

Fonte: Adaptado de Machado (2015)

Nesse sentido, uma alternativa que pode trazer melhores resultados 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, conseqüentemente, expressivas melhorias no desempenho das ferramentas. Essas melhorias referem-se, basicamente, à redução do atrito e, conseqüentemente, 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).

3.4.1 Aços rápidos para ferramentas

A principal característica dos aços rápidos é a capacidade de manter altos níveis de dureza a elevadas temperaturas. Isso permite que eles sejam aplicados na fabricação de ferramentas de corte, que poderão utilizadas em materiais de média e alta resistência e em altas velocidades e que, por isso, estarão sujeitas a altas temperaturas. Contribuem para esse regime de utilização, o fato dos aços rápidos apresentarem bons níveis de tenacidade, resistência à abrasão e estabilidade dimensional (MARTINS, 2016).

Silva e Mei (2010) mencionaram a similaridade entre as características metalúrgicas dos aços rápidos, apesar de suas variadas composições químicas. Uma das características comuns entre eles é a presença suficiente de carbono para combinar-se com os elementos da liga e então produzir carbonetos de elevada dureza e capacidade de abrasão. Entre os elementos de liga presentes no aço rápido estão cobalto, cromo, molibdênio, tungstênio e vanádio, materiais que, por possuírem alto valor comercial, acabam por encarecer a produção do aço rápido, apesar de conferir longa vida às ferramentas. Tal incremento na vida das ferramentas se dá devido ao fato dos carbonetos atuarem como partículas duras capazes de melhorar a resistência ao desgaste.

O primeiro aço rápido foi desenvolvido em 1910 e tinha a seguinte composição: tungstênio (18%), cromo (4%), vanádio (1%) e era chamado T1. Até a Segunda Guerra Mundial, foram utilizados apenas os aços da série T, ao tungstênio. Os aços rápidos ao molibdênio, da série M, foram desenvolvidos somente após esse período. Em comparação ao tungstênio, o molibdênio possui um peso atômico de aproximadamente metade. Isso faz com que uma mesma quantidade de molibdênio resulte no dobro de carbonetos.

A formação de carbonetos que ocorre a partir da combinação entre o carbono e os elementos de liga faz com que a solidificação dos aços rápidos, durante seu processamento, seja complexa, ocorrendo fora de equilíbrio e fazendo com que eles fiquem distribuídos de maneira não uniforme na matriz. No entanto, é importante que as dimensões e morfologia dos carbonetos seja controlada, uma vez que eles podem atuar como um local de iniciação de fratura, capaz de conduzir à falha da ferramenta (MARTINS, 2016).

Além disso, o aumento da dureza a fim de aumentar a resistência ao desgaste é frequentemente acompanhado da diminuição da tenacidade, o que traz prejuízos em

condições de trabalho onde são encontrados altos valores de tensões, como é o caso da usinagem. Assim, também é importante que, por meio do controle preciso do desenvolvimento da microestrutura, seja possível otimizar a relação dureza-tenacidade. Uma alternativa capaz de melhorar o desempenho do aço é a realização de trabalho a quente posterior à conformação, com o objetivo de melhorar a distribuição dos carbonetos na matriz, tornando-a mais uniforme (MARTINS, 2016).

O aço AISI M-35 é um aço rápido com molibdênio e cobalto, marcado por alta capacidade de retenção de corte e tenacidade, sendo recomendado para a utilização em ferramentas de corte destinadas à usinagem de materiais de alta resistência. Além disso, o AISI M-35 é um substrato adequado para receber revestimentos tanto por processo PVD quanto por CVD, que podem alcançar, respectivamente, até 250°C e 500°C. Ambos trazem importantes incrementos à sua vida útil (Perus et al., 2017) (VILLARES, 2020). A composição química do aço AISI M-35 encontra-se descrita na Tabela 9:

Tabela 9: Composição química do aço AISI M-35

Elemento	%
Carbono (C)	0,92
Cromo (Cr)	4,15
Molibdênio (Mo)	5,0
Tungstênio (W)	6,3
Vanádio (V)	1,85
Cobalto (Co)	4,8
Ferro (Fe)	Restante

Fonte: Villares, 2020.

Classificado como hipereutetóide por possuir um teor de carbono acima de 0,77%, quando em temperatura ambiente, a dureza do M-35 encontra-se na faixa de 66,5HRC, podendo chegar a 57,5HRC se exposto à temperatura de 620°C (CHIAVERINI, 2008). As faixas de temperatura utilizadas no tratamento térmico do AISI M-35 encontram-se na Tabela 10:

Tabela 10: Faixas de temperatura do tratamento térmico do aço AISI M-35

Tratamento	Faixa de temperatura (°C)
Recozimento	871-899
Têmpera	1218-1246
Revenido	538-593

Fonte: Chiaverini, 2008

3.5 Desgaste em ferramentas de corte

As interações ocorridas entre ferramenta, cavaco e peça durante o processo de usinagem são causa de desgaste da ferramenta e de outros tipos de danos como deformação plástica, adesão de material e ocorrência de trincas térmicas ou mecânicas (DINIZ et al., 2016).

No caso do desgaste, este pode ser definido como uma alteração no formato das ferramentas ocorrida durante o processo de usinagem, e que tem por resultado sua deformação ou a perda progressiva de material (ABNT, 2017).

A NBR ISO 3685 (ABNT, 2017) traz os parâmetros que devem ser utilizados para quantificar esses desgastes em brocas helicoidais. Dentre eles, os principais parâmetros são apresentados na Tabela 11:

Tabela 11: Parâmetros de desgaste em ferramentas de corte

Parâmetros de desgaste	Tipo de desgaste;
K_t	profundidade da cratera
VB_B	largura média do desgaste de flanco
$VB_{Bmáx}$	largura máxima do desgaste de flanco

Fonte: ABNT, 2017

Segundo Diniz et al. (2016), os mecanismos que causam tanto desgaste, quanto danos à aresta de corte das ferramentas são os mesmos. Eles estão relacionados à aderência (attrition), abrasão, difusão e variações térmicas e mecânicas das cargas, conforme se segue:

- Aderência e arrastamento (*attrition*): frequentemente chamado de adesão, é característico de baixas velocidades de corte, onde o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta se torna irregular. Pode, contudo, ocorrer também em altas velocidades de corte, desde que o fluxo de material sobre a superfície da ferramenta também seja irregular. É um fenômeno que se processa no nível dos

grãos e que pode ocorrer em conjunto com a Aresta Postiça de Corte (APC), quando fragmentos da ferramenta são arrancados junto dela.

- **Abrasão:** refere-se à perda de material quando este é removido por partículas duras que podem se encontrar soltas entre duas superfícies em movimento relativo ou fazer parte de uma delas. O primeiro caso é a abrasão a três corpos e o segundo, abrasão a dois corpos. Ambos podem estar presentes na usinagem, na abrasão a dois corpos, partículas duras fazem parte da peça ou cavaco, o que causa desgaste na ferramenta. Já na abrasão a três corpos, as partículas abrasivas se desprenderam da peça ou do cavaco e encontram-se mergulhadas no fluxo do material. No desgaste abrasivo podem estar presentes deformação plástica e fratura frágil. No primeiro caso, ocorre o deslocamento do material para as laterais de um sulco formado por microssulcamento. No segundo, o microcorte ou microlascamento acarretam a perda do material também com geração de sulcos. Esse mecanismo se faz muito presente na usinagem com ferramentas de aço rápido, revestidas, puras e mistas. Martins (2016) afirma que o desgaste por abrasão é o principal responsável pelo desgaste da ferramenta tanto frontal quanto de cratera.
- **Difusão:** diz respeito à transferência de material em nível atômico. Depende de temperatura, tempo e solubilidade. Ocorre a partir do contato do cavaco com a chamada zona de fluxo. A situação se agrava com o aumento da velocidade de corte, uma vez que ela faz com que também aumente a temperatura, fonte de energia para a difusão. Martins (2016) observa que, nos casos em que a difusão pode ser definida como o principal mecanismo de desgaste, a utilização de um revestimento com a finalidade de reduzir o atrito de contato e a temperatura na interface pode se constituir como uma medida importante para redução do desgaste.
- **Desgaste de entalhe:** suas causas são diversas e podem estar relacionadas à concentração de tensões na superfície da peça; à formação de trincas térmicas devido ao alto gradiente de temperatura na superfície; à presença de uma rebarba na aresta da superfície previamente usinada; à presença de uma camada abrasiva de óxidos na superfície; à fadiga da ferramenta; á partículas da ferramenta depositadas na superfície da peça. Ele se faz presente, principalmente, na usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas, realizada por ferramentas de metal duro e cerâmicas.
- **Deformação plástica por cisalhamento a altas temperaturas:** as altas temperaturas verificadas na interface ferramenta/cavaco são capazes de causar queda na resistência ao escoamento no material da ferramenta na região da superfície de

saída. Uma das consequências pode ser o material ser cisalhado junto com o cavaco e arrancado da ferramenta, o que promove a formação de uma cratera no lugar.

3.6 Revestimentos para ferramentas de corte

A deposição de revestimentos tem por objetivo alterar as propriedades superficiais de uma determinada peça. Tais propriedades podem ser óticas, magnéticas, eletrônicas, químicas e relativas às resistências mecânica e ao desgaste. Quando aplicados às ferramentas, o objetivo dos revestimentos, de uma forma geral, é o de alterar suas características tribológicas proporcionando um aumento em sua vida útil. Outros efeitos como o aumento da velocidade de corte, a redução das forças de corte e da tendência à adesão também podem ser obtidos a partir da aplicação de filmes (FUKUI et al., 2004).

As primeiras ferramentas revestidas colocadas no mercado utilizavam TiC – Carboneto de Titânio e apresentavam um bom desempenho no que se refere à resistência ao desgaste abrasivo, adesivo, oxidação e deformação plástica. Tal desempenho, contudo, não era alcançado em todos os processos de usinagem, de maneira que, por exemplo, se no torneamento, os resultados se mostravam bastante satisfatórios, no processo de fresamento eles se mostravam deficientes (LEE et al. *apud* SANTOS, 2005)..

Com a evolução das pesquisas na área, foi possível entender que essa parcela de insucesso estava relacionada ao processo utilizado na deposição do revestimento. No início era utilizado o processo de deposição química chamado *Chemical Vapour Deposition* (CVD), que ocorria em temperaturas na faixa de 900°C a 1100°C. A exposição a faixas tão altas de temperaturas fazia com que surgisse na interface entre o revestimento e o substrato o que era conhecido como camada “eta”, uma camada de espessura próxima à do revestimento, mas que possuía elevados níveis de fragilidade, o que acabava por tornar frequente a quebra das ferramentas (EL-ESKANDARANY, 2015).

Com o passar do tempo, um novo processo de deposição foi criado, o *Physical Vapour Deposition* (PVD). A principal característica que diferenciava o processo era a temperatura na qual ele ocorria, em torno de 500°C. Esse diferencial evitava a formação da camada “eta” e, além disso, trazia menores consequências à microestrutura do material da ferramenta (EL-ESKANDARANY, 2015).

Ambos processos utilizados na deposição de filme são realizados em câmaras sob vácuo. No CVD ocorre uma reação química entre elementos diferentes, sob a forma de vapor, que ao reagirem entre si, dão origem ao filme que é depositado sobre o componente desejado.

No PVD, o material a ser aplicado na forma de filme é inserido dentro de uma câmara também sob a forma de vapor, juntamente com outro gás reativo. Não ocorre, porém, uma reação química entre eles, mas sim um processo físico que faz com que o material do filme seja depositado sobre o material que se deseja cobrir. Além disso, a exposição a temperaturas mais baixas, no caso do processo PVD, preserva a microestrutura do material (PIRES, 2018).

Há também uma diferença na espessura dos revestimentos obtidos a partir de cada processo. Pesquisas realizadas em revestimentos produzidos pelo processo CVD encontraram valores entre $0,030\mu\text{m}$ e $3,3\mu\text{m}$ de espessura (SALAH et al., 2016; CONSTANTINOU et al., 2017; HADDOCK, D. et al., 2016; DALIBÓN et al., 2019). Já estudos em filmes obtidos por PVD obtiveram valores na faixa de $0,05\mu\text{m}$ e $2\mu\text{m}$ (POPESCU et al., 2017; KUMAR et al., 2020).

3.6.1 O revestimento DLC aplicado a ferramentas de corte

O carbono pode ser encontrado em três diferentes hibridizações: sp^3 , sp^2 e sp^1 . Dessa forma, ele é capaz de se apresentar por meio de várias formas de estruturas cristalinas e também por algumas formas amorfas, como é o caso do DLC, que corresponde a uma forma metaestável do carbono onde predominam as ligações sp^3 . A relação entre as hibridizações sp^2 e sp^3 , próprias da grafita e do diamante, respectivamente, e presentes no DLC, são responsáveis por características próprias a cada filme, como dureza e resistência ao desgaste. Além disso, nele também pode ser verificada a presença de hidrogênio que também tem influência sobre as características do revestimento (ROBERTSON, 2002).

Utilizado na fabricação de revestimentos, o DLC é capaz de combinar propriedades como alta dureza, baixo coeficiente de atrito, boa resistência ao desgaste e à corrosão, propriedades caras ao ramo da usinagem. Além disso, outras propriedades como elevada resistividade elétrica e inércia química, permitem a aplicação do DLC em áreas como eletrônica e a biomédica (MARTINS, 2016).

Ao ser utilizado no revestimento de ferramentas, um importante aspecto que deve ser observado é a adesão do DLC. Lenz et al. (2020) afirmam que a força de adesão dos revestimentos aos substratos é uma das mais importantes características dos revestimentos, à medida em que ela influencia fortemente as possíveis aplicações, principalmente, para componentes submetidos a desgaste. Além disso, nos casos em que, por exemplo, a deposição do revestimento ocorre pelos processos PVD e CVD, grandes

diferenças nas forças de adesão são verificadas, tanto em função do processo utilizado, quanto das condições das superfícies.

Segundo Martins (2016), a utilização de uma camada intermediária entre o filme e o substrato revestido pode aumentar a força de adesão do filme, contribuindo para a vida útil da ferramenta. O autor menciona também uma variedade de elementos que já foi utilizada com essa finalidade, dentre os quais, Si, Cr, Ti, Ta, W.

3.7 Engenharia de superfície

3.7.1 *Análise do atrito em superfícies*

Machado (2015), ao se referir ao movimento relativo entre duas superfícies, afirma que quando este se encontra na iminência de acontecer, a área de contato entre as duas superfícies é sempre muito menor que a área aparente. Isso se dá em função das irregularidades que se fazem presentes nas superfícies, próprias do acabamento superficial e que podem ser mensuradas pelos parâmetros de rugosidade. Assim, ao ser aplicada uma Força Normal, ocorre a deformação plástica desses pontos de contato e o consequente aumento da área de contato real. A força de atrito então aumenta de maneira proporcional, tendo o valor do coeficiente de atrito como limite dessa proporcionalidade. Até aí o comportamento do material é regido pela lei de Coulomb. Se o aumento da força Normal continua a ocorrer, pode-se atingir uma situação em que todos os pontos de contato se deformarão e a área de contato real equivalerá à área de contato aparente. A força Normal necessária para que isso ocorra é chamada Força Normal Limite e, a partir desse ponto, não se está mais sob a influência da Lei de Coulomb, de maneira que a Força de atrito não mais se altera, passando a ser constante e assumindo o valor necessário para vencer a resistência ao cisalhamento do material menos resistente (MACHADO, 2015).

Pode-se afirmar que o atingimento da Força Normal limite é condição para que aconteça a usinagem dos materiais. Também nesse sentido, pode-se afirmar que em superfícies que apresentem um nível maior de irregularidades, será necessária a aplicação de uma maior força Normal (W) para a realização da usinagem (MACHADO, 2015).

3.7.2 *Parâmetros geométricos de superfícies*

3.7.2.1 *Rugosidade*

A rugosidade de uma superfície é uma característica que têm origem no processo de usinagem e é fundamental levá-la em consideração tendo-se em vista a aplicação do produto que se busca obter, uma vez que, cada tipo de aplicação exige que sejam atingidos determinados níveis de rugosidade (SANTOS, 2005).

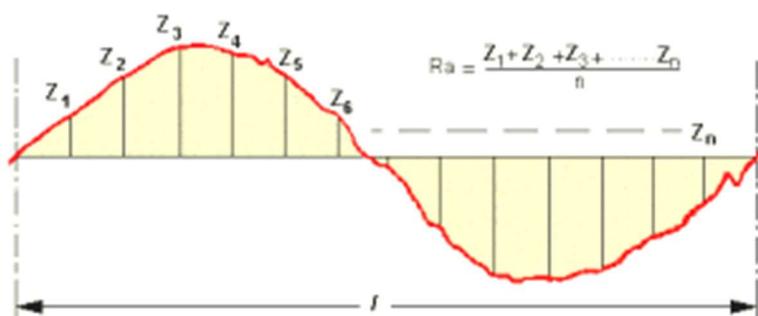
Tais níveis influenciam na qualidade do deslizamento, na resistência ao desgaste, na possibilidade de ajuste, no caso do acoplamento forçado, na resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes, na aderência a camadas protetoras, na

resistência a corrosão e fadiga, na vedação, na aparência, dentre outros. É por isso que, duas superfícies que apresentam movimento relativo, por exemplo, se forem lubrificadas, precisarão garantir certos níveis de rugosidade para que o lubrificante seja retido. Peças que forem destinadas à pintura e cujo visual exige brilho, por sua vez, deverão apresentar menores níveis de rugosidade em função de sua aparência final. Por outro lado, existem diversas aplicações que não requerem níveis baixos de rugosidade (SANTOS, 2005).

Uma peça usinada pode ser avaliada em termos macro e micrométricos. O primeiro caso corresponde a dimensões, forma e orientação e depende, normalmente, da natureza da operação e da rigidez da máquina ferramenta utilizada. O segundo caso diz respeito à rugosidade e tem sua origem nas imperfeições dos mecanismos das máquinas-ferramenta, nas vibrações no sistema peça-ferramenta, no desgaste das ferramentas e no método de conformação da peça (MACHADO, 2015).

É apresentada na Figura 3 a representação dos picos e vales encontrados em uma superfície, e a forma de se calcular, a partir deles, um dos parâmetros utilizados, a rugosidade média R_a . Nela também se encontra representada a linha de centro, uma linha imaginária que corta a superfície com o objetivo de dividir as regiões de picos e vales:

Figura 3: Rugosidade média R_a



Fonte: (WHITEHOUSE, 1994).

Na Tabela 12, alguns parâmetros de rugosidade são apresentados:

Tabela 12: Parâmetros de rugosidade

Símbolo	Nome	Definição
R _a	Desvio aritmético médio	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem
R _q	Desvio médio quadrático	Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem
R _t	Altura total do perfil	Soma da maior altura do pico e da maior profundidade do vale no comprimento de amostragem
R _z	Altura máxima do perfil	Soma da altura máxima dos picos e a maior profundidade dos vales no comprimento de amostragem

Fonte: Machado, 2015.

Para a medição da rugosidade podem ser utilizados instrumentos de contato ou óticos. No caso dos instrumentos de contato, conhecidos como rugosímetros, um apalpador se desloca na direção vertical acompanhando o perfil da superfície. O sinal obtido a partir desse deslocamento é ampliado e então pode ser registrado na forma de um gráfico ou traduzido em valores referentes aos parâmetros medidos. No caso dos instrumentos óticos, um feixe luminoso incide sobre a superfície. A forma como essa luz é refletida corresponde ao sinal que deverá ser decodificado a fim de que sejam obtidos os parâmetros avaliados (SANTOS, 2005). Tais parâmetros podem ser divididos em:

- Parâmetros de amplitude: determinados pela diferença entre a altura dos picos e vales verificados nas regiões avaliadas;
- Parâmetros de espaço: determinados pelo espaçamento entre as irregularidades.
- Parâmetros híbridos: correspondem à combinação dos parâmetros de amplitude e de espaço.

O comprimento da amostragem é definido como o comprimento na direção do eixo utilizado na identificação das irregularidades. Além dele há também o comprimento de avaliação, que contém um ou mais comprimentos de amostragem. A norma NBR ISO 4288 recomenda que o comprimento de avaliação deve equivaler a cinco comprimentos de amostragem (ABNT, 2008).

3.7.2.2 *Análise de desgaste em calotas*

A tribologia é uma ciência que se dedica ao estudo das interações entre superfícies que se encontram em movimento relativo. Seu estudo envolve áreas como atrito, desgaste e lubrificação. O interesse por essa área é recente e foi despertado a partir de estudos que quantificaram o montante financeiro que era perdido em função do desgaste. Os estudos então evoluíram para uma abordagem multidisciplinar do problema que envolve campos como o da Engenharia, Ciência dos Materiais, Tecnologia da superfície e Química (JOST, 1990) (CAI et al., 2020).

De uma forma geral, o desgaste pode ser definido como um dano em uma superfície que envolve perda de massa e que ocorre em função de um movimento relativo entre essa superfície e outros materiais (COZZA, 2006).

Apesar do interesse pelo desgaste ser recente, os primeiros estudos sobre o atrito têm sua origem no Renascimento, na figura de Leonardo DaVinci (1452-1519), que mediu as forças de atrito de corpos deslizando sobre superfícies em planos horizontais e inclinados. O atrito pode ser importante, como no caso dos sistemas de freio automotivos, onde ele tem a função de parar o veículo, mas também pode ser fonte de preocupação, como em outros tipos de tribosistemas, onde o desgaste proveniente do atrito não é desejado. O nome de tribosistema refere-se ao conjunto formado por um corpo, um contra-corpo e uma camada de elementos interfaciais, dispostos em um mesmo ambiente (HUTCHINGS, 1992).

Os mecanismos de desgaste existentes são:

- Abrasivo, que pode ser definido como aquele que ocorre devido a partículas ou protuberâncias duras que se movem ao longo de uma superfície sólida. Pode ser a dois corpos típico, quando a substância abrasiva se encontra ligada a uma das superfícies; a dois corpos, quando o abrasivo está livre sobre a superfície; a três corpos com o diâmetro do abrasivo igual à distância entre as superfícies e; a três corpos com o diâmetro do abrasivo menor que a distância entre as superfícies.
- Erosivo, que ocorre quando há uma perda progressiva de material de uma superfície sólida que se encontra em interação com um fluxo que pode conter tanto partículas sólidas, quanto líquidas ou ambas. Esse fluxo pode causar, em um primeiro momento, tanto a deformação plástica da superfície quanto a adesão das partículas presentes sobre ela, ocasionando, inclusive, um ganho de massa momentâneo.
- Adesivo, acontece entre superfícies sólidas que se encontram em movimento relativo e cujo movimento sofre resistência por parte da força de atrito. Envolve as forças que

promovem as ligações atômicas e moleculares e que, a depender das características de cada material podem ser mais fortes, no caso de haver compatibilidade entre eles, ou mais fracas, quando se dá entre materiais incompatíveis.

- Por fadiga superficial, correspondendo à fratura que tem sua causa em tensões cíclicas de deslizamento ou rolamento. Tem sua origem em uma trinca ou fissura subsuperficial que tem origem em regiões frágeis do material. Em seguida, a trinca avança para a superfície e tem origem uma cratera.

Cozza (2006) promove ainda uma discussão acerca da diferenciação entre os desgastes abrasivo e micro-abrasivo. Segundo o autor, essa diferenciação pode ser atribuída tanto em função da ordem de grandeza nas quais se encontram as taxas e coeficientes de desgaste, que podem chegar a 10^5 vezes maiores no caso do desgaste abrasivo, quanto em função do desgaste micro-abrasivo. O autor afirma também que este encontra-se relacionado ao desgaste abrasivo a três corpos ou ao desgaste por rolamento, enquanto o desgaste abrasivo manteria sua relação com o desgaste a dois corpos e o desgaste por riscamento.

Uma das principais técnicas que visa realizar a análise quantitativa do desgaste é a do caloteste, que consiste na retirada de material por meio de desgaste abrasivo a três corpos, realizado por líquido abrasivo que se movimenta sobre uma superfície a partir da rotação de uma esfera. Por meio de uma relação entre o volume de material removido, a carga Normal aplicada e a distância percorrida pela esfera sobre a superfície, obtém-se o coeficiente de desgaste específico.

3.7.2.3 *Análise da dureza*

Relacionada à resistência mecânica dos materiais, a dureza é uma grandeza que corresponde à resistência à deformação plástica oferecida por um material à penetração ou riscamento. Nesse sentido, é uma propriedade importante na avaliação do desgaste.

A dureza, frequentemente pode ser avaliada de maneira relativa, como no caso dos minerais, que tem como referência a escala Mohs, que classifica a habilidade de um material em resistir ao riscamento provocado por outro material (CIMM, 2020). Também é frequente a utilização de métodos de avaliação de dureza relativa, que ocorre da seguinte maneira: pode-se ter um material **A** que é capaz de riscar o material **B**, mas não consegue fazê-lo com o material **C**. Logo, a dureza de **A** será maior que a de **B**, porém, menor que a de **C**.

Para mensurar a dureza de um material é utilizado um equipamento chamado durômetro. Esse aparelho fornece um valor que tem relação com uma impressão realizada na superfície do material. Para tal, uma carga é aplicada em um pequeno penetrador esférico ou pontiagudo posicionado na superfície do material.

As quatro principais escalas utilizadas na medição de dureza são:

- Rockwell: se baseia no nível de penetração de uma ponta de diamante no material. Possui sete variações: A, B, C, D, E, F, G.
- Brinell: utiliza-se uma esfera de carbeto tungstênico que penetra na superfície dos materiais a serem testados.
- Mohs: utilizada para minerais e vidros, corresponde a uma escala de 1 a 10, na qual 10 corresponde ao diamante, que tem a capacidade de riscar todos os outros minerais.
- Vickers: usa uma ponta de diamante como penetrador e é capaz de realizar a medição em qualquer tipo de material.

3.8 Caracterização dos Materiais

As técnicas utilizadas na caracterização de materiais podem ser divididas entre destrutivas e não-destrutivas. Conforme a própria nomenclatura permite deduzir, ao se utilizar de técnicas destrutivas, o material perde sua capacidade de ser utilizado novamente. Um exemplo bastante emblemático de uma técnica destrutiva é o ensaio de tração, que consiste em submeter um corpo de prova a esforços de tração até sua ruptura e permite que sejam obtidas dele propriedades como tensão de escoamento, módulo de elasticidade, tensão de ruptura, deformação, tenacidade, dentre outras. Já no campo das técnicas não-destrutivas encontram-se aquelas que não tornam o material inutilizável após sua aplicação. É o caso, por exemplo, dos ensaios visual, de termografia e de partículas magnéticas, além dos que utilizam de microscopia ótica.

3.8.1 *A técnica do caloteste e a avaliação da espessura do filme e do coeficiente de desgaste*

A técnica do caloteste, segundo a norma ENV 1071 - *Advanced technical ceramics – Methods of test for ceramic coatings*, partes 2 e 6, pode ser utilizada tanto para a definição da espessura, quanto para a determinação da resistência à abrasão de revestimentos.

Ela tem por base a análise de impressões surgidas em um material que foi submetido à rotação de uma esfera de aço pressionada contra ele durante um determinado tempo, sobre influência de carga e velocidade conhecida e com uso de um líquido abrasivo colocado na região de contato entre a esfera e a amostra. Trata-se, assim, de um sistema tribológico de três corpos. Após a execução destas, o cálculo do coeficiente de desgaste (K_c), poderá ser feito por meio de uma técnica de microscopia como o MEV – Microscopia de Varredura Eletrônica ou por pesagem da amostra para quantificação da massa retirada.

A norma ENV 1071 recomenda que sejam utilizados abrasivos cujas partículas não devam exceder 4 μm de diâmetro médio e que sua concentração seja de 2% para o volume. Dentre os abrasivos mais utilizados estão o Carbetto de Silício (SiC) e o Óxido de Alumínio ou Alumina (Al_2O_3).

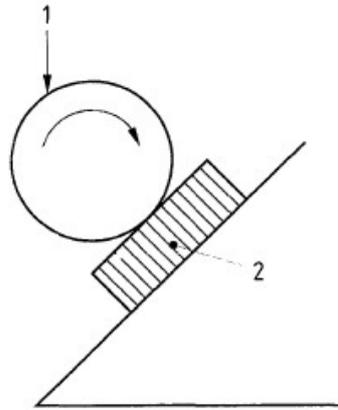
Segundo a norma ENV 1071-2, o caloteste pode ser aplicado tanto em materiais revestidos quanto maciços, porém, quando se tem por objetivo a obtenção da espessura do revestimento, ele deve ser aplicado até a exposição do substrato. A norma também recomenda utilizar-se de procedimentos que possam garantir a limpeza da esfera e da amostra. Ela também recomenda que devam ser realizadas medições aleatórias do diâmetro da esfera, que deverá ser rejeitada caso a diferença entre quaisquer dois valores exceda 5 μm ou se houverem danos visíveis em sua superfície.

Para a execução do teste, os seguintes parâmetros deverão ser definidos:

- Diâmetro da esfera
- Carga aplicada
- Velocidade de deslizamento
- Composição e concentração da solução abrasiva
- Taxa de alimentação da composição abrasiva
- Duração do teste

A vista lateral da montagem do equipamento de caloteste é mostrada na Figura 4:

Figura 4: Vista lateral da montagem do equipamento de caloteste



Fonte: European Committee for Standardization, 2001

Após a execução do teste, a amostra deverá ser limpa e deve-se proceder a análise microscópica. Por meio de um software adequado, devem ser obtidos os valores das melhores medidas dos diâmetros interno (d) e externo (D) da calota. De posse desses valores e do raio da esfera (R) poderão ser calculadas a penetração total (T), a penetração no substrato (t) e a espessura do filme (h) utilizando-se das equações 4, 5 e 6:

$$T = R - \sqrt{R^2 - D_m^2}/4 \quad (4)$$

$$t = R - \sqrt{R^2 - d_m^2}/4 \quad (5)$$

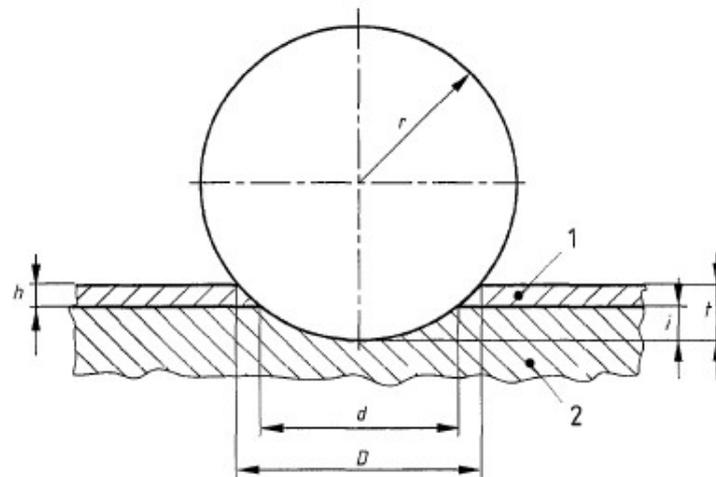
$$h = T - t \quad (6)$$

Para filmes muito finos também pode ser utilizada a equação (7):

$$h = \frac{D_m^2 - d_m^2}{8R} \quad (7)$$

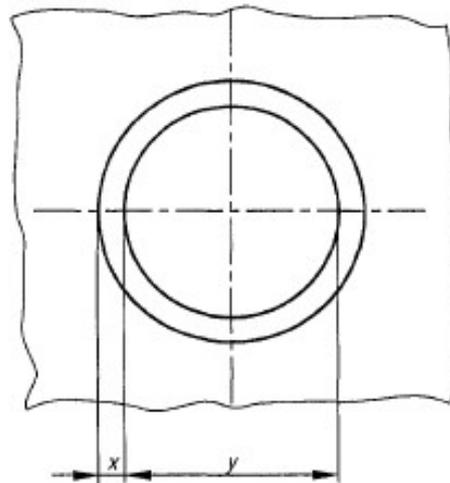
A Figura 5 e a Figura 6 mostram como devem ser tomadas as medidas de (D) e (d):

Figura 5: Vista lateral da esfera posicionada sobre a amostra



Fonte: European Committee for Standardization, 2001

Figura 6: Vista superior da calota impressa sobre a amostra



Fonte: European Committee for Standardization, 2001

O coeficiente de desgaste (k) também poderá ser obtido por meio da técnica do caloteste. O cálculo deverá ser feito por meio da manipulação da equação de Archard, conforme a equação (8) (PIRES, 2018):

$$k = \frac{V}{Dd \cdot N} \quad (8)$$

Onde (V) corresponde ao volume do material desgastado em mm^3 , (Dd) é a distância deslizada em metros (m) e (N) a carga normal em Newtons (N). (Dd) pode ser calculado por meio da equação (9):

$$Dd = 2. \pi. R. n \quad (9)$$

Sendo (R) o raio da esfera e (n) o número de rotações ao longo de todo o teste. (V) pode ser obtido por meio da equação (10):

$$V = \frac{\pi b^4}{64R} \quad (10)$$

Onde (b) corresponde ao diâmetro externo da calota.

Segundo a própria Norma indica, o caloteste é um teste no qual existe liberdade para que o executante adote os parâmetros que lhe forem mais convenientes, apenas com a ressalva de que a comparação entre dados de pesquisas diferentes somente será possível se tiverem sido adotados os mesmos parâmetros.

Nesse estudo, a definição dos parâmetros a serem utilizados foi feita com base em pré-testes. Essa primeira etapa foi executada tendo-se por base os parâmetros utilizados em outros trabalhos, como os de Zagonel (2011), Martins (2016) e Pires (2018). Mesmo entre esses autores, foram utilizadas esferas de variados diâmetros, assim como líquidos abrasivos diversos, diferentes valores de carga, velocidade de rotação e tempo de contato.

3.8.2 A caracterização de superfícies

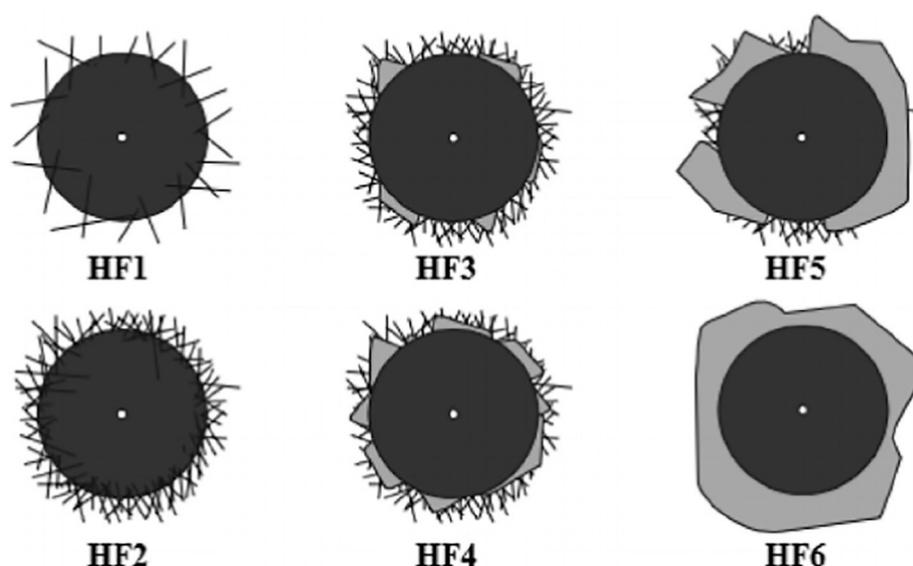
Na caracterização de revestimentos, segundo Souza (2014), usualmente são utilizadas técnicas do campo dos ensaios destrutivos que visam avaliar aspectos como adesão, dureza e resistência ao desgaste.

3.8.2.1 Ensaios destrutivos

Uma das formas de determinar a dureza macro de materiais utilizados como substrato para a deposição de filmes, como o aço AISI M-35, é por meio do uso de um durômetro. Nesse caso, um cone de diamante é pressionado contra o material sobre o qual deseja-se obter o dado. Esse pressionamento ocorre em duas etapas, a primeira, chamada F_0 e a segunda, F_1 , sendo a carga total do teste a soma das duas. Em seguida ocorre a remoção da carga e o valor da dureza é calculado pelo próprio equipamento.

A adesão do filme ao substrato, por sua vez, pode ser analisada por meio de um método conhecido como Mercedes. Esse método é aplicado a partir da utilização de um durômetro convencional calibrado para realizar medidas de dureza Rockwell C. Nele, a partir do pressionamento de uma ponta cônica de diamante com uma carga definida contra uma superfície, é realizada uma indentação que dá origem a uma impressão. A partir da análise das imagens dessa região, é possível então classificar essa impressão no que se refere aos danos causados ao revestimento, dentro de seis diferentes classes que vão de HF1 a HF6 (LENZ et al., 2020), conforme é mostrado na Figura 7:

Figura 7: Padrões de falha de adesão do filme



Fonte: Adaptado de Lenz et al. (2020).

A Tabela 13 apresenta uma descrição das características de cada classes

Tabela 13: Classificação da adesão de revestimentos segundo VDI 3198

Classe	Características
HF1	Rachaduras finas na borda da impressão. Sem presença de delaminações.
HF2	Maior presença de rachaduras não conectadas. Sem delaminações.
HF3	Delaminações presentes e que podem estar conectadas ao longo da impressão
HF4	Delaminações presentes em uma maior região da impressão
HF5	Delaminações de longo alcance ao redor da impressão
HF6	Delaminações conectadas em toda a área da impressão

Fonte: Lenz et al. (2020).

A resistência ao desgaste comumente é avaliada por meio do ensaio conhecido como caloteste, já apresentado anteriormente.

3.8.2.2 *Ensaaios não-destrutivos*

No campo dos ensaios não destrutivos é muito comum a utilização da técnica de espectroscopia por espalhamento Raman que, no caso do filme DLC, permite que seja obtida de maneira detalhada a estrutura das ligações presentes. De acordo com Sala (2008), a espectroscopia Raman é uma das técnicas que podem ser utilizadas para a obtenção de informações sobre estrutura molecular, níveis de energia e ligações químicas dos materiais. Tais informações são produzidas por meio da análise da interação ocorrida entre a radiação eletromagnética e a matéria.

Bermejo (1988) afirma que a partir da incidência de um feixe de luz sobre um material podem ocorrer vários fenômenos, dentre eles, a absorção e espalhamento ou reflexão de parte dessa luz. Segundo o autor, a parcela espalhada é composta de uma parte elástica, que possui comprimento de onda idêntico ao incidente e de uma parcela inelástica que apresenta valores diferentes para esse componente. Essa diferença, segundo Faria e Puglieri (2011), corresponde à energia de vibração dos átomos presentes na área em análise. Pires (2016) afirma que o espalhamento ocorre em diferentes comprimentos de onda para cada material. De posse de tal dado é possível obter várias informações, como a respeito da geometria molecular e a interação entre as espécies químicas, além da diferenciação entre os polimorfos que, apesar de terem a mesma composição química, apresentam diferentes estruturas cristalinas.

O gráfico obtido a partir da aplicação dessa técnica é chamado espectro Raman, e apresenta a radiação espalhada em função de sua energia. Faria e Puglieri (2011) fazem uma analogia entre o fato de cada espécie química apresentar um espectro próprio e a existência de uma impressão digital própria de cada material, o que torna a análise do espectro Raman como uma ferramenta capaz de fornecer resultados muito confiáveis. Em se tratando de materiais carbonosos, segundo Pires (2018), usualmente são encontrados os resultados apresentados pela Tabela 14:

Tabela 14: Resultados encontrados na análise Raman para materiais carbonosos

	Zona central do espectro (cm ⁻¹)	Classificação da banda
Cristais de diamante	1332	
Cristais de grafite	1580	G
Grafite desordenado	1350	D
Carbono amorfo ta-C	1500	D e G

Fonte: Pires, 2018

Segundo a autora, também é possível realizar a análise das tensões residuais, do módulo de elasticidade e dureza do filme DLC por meio da espectroscopia Raman. Ela afirma que existe uma relação linear entre os picos de banda G e a presença de tensões residuais nos filmes analisados. Também ao se analisar a banda G, no que se refere ao deslocamento do pico, a autora afirma que quanto maior esse deslocamento, maiores serão o módulo de elasticidade, a dureza e as tensões residuais. O deslocamento da banda G também se relaciona à proporção das ligações sp³/sp², de maneira que, o aumento nessa proporção também se encontra ligado à redução da quantidade de hidrogênio no filme (BRZEZINKA et al., 2020; PILLACA et al., 2018; DELFIN et al., 2018; ROBERTSON & FERRARI, 2002).

3.8.3 Análise da composição química

Dentre as diversas técnicas que podem ser utilizadas para determinar a composição química dos materiais está a Espectrometria de Emissão Ótica.

A Espectroscopia de Fotoelétrons excitados por Raios X (XPS) promove a identificação dos elementos presentes em uma superfície por meio da medição da energia cinética dos elétrons emitidos de um material como resposta à incidência dos Raios-X. É aplicável até uma profundidade de 10nm.

Outra técnica, a Espectroscopia de Raios X por Energia Dispersiva (EDS), por outro lado, pode ser utilizada com a finalidade de se obter um mapa da distribuição de elementos químicos no material. Nesse sentido, ela pode ser aplicada, por exemplo, em análises pontuais onde se quer confirmar a presença de determinados elementos, como é o caso de carbonetos (PIRES, 2016).

Já a análise das fases constituintes do material pode ser realizada em uma pequena porção dele através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Ela pode ser aplicada a materiais diversos como metais, cerâmicos e polímeros, dentre outros. Além de identificar

a composição química, ela permite observar fases, constituintes e segregações, além de auxiliar na análise de fraturas e de topografia da superfície.

3.8.4 Avaliação dos erros de forma no processo de furação

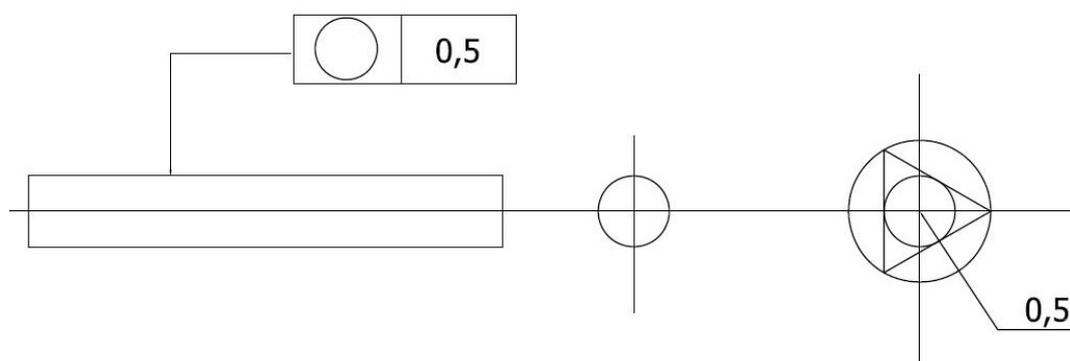
Uma forma de verificar a qualidade do processo de furação é por meio da avaliação dos erros de forma. Eles, segundo Melo (2016), correspondem à diferença entre a superfície real da peça e a superfície teórica. Os erros de forma podem ser macro e microgeométricos.

Os erros macrogeométricos se referem à evolução do diâmetro e a desvios de forma como circularidade e cilindricidade dos furos. Já os microgeométricos correspondem à rugosidade que pode ser medida na parede dos furos por meio de rugosímetros ou outras técnicas.

A evolução do diâmetro dos furos ao longo do processo de furação pode estar relacionada tanto ao desgaste da ferramenta, que determinará uma redução no diâmetro ao longo do processo, quanto a fenômenos como a adesão de material à superfície da broca, que poderá ocasionar um aumento no diâmetro.

A avaliação da circularidade tem por objetivo revelar a diferença entre o círculo teórico e o círculo real e corresponde à variação entre duas circunferências do ponto mais afastado do centro ao mais próximo. Por meio dela, por exemplo, é possível perceber a tendência a uma ovalização do furo, quando este perde a sua característica circular. Além da forma oval, também as formas triangular ou irregular são comumente observadas (MARTINS, 2016). A Figura 8 representa a avaliação da circularidade:

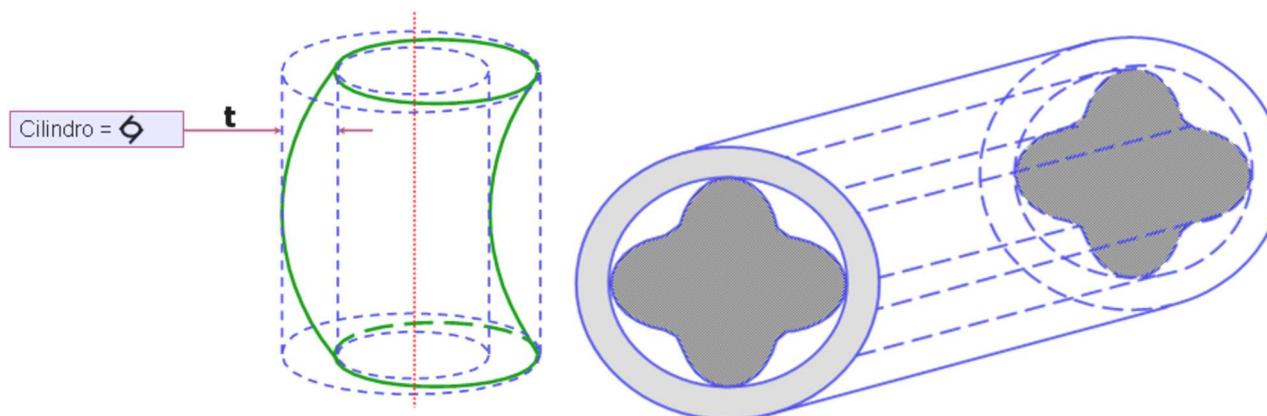
Figura 8: Avaliação da circularidade



Fonte: Taylor *apud* Martins, 2016

A cilindridade pode ser avaliada pela distância radial entre dois cilindros coaxiais. Por meio dela é possível perceber erros de alinhamento. A Figura 9 ilustra a forma de avaliar a cilindridade:

Figura 9: Avaliação da cilindridade



Fonte: Taylor *apud* Martins, 2016

A Figura 10 mostra um circularímetro, equipamento destinado à medição dos erros de forma macrogeométricos:

Figura 10: Equipamento Circularímetro

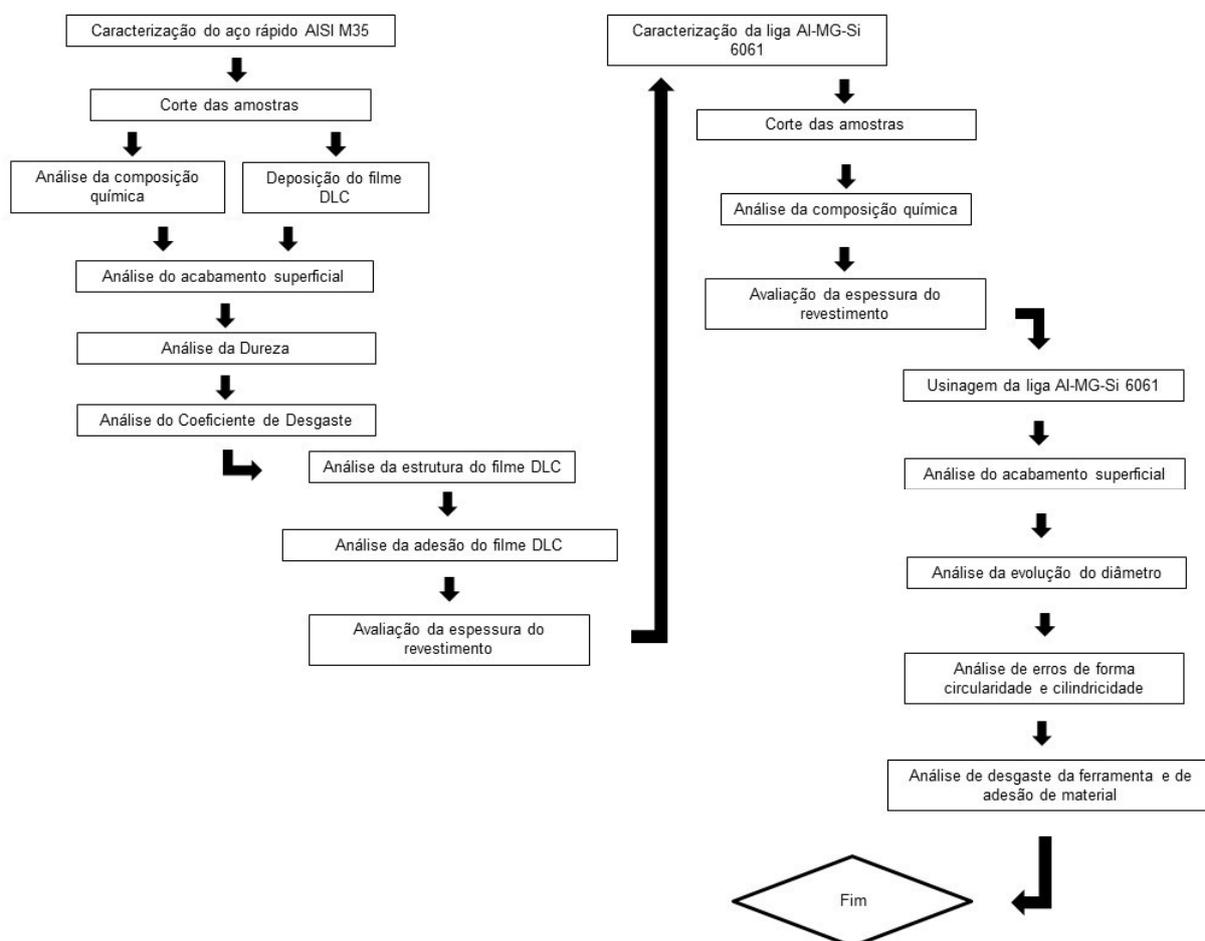


Fonte: Melo (2016)

4 METODOLOGIA

A metodologia de execução desse estudo seguiu as etapas: caracterização de amostras de aço rápido AISI M-35 não revestidas e revestidas por DLC; caracterização do revestimento DLC; caracterização da liga Al-Mg-Si 6061-T6; usinagem da liga Al-Mg-Si-T6 6061; análise de evolução do diâmetro, erros de forma e acabamento superficial do material usinado; avaliação do desgaste das ferramentas após o processo de usinagem. O Fluxograma com as etapas envolvidas encontra-se na Figura 11:

Figura 11: Fluxograma



4.1 Caracterização dos materiais

Foi realizada a caracterização das amostras de aço AISI M-35 revestidas e não revestidas por DLC, do revestimento propriamente dito e da liga Al-Mg-Si 6061-T6.

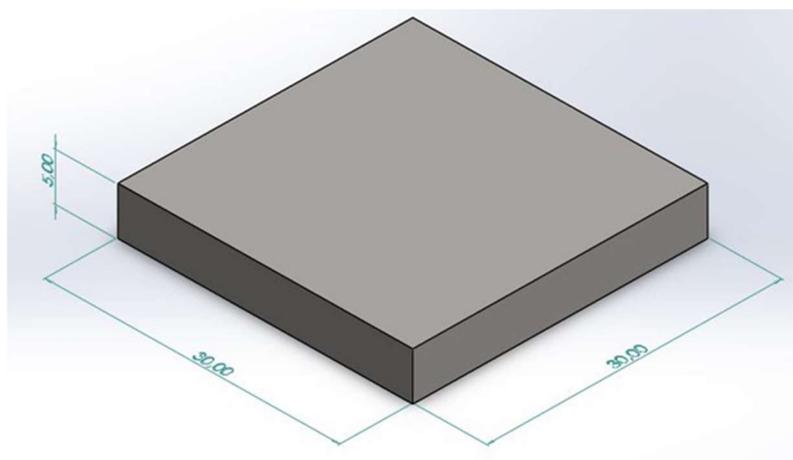
4.2 Caracterização do aço rápido AISI M-35

A caracterização do aço rápido AISI M-35 utilizado na fabricação das brocas foi realizada em amostras planas do material em dois momentos: antes e após o revestimento com filme DLC. Essa mesma estratégia foi adotada por Martins (2016) e Pires (2018), que também realizaram pesquisas envolvendo a caracterização de ferramentas revestidas por filme DLC.

4.2.1 Obtenção das amostras

As amostras foram fornecidas cortadas nas dimensões 30mm x 30mm x 5mm, conforme representado na Figura 12:

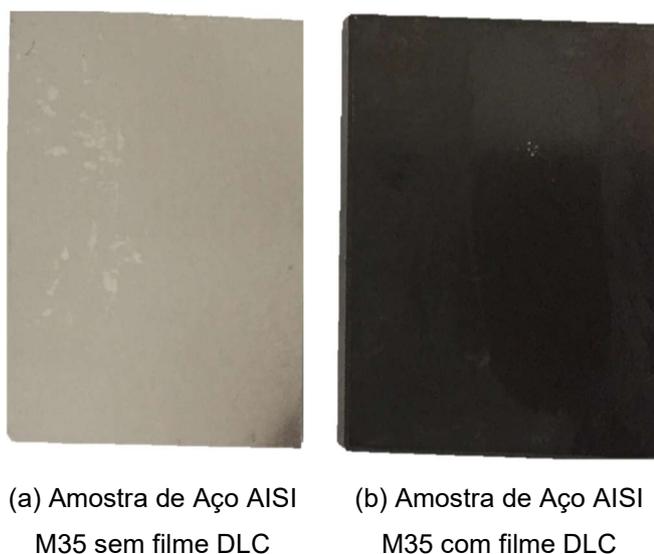
Figura 12: Desenho esquemático dos corpos de prova



Fonte: Próprio Autor

As amostras foram fornecidas com acabamento superficial retificado, de forma a manter os parâmetros de R_a entre os valores de $0,15\mu\text{m}$ a $0,20\mu\text{m}$. Posteriormente, um grupo delas recebeu o revestimento DLC. São apresentadas na Figura 13 as amostras fornecidas antes (a) e após revestimento com DLC (b):

Figura 13: Amostras antes e após o revestimento com DLC



Fonte: Próprio Autor

4.2.2 Caracterização da composição química e microestrutura

A análise da composição química e das morfologia do aço AISI M-35 foi realizada em uma das amostras sem revestimento de DLC por meio de Espectrometria de Emissão Ótica e MEV.

Para a análise da composição química, o preparo da amostra consistiu de sua limpeza e posterior secagem. Foram então realizadas três análises em uma mesma amostra do material. Na execução do ensaio foi utilizado o equipamento Foundry Master Pro 2, da marca Hitachi, tal como apresentado na Figura 14:

Figura 14: Espectrômetro de Emissão Ótica



Fonte: https://hha.hitachi-hightech.com/assets/uploads/products/images/oes/benchtop-oes/foundry-master-xpert_300dpi20h_r.png

Com o intuito de se identificar as fases presentes na microestrutura do material, foi utilizado um MEV modelo Tescan Vega 3, acoplado a um equipamento de EDS.

Foi também realizada uma análise qualitativa da composição do material. Foram avaliados cinco pontos aleatórios de uma amostra. Na

Figura 15 é mostrado um equipamento de MEV idêntico ao utilizado:

Figura 15: Microscópio Eletrônico de Varredura



Fonte: <http://www.aryaeo.com/uploadFiles/Images/2b558087c4d9481b985ff3f4a9781ef8.jpg>

4.2.3 Obtenção dos parâmetros de rugosidade superficial

Dados referentes à rugosidade superficial das amostras de aço rápido foram obtidos por meio do Rugosímetro Mitutoyo SJ-210. O equipamento utilizado é apresentado na Figura 16:

Figura 16: Rugosímetro Mitutoyo SJ-210



Fonte: Próprio Autor

Os parâmetros R_a , R_q , R_t e R_z foram medidos antes da deposição do DLC em peças que foram identificadas. Após a deposição, os parâmetros foram novamente medidos a fim de que pudesse ser avaliada a alteração dos parâmetros de rugosidade após a deposição do filme DLC em cada peça.

Em ambos os momentos, o teste foi feito com base nas orientações presentes na NBR ISO 4288 (ABNT, 2008), que recomenda a utilização de comprimento de amostragem de rugosidade ou Cutoff de $0,8 \mu\text{m}$, assim como comprimento de avaliação de rugosidade de 4mm para perfis retificados.

Foram realizadas uma medição e quatro réplicas, totalizando cinco medições por amostra antes e após a deposição. Em seguida, os dados foram tratados por meio de método estatístico. É apresentada na Figura 17 uma amostra identificada no momento da medição dos parâmetros de rugosidade anterior à deposição do filme

Figura 17: Amostra de aço AISI M-35 destinada à medição do Ra prévia à deposição de DLC



Fonte: Próprio Autor

4.2.4 *Obtenção da dureza*

Para a obtenção da dureza macro, foi utilizado um durômetro HRC 4TT marca Wilson. Foi utilizado um Indentador tipo cone de diamante 120°, pré-carga 10kgf e carga principal de 140kgf. A dureza foi medida em cinco pontos aleatórios da amostra. Um durômetro do referido modelo é apresentado na Figura 18:

Figura 18: Durômetro utilizado na análises



Fonte: <https://www.brystartools.com/wilson-rockwell-4tt-twin-hardness-tester-refurbished/>

4.2.5 Obtenção do coeficiente de desgaste

O coeficiente de desgaste das amostras anterior e posterior ao revestimento com filme DLC foi obtido por meio da técnica do caloteste. Para a execução do teste foram seguidas as orientações da norma ENV 1071 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2001). Foi utilizado um equipamento da marca Anton Paar, mostrado na Figura 19.

Figura 19: Caloteste Anton Paar

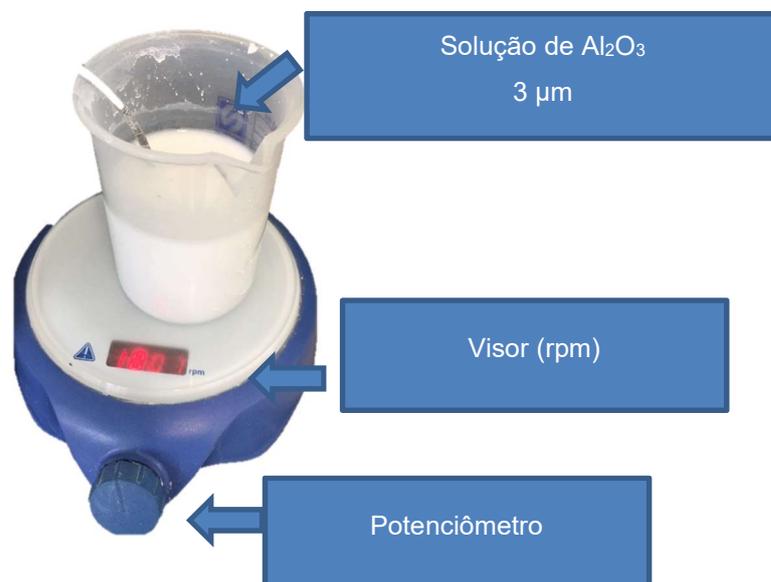


Fonte: Próprio Autor

Definiu-se pela utilização de uma esfera de diâmetro de 30mm, carga normal de 0,8N, velocidade de rotação de 900rpm, alumina 3000 como líquido abrasivo a uma concentração de 2% e com um fluxo de 120 gotas/min e tempo de contato de 14 e 16 minutos. A solução abrasiva foi preparada tendo-se por base a concentração indicada na ENV 1071, que é a de 2%.

Logo após ser misturado à água destilada e ao longo da execução do caloteste, a solução abrasiva foi mantida dentro de um agitador magnético, a uma velocidade de 1000 rpm, conforme é mostrado na Figura 20, com o objetivo de que fosse mantida a uniformidade da solução que era gotejada entre a esfera e a amostra.

Figura 20: Agitador magnético



Fonte: Próprio Autor

Na Tabela 15 são apresentados os parâmetros utilizados no teste:

Tabela 15: Parâmetros utilizados no teste para obtenção do coeficiente de desgaste

Parâmetros	
Diâmetro da esfera (mm)	30
Líquido abrasivo	Alumina 3000
Concentração do abrasivo (%)	2%
Taxa de gotejamento do abrasivo (gotas/min)	120
Carga Normal (N)	0,8
Velocidade de rotação (RPM)	900
Tempo de contato (min)	14 e 16

Fonte: Próprio Autor

4.3 Caracterização do revestimento DLC

A caracterização do revestimento DLC foi realizada após ele ter sido aplicado em amostras planas do aço rápido AISI M-35, com acabamento superficial retificado.

4.3.1 *Obtenção das amostras*

Após as amostras de aço AISI M-35 terem sido cortadas e devidamente preparadas, a deposição do DLC foi realizada sobre elas por meio de processo PVD. Uma amostra revestida por DLC é apresentada na Figura 21:

Figura 21: Amostra revestida por DLC



Fonte: Próprio autor

4.3.2 *Análise da estrutura do filme*

A estrutura do filme DLC foi avaliada por meio de Espectroscopia Raman e XPS.

Na análise Raman foi utilizado um Espectrômetro Horiba modelo LabRam HR Evolution com excitação de comprimento de onda de 515nm com lentes de aumento de 10x e 50x. Para cada amostra foram obtidos espectros com intensidade de laser de 50% e potência máxima de 50mW. É apresentado na Figura 22, um equipamento de espectroscopia Raman:

Figura 22: Equipamento de espectroscopia Raman



Fonte: <https://www.horiba.com/uk/scientific/products/raman-spectroscopy/raman-spectrometers/raman-microscopes/hr-evolution/labram-hr-evolution-17309/>

As análises por XPS foram realizadas com o objetivo de verificar a proporção entre as ligações sp^3 e sp^2 presentes no filme, e a presença de outros elementos como hidrogênio e nitrogênio. Foi utilizado um equipamento Kratos Axis Ultra X-ray Photoelectron Spectroscopy, como o apresentado na Figura 23:

Figura 23: Equipamento de XPS



Fonte: <https://www.mrl.ucsb.edu/microscopy-and-microanalysis-facility/instruments/kratos-axis-ultra-x-ray-photoelectron-spectroscopy>

4.3.3 Avaliação da adesão do filme

Com o intuito de avaliar a adesão do filme DLC foi utilizado o método conhecido como Mercedes. Ele consiste na utilização de um durômetro ajustado para realizar as medições de dureza Rockwell C sobre a superfície revestida a partir das definições

da norma VDI 3198. Foram utilizados os parâmetros de pré-carga de 10kgf e carga de 150kgf. Foi realizada uma indentação e quatro réplicas. No ensaio foi utilizado o durômetro HRC 4TT marca Wilson, do laboratório de análises da empresa FCA, já apresentado na Figura 18.

4.3.4 Avaliação da espessura do revestimento DLC

A espessura do filme DLC depositado pode ser avaliada por diferentes técnicas, como o caloteste, de acordo com a já apresentada Norma ENV 1071, e o MEV.

No caso do MEV, a fim de se preparar a amostra revestida por DLC foi realizado um corte transversal à superfície de forma a deixar exposto o substrato e a camada de filme. Foi então obtida uma imagem por um Microscópio Eletrônico de Varredura Tescan Veja 3, já apresentado na

Figura 15. Por meio de um software apropriado, a espessura foi então medida em três pontos.

4.4 Caracterização da liga Al-Mg-Si 6061-T6

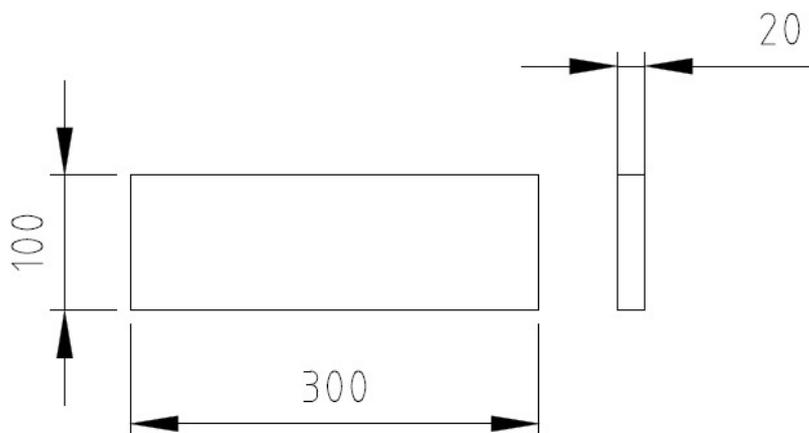
A caracterização da liga Al-Mg-Si 6061-T6 foi realizada em amostras retiradas do mesmo material que foi utilizado na etapa de usinagem. Essa opção foi feita com o objetivo de se garantir que o material caracterizado tivesse exatamente as mesmas características do material utilizado no processo de usinagem.

4.4.1 Obtenção das amostras

Para a execução da etapa de análise do material usinado foram adquiridas 20 (vinte) peças no formato de placas da liga Al-Mg-Si 6061-T6.

Quando da aquisição, foi fornecido um certificado da análise química realizada, a fim de que fosse garantida a composição da liga. Por tratar-se de uma liga comercial, optou-se também pela realização da caracterização desse material. As peças foram confeccionadas nas medidas de 300x102x25mm, conforme apresentado na Figura 24:

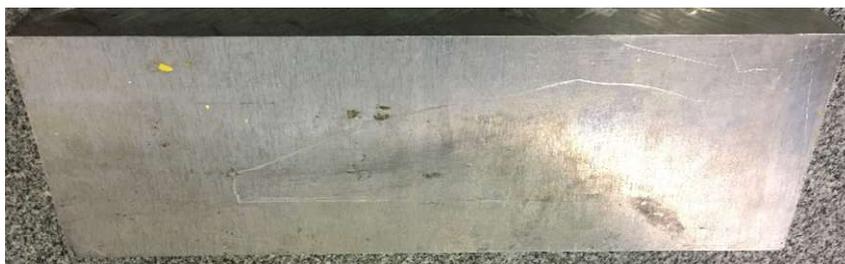
Figura 24: Desenho esquemático dos corpos de prova da liga Al-Mg-Si 6061-T6



Fonte: Próprio Autor

É apresentado na Figura 25, o corpo de prova da liga Al-Mg-Si 6061-T6 utilizado nos experimentos de usinagem dos furos:

Figura 25: Corpo de prova em liga Al-Mg-Si 6061-T6



Fonte: Próprio autor

4.4.2 Caracterização da composição química

A análise química da liga Al-Mg-Si 6061-T6 foi realizada por meio de Espectrometria de Emissão Ótica em um equipamento Foundry Master Pro 2, da marca Hitachi, do CEFET-MG, tal como já apresentado na Figura 14.

A broca revestida por DLC é mostrada na Figura 27:

Figura 27: Broca revestida por DLC



Fonte: Próprio autor

Esse processo foi realizado em um Centro de Usinagem Romi Discovery 560, como o apresentado na Figura 28:

Figura 28: Centro de Usinagem Romi Discovery



Fonte: Próprio Autor

Os parâmetros que foram utilizados na usinagem da liga encontram-se descritos na Tabela 16.

Tabela 16: Parâmetros utilizados na usinagem

Parâmetros de usinagem	
Número de furos a ser realizado	1000
Diâmetro da broca (mm)	14
Velocidade de corte (m/min)	340
Rotações por minuto (RPM)	7730
Avanço por rotação (mm/rev)	0,20
Velocidade de avanço (mm/min)	1546
Profundidade do furo (mm)	15

Fonte: Próprio Autor

A fixação da ferramenta foi realizada por mandril hidráulico, conforme apresentado na Figura 29:

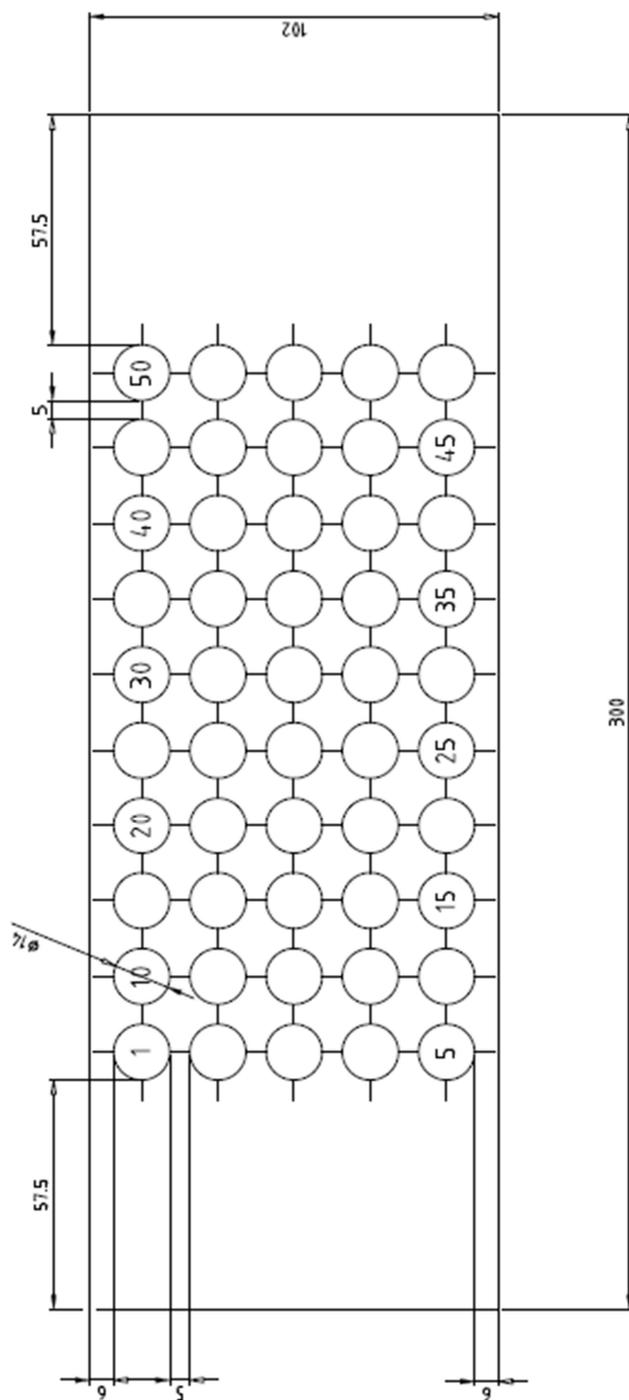
Figura 29: Broca montada no sistema de fixação por mandril hidráulico

Fonte: Próprio Autor

Para que fosse possível replicar o posicionamento das placas de Al-Mg-Si 6061-T6 na mesa do Centro de Usinagem, foi confeccionada uma peça utilizada como calço em aço e um esquadro, também em alumínio. Tanto o calço, quanto o esquadro foram cortados e, posteriormente, fresados.

As placas de Al-Mg-Si 6061-T6 foram furadas de acordo com o planejamento exposto na Figura 30:

Figura 30: Planejamento da furação nas placas de Alumínio



Fonte: Próprio Autor

Em seguida, foi realizada a análise dos erros de forma macro e microgeométricos originados no processo de usinagem. Os erros macrogeométricos foram avaliados por meio da evolução do diâmetro e parâmetros de circularidade e cilindricidade. Já os erros microgeométricos foram analisados por meio dos parâmetros de acabamento superficial R_a , R_q , R_t e R_z obtidos nas superfícies usinadas, no caso, as paredes dos furos. Devido a dificuldades na realização da análise de todos os furos, foi elaborado um método no qual foram avaliados, além do primeiro furo realizado, um a cada cinco furos, conforme mostrado na Tabela 17:

Tabela 17: Amostra analisadas

1	5	10	15	20	25	30	35	40	45
50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
100	105	110	115	120	125	130	135	140	145
150	155	160	165	170	175	180	185	190	195
200	205	210	215	220	225	230	235	240	245
250	255	260	265	270	275	280	285	290	295
300	305	310	315	320	325	330	335	340	345
350	355	360	365	370	375	380	385	390	395
400	405	410	415	420	425	430	435	440	445
450	455	460	465	470	475	480	485	490	495
500	505	510	515	520	525	530	535	540	545
550	555	560	565	570	575	580	585	590	595
600	605	610	615	620	625	630	635	640	645
650	655	660	665	670	675	680	685	690	695
700	705	710	715	720	725	730	735	740	745
750	755	760	765	770	775	780	785	790	795
800	805	810	815	820	825	830	835	840	845
850	855	860	865	870	875	880	885	890	895
900	905	910	915	920	925	930	935	940	945
950	955	960	965	970	975	980	985	990	995
1000									

Fonte: Próprio autor

4.5.2 Obtenção dos parâmetros de rugosidade

Os parâmetros R_a , R_q , R_t e R_z foram obtidos por meio de análise realizada em rugosímetro.

4.5.3 *Avaliação da evolução do diâmetro e dos erros de forma macrogeométricos*

A evolução do diâmetro dos furos ao longo do processo de furação da liga Al-Mg-Si 6061-T6 e dos erros de forma geométricos de circularidade e cilindridade foi obtida a partir do método de coordenadas (X, Y e Z) de equipamento de medir coordenadas tridimensional. Para a execução da avaliação foram definidos quatro pontos em três regiões do furo. A partir da média e do desvio padrão desses pontos foi definida a linha de forma do furo. Um equipamento de medir coordenadas tridimensional é mostrado na Figura 31:

Figura 31: Equipamento de medir coordenadas tridimensional



Fonte: Próprio autor

4.5.4 *Análise da evolução do desgaste das arestas de corte e da adesão de material usinado sobre a superfície da ferramenta*

A análise da evolução do desgaste das arestas de corte e da adesão de material usinado sobre a superfície da ferramenta foi realizada por meio de imagens obtidas por uma lupa digital e por MEV acoplado a um equipamento de EDS, que também realizou a análise da composição química de determinadas regiões da broca utilizada.

Para a lupa digital, as imagens foram obtidas ao longo do processo de usinagem, a cada troca de placa da liga de Al-Mg-Si 6061-T6, esse método foi utilizado para verificar o comportamento da adesão do alumínio durante os testes realizados. Em cada um desses momentos foram obtidas duas imagens, uma de cada aresta de corte. O planejamento pode ser visto na Tabela 18.

Tabela 18: Planejamento para avaliação da evolução do desgaste das arestas de corte por meio de lupa digital

Amostra	Momento de realização da análise
1	Anterior ao início do processo de usinagem da 1ª peça
2	Após o término do processo de usinagem da 1ª peça
3	Após o término do processo de usinagem da 2ª peça
4	Após o término do processo de usinagem da 3ª peça
5	Após o término do processo de usinagem da 4ª peça
6	Após o término do processo de usinagem da 5ª peça
7	Após o término do processo de usinagem da 6ª peça
8	Após o término do processo de usinagem da 7ª peça
9	Após o término do processo de usinagem da 8ª peça
10	Após o término do processo de usinagem da 9ª peça
11	Após o término do processo de usinagem da 10ª peça
12	Após o término do processo de usinagem da 11ª peça
13	Após o término do processo de usinagem da 12ª peça
14	Após o término do processo de usinagem da 13ª peça
15	Após o término do processo de usinagem da 14ª peça
16	Após o término do processo de usinagem da 15ª peça
17	Após o término do processo de usinagem da 16ª peça
18	Após o término do processo de usinagem da 17ª peça
19	Após o término do processo de usinagem da 18ª peça
20	Após o término do processo de usinagem da 19ª peça
21	Após o término do processo de usinagem da 20ª peça

Fonte: Próprio autor

As imagens obtidas pela lupa digital foram ampliadas em 80 vezes. Para viabilizar a obtenção das imagens, a lupa foi montada sobre um suporte magnético, conforme é mostrado na Figura 32:

Figura 32: Lupa digital utilizada na análise de desgaste das brocas

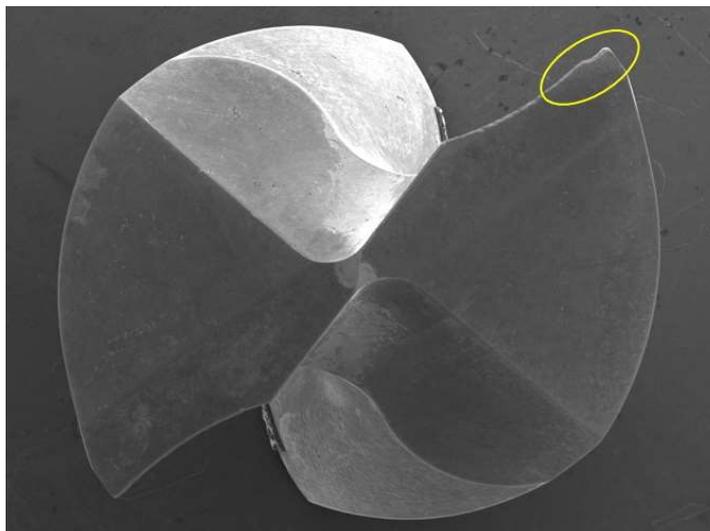


Fonte: Próprio autor

A obtenção das imagens por MEV foi realizada após a execução do processo de usinagem. Elas foram obtidas com ampliação de 500 vezes e em dois momentos, antes e após a realização de decapagem química. Esse procedimento foi realizado com solução de NaOH, e teve o objetivo de retirar o material aderido à ferramenta de corte durante a usinagem da placa da liga de Al-Mg-Si 6061-T6.

As imagens das arestas da broca foram obtidas na região assinalada na imagem apresentada na Figura 33:

Figura 33: Mapa dos pontos de desgaste analisados



Fonte: Próprio autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão apresentados e discutidos os resultados obtidos na caracterização do aço AISI M-35, da liga Al-Mg-Si 6061-T6 e do revestimento DLC. Com a finalidade de se avaliar o comportamento do revestimento aplicado sobre a ferramenta de aço AISI M-35 utilizada na usinagem da liga de Al-Mg-Si 6061-T6, serão também apresentados e discutidos os parâmetros de erros de forma e acabamento superficial da liga Al-Mg-Si 6061-T6 usinada, assim como a avaliação do desgaste das ferramentas após o processo de usinagem.

5.1 Caracterização do aço AISI M-35

5.1.1 Caracterização da composição química e microestrutura

Na Tabela 19 são apresentados os valores das médias aritméticas obtidas na avaliação da composição química do aço AISI M-35, por meio da técnica de Espectrometria de Emissão Ótica. A tabela também apresenta os percentuais de composição de cada elemento previstos para esse material (ASM INTERNATIONAL, 1990).

Tabela 19: Aço AISI M-35: comparação entre os limites de composição e a composição média obtida

Elementos	Limites de composição (%)	Composição média obtida (%)
C	0,82 – 0,88	0,87
Si	0,20 – 0,45	0,37
Mn	0,15 – 0,40	0,40
Cr	3,75 – 4,50	4,14
Mo	4,50 – 5,50	4,82
Ni	Máx. 0,30	0,33
Co	4,50 – 5,50	3,94
V	1,75 – 2,20	1,58
W	5,50 – 6,75	6,78
Fe	-	76,50
Outros	-	0,23

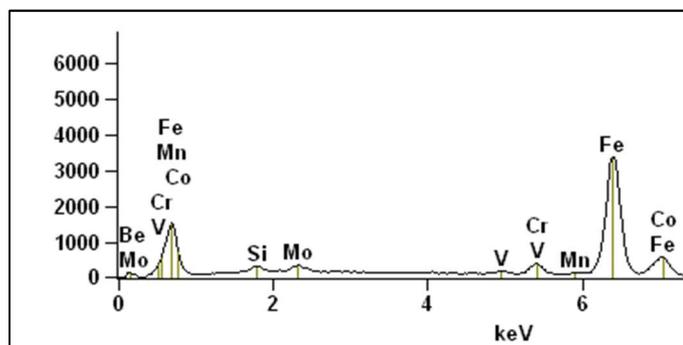
Fonte: Próprio Autor

Na análise realizada foi verificada a presença dos principais elementos de liga que são encontrados nos aços utilizados na fabricação de ferramentas, a saber, C, Si, Mn, Cr, V, W, Mo e Co (CHIAVERINI, 1979). Dentre todos os elementos presentes, porém, quatro foram observados em proporções fora dos parâmetros estabelecidos por ASM International (1990), a saber, Ni, Co, V, W. Dentre eles o que apresentou maior diferença em relação ao esperado foi o Cobalto, com 12,4% abaixo do limite inferior. Já o Vanádio foi encontrado em um percentual 9,8% menor que o limite inferior. O Níquel, por sua vez, foi observado em percentual 9,3% acima do limite superior. A variação de Tungstênio foi menor, cerca de 0,5% inferior ao valor mínimo.

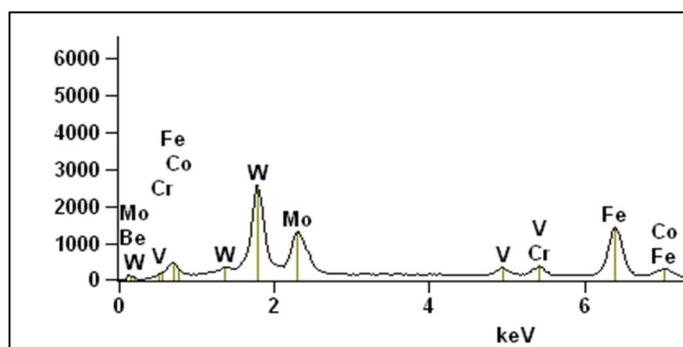
O Cobalto possui a capacidade de aumentar a dureza a quente, propriedade muito importante quando se trata de processos de usinagem que conduzem a altas temperaturas. O Vanádio é responsável pela formação dos carbonetos mais duros presentes nos aços rápidos. O Tungstênio também participa da formação de carbonetos e eleva a resistência do aço rápido (CHIAVERINI, 1979). Dessa forma, pode-se concluir que as variações encontradas podem influenciar a microestrutura do aço e, conseqüentemente, o seu comportamento quando em serviço. Contudo, para que fosse possível confirmar o impacto dessas variações, seria necessário um estudo que permitisse comparar o desempenho do aço AISI M-35 utilizado no presente estudo com outro que se encontrasse integralmente dentro das faixas especificadas de composições químicas estabelecidas por ASM International (1990).

Foi realizada também a análise da composição química por meio de Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS) em conjunto com obtenção de imagens através da Microscopia Eletrônica Varredura (MEV) nas amostras de aço AISI M-35. Foram avaliados quatro pontos aleatórios de uma amostra e cinco pontos aleatórios de outra. Na análise da composição química foram obtidos os espectrogramas apresentados na Figura 34.

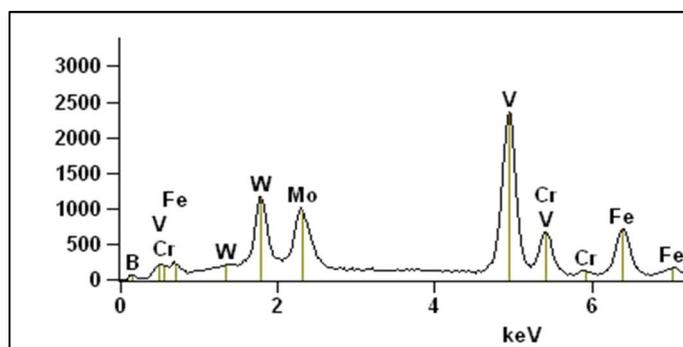
Figura 34: Análise química por MEV/EDS em diferentes pontos da superfície do aço AISI M-35



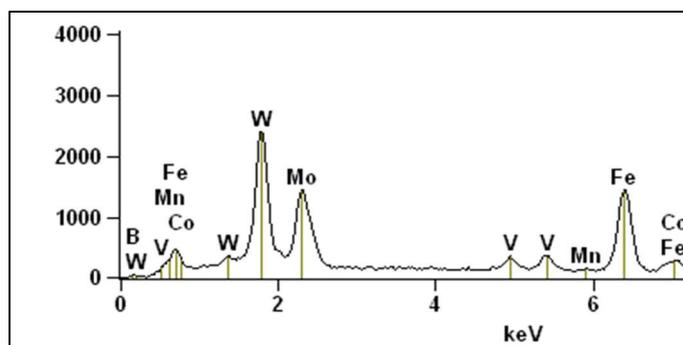
a) Análise no ponto 1



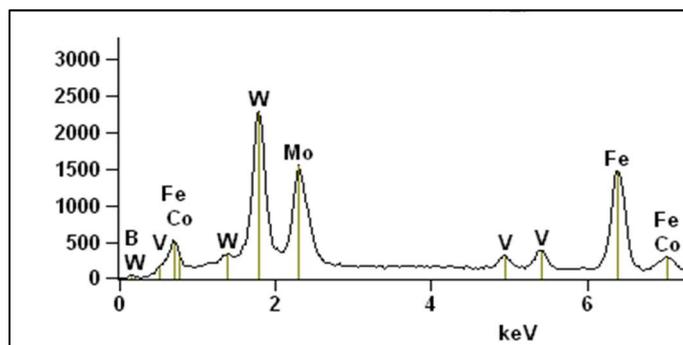
b) Análise no ponto 2



c) Análise no ponto 3



d) Análise no ponto 4

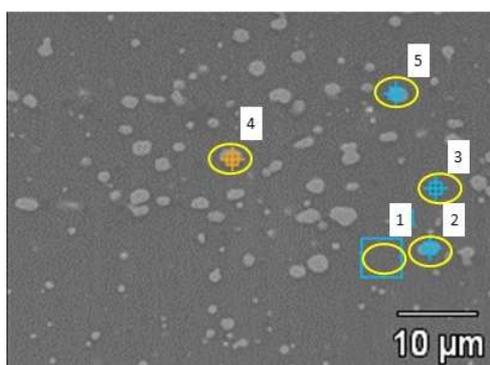


e) Análise no ponto 5

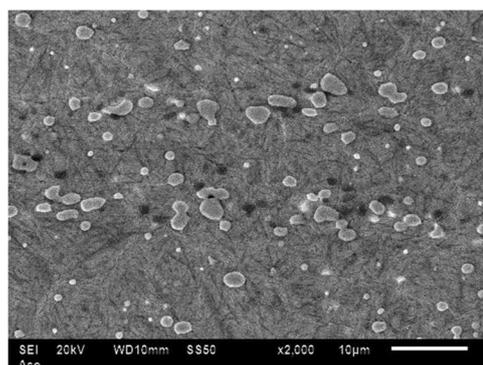
Fonte: Próprio Autor

São mostradas na Figura 35 duas imagens obtidas por MEV da superfície de uma amostra de aço AISI M-35. Na primeira delas é apresentado um mapa com os cinco pontos avaliados na amostra. A outra corresponde a uma imagem obtida da superfície atacada com Nital 4% e ampliada 2.000 vezes, onde pode ser observada a morfologia do aço AISI M-35.

Esta imagem aliada aos espectros obtidos por meio do EDS, nos quais foi verificada a presença de elementos como C, Mo e V, permite afirmar tratar-se de carbonetos dispersos em uma matriz martensítica.

Figura 35: Análise da estrutura do AISI M-35 obtida por MEV

Pontos avaliados



b) Morfologia do AISI M-35

Fonte: Próprio Autor

5.1.2 Obtenção dos parâmetros de rugosidade superficial

São apresentados na Tabela 20 os valores médios e de desvio padrão do parâmetro R_a obtidos na análise das vinte amostras antes e após o revestimento com

o filme DLC, assim como o percentual de variação desse parâmetro em cada uma delas após a deposição do filme.

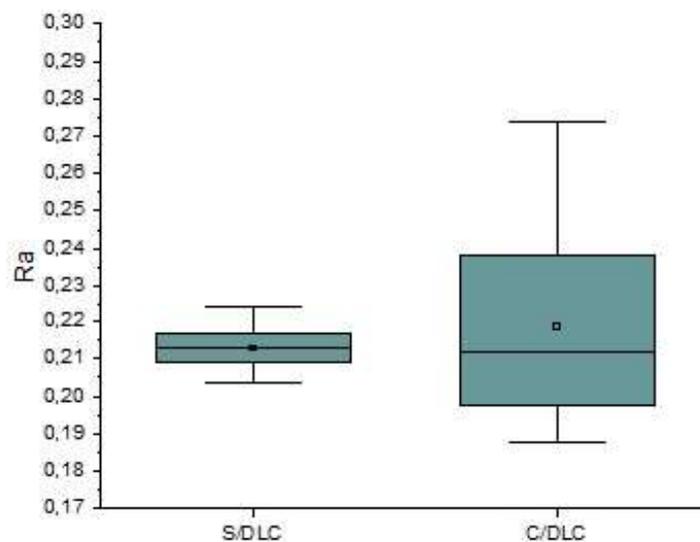
Tabela 20: Valores médios de R_a obtidos nas amostras anterior e posterior ao revestimento com DLC

Amostra	Anterior ao DLC (μm)	Posterior ao DLC (μm)
1	0,208	0,222
2	0,205	0,232
3	0,204	0,192
4	0,209	0,248
5	0,217	0,274
6	0,213	0,195
7	0,215	0,225
8	0,218	0,251
9	0,211	0,202
10	0,218	0,204
11	0,206	0,208
12	0,215	0,209
13	0,213	0,198
14	0,210	0,233
15	0,209	0,197
16	0,217	0,194
17	0,211	0,243
18	0,215	0,188
19	0,218	0,215
20	0,225	0,244
Média (μm)	0,213	0,219
Desv Padrão (μm)	0,005	0,02

Fonte: Próprio Autor

Antes da aplicação do revestimento em DLC foi verificado um desvio padrão de $0,005\mu\text{m}$. Após a aplicação do revestimento, apesar de ter havido um aumento discreto nos valores médios, que passaram de $0,213\mu\text{m}$ para $0,219\mu\text{m}$, houve um aumento expressivo no desvio padrão dos valores obtidos, que passou de $0,005\mu\text{m}$ para $0,02\mu\text{m}$. A comparação entre esses valores de dispersão é apresentada no Gráfico da Figura 36:

Figura 36: Dispersão entre os valores de R_a antes e após o revestimento com filme DLC



Fonte: Próprio Autor

A análise realizada após o revestimento das amostras por DLC permitiu comparar os efeitos da aplicação do filme sobre o parâmetro R_a . Foi possível observar que metade das amostras apresentou aumento no valor de R_a , enquanto a outra metade apresentou decréscimo. As maiores variações foram de 26,3% e -12,7%, nas amostras 5 e 18, respectivamente. A média aritmética dessa variação foi de 2,7%.

Martins (2016) e Pires (2018) afirmaram que após a deposição do filme DLC há uma tendência de que sejam mantidos os parâmetros de rugosidade. Isso se dá em função do filme se acomodar sobre a superfície acompanhando a topografia existente. Por outro lado, ao comparar filmes de diferentes espessuras, Fukui et al. (2004) apontaram que há uma tendência de que, à medida em que ocorre um aumento na espessura dos filmes, também haja um aumento nos valores encontrados no parâmetro R_a . Tendo-se em vista as variações encontradas na análise apresentada, pode-se afirmar que a aplicação do revestimento DLC no material utilizado neste trabalho não provocou alterações nos valores de R_a , ou seja, ele acompanhou a rugosidade do substrato.

5.1.3 Obtenção da dureza

Os valores de dureza obtidos na avaliação do aço AISI M-35 são apresentados na Tabela 21:

Tabela 21: Análise da dureza do aço AISI M-35

Medida	Dureza (HRC)
1	65
2	66
3	67
4	67
5	67
Média aritmética	66
Desvio Padrão	0,89

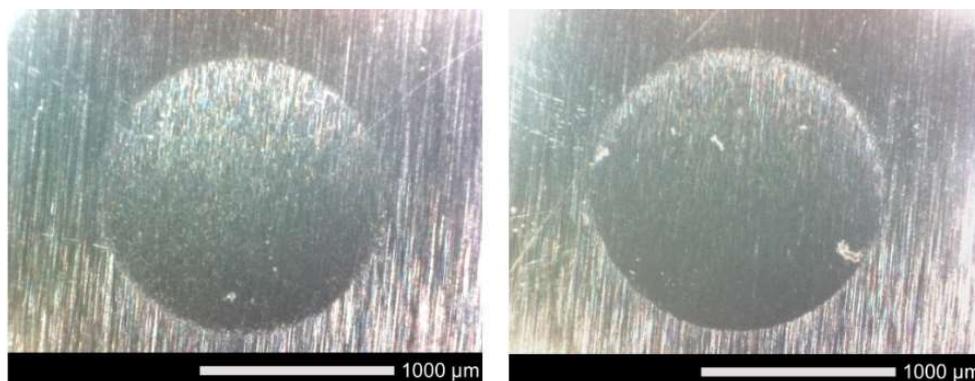
Fonte: Próprio Autor

A média aritmética dos valores encontrados nas cinco regiões avaliadas foi de 66HRC e o desvio padrão entre os valores obtidos foi de 0,89HRC. Dentre os valores encontrados, observou-se adequação aos apresentados por Chau et al. (2018), que obtiveram o valor de 65HRC ao avaliar o aço AISI M-35. Também não foi verificada dispersão entre os valores obtidos.

5.1.4 Obtenção do coeficiente de desgaste

São apresentadas na Figura 37 as calotas obtidas a partir da realização do teste de resistência ao desgaste por microabrasão, o caloteste, no aço AISI M-35 não revestido por DLC. Conforme pode ser verificado, as calotas produzidas no aço AISI M-35 não revestido por DLC apresentaram dimensões consideravelmente maiores que as das calotas revestidas. Tal fato pode ser atribuído à propriedade do DLC de promover a redução do desgaste.

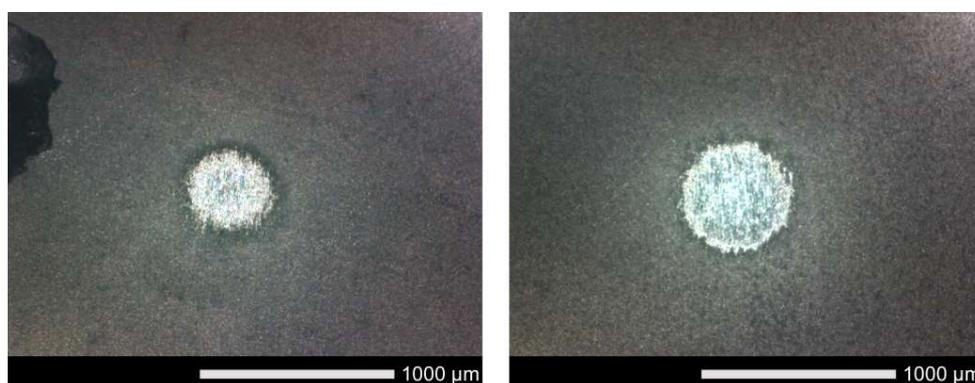
Figura 37: Imagens das calotas obtidas no aço AISI M-35 não revestido por DLC.



Fonte: Próprio Autor

São mostradas na Figura 38, as calotas obtidas a partir da realização do teste de resistência ao desgaste por microabrasão, o caloteste, no aço AISI M-35 revestido por DLC:

Figura 38: Imagens das calotas obtidas no aço AISI M-35 revestido por DLC.



Fonte: Próprio Autor

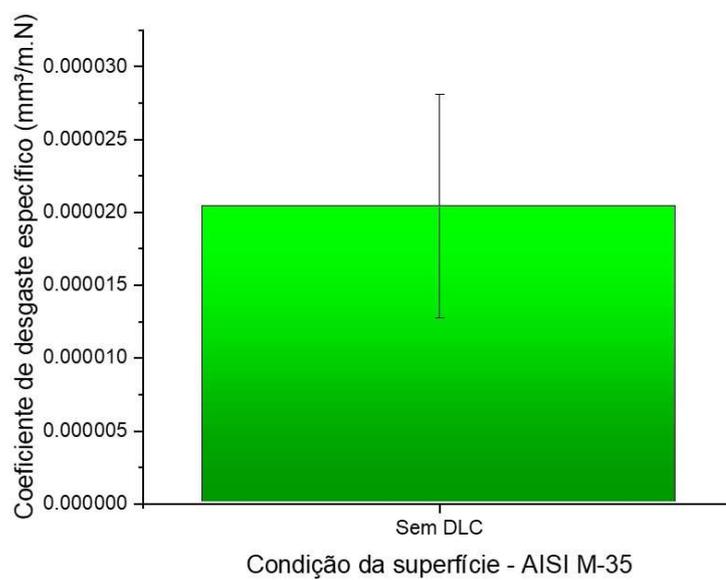
A partir da ampliação das imagens foi realizada a medição do diâmetro de cinco calotas de cada grupo. Foi então calculada a média aritmética dos valores obtidos. De posse desse valor e dos parâmetros utilizados na execução do ensaio, foram obtidos os coeficientes de desgaste específico médio e o desvio padrão, que são apresentados na Tabela 22 e nos gráficos na Figura 39 e na Figura 40:

Tabela 22: Coeficientes de desgaste específico

Amostra	Coeficiente de Desgaste Específico Médio (mm ³ /m.N)	Desvio Padrão
Revestido por DLC	$1,44 \times 10^{-7}$	$1,26 \times 10^{-7}$
Não revestido	$2,04 \times 10^{-5}$	$7,66 \times 10^{-6}$

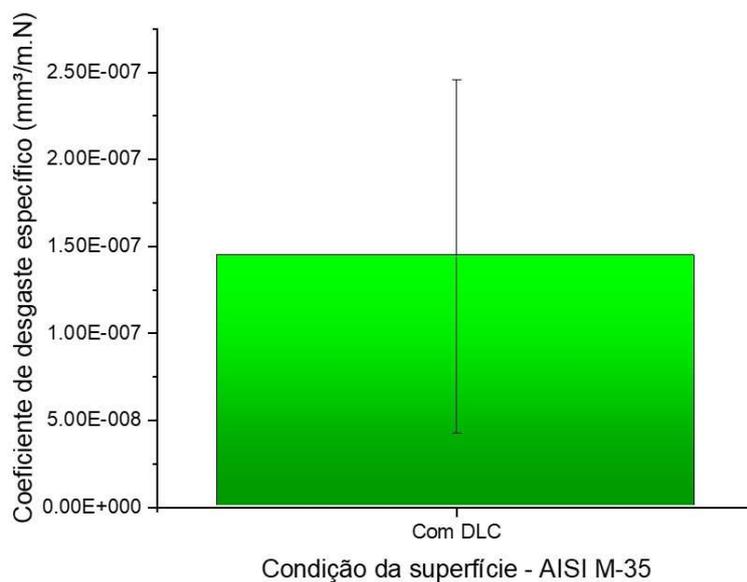
Fonte: Próprio Autor

Figura 39: Análise do coeficiente de desgaste do aço AISi-M35 sem revestimento DLC



Fonte Próprio Autor

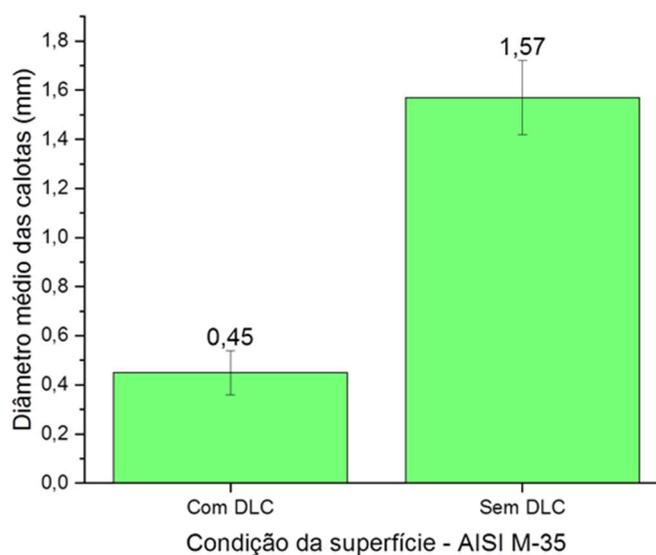
Figura 40: Análise do coeficiente de desgaste do aço AISi-M35 revestido por DLC



Fonte Próprio Autor

O diâmetro médio das calotas obtidas no ensaio de desgaste por microabrasão é mostrado na Figura 41:

Figura 41: Diâmetro médio das calotas obtidas no ensaio de desgaste por microabrasão



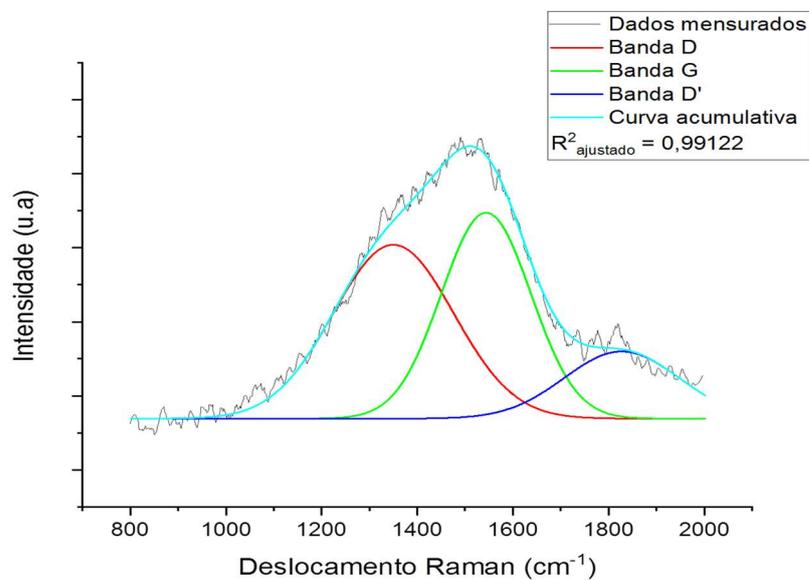
Fonte Próprio Autor

A comparação entre os diâmetros das calotas e os coeficientes de desgaste específico obtidos no ensaio de desgaste por microabrasão no aço AISI M-35 não revestido por DLC e no aço revestido, evidenciaram que as amostras que receberam o revestimento DLC tiveram o diâmetro médio reduzido em cerca de 71%. Já o coeficiente de desgaste específico médio foi 142 vezes maior no aço não revestido por DLC. Ambos os resultados demonstram que houve aumento na resistência ao desgaste a partir da utilização do filme DLC. Se forem utilizados como parâmetros as diferenças entre os diâmetros das calotas obtidas no aço AISI M-35 não revestido e no aço revestido, é possível considerar que a aplicação do filme DLC poderá proporcionar um aumento de cerca de 3,5 vezes na vida útil do componente.

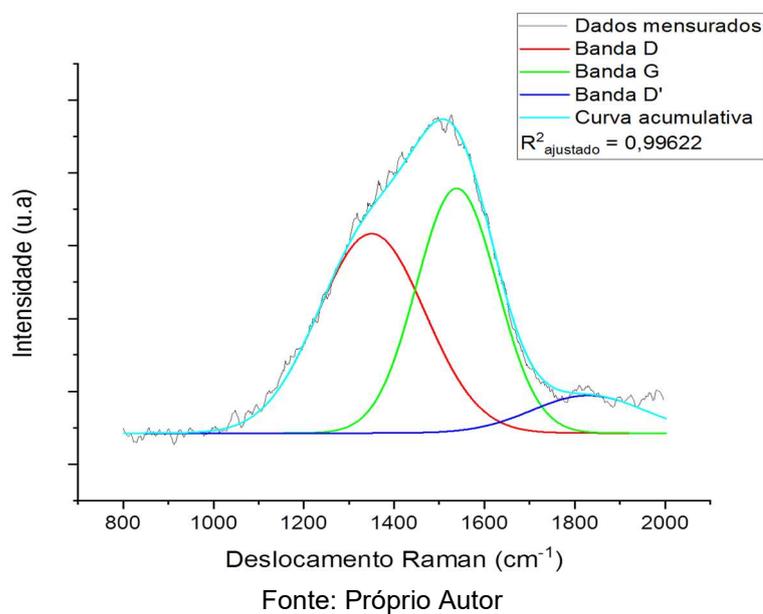
5.2 Caracterização do revestimento DLC

5.2.1 Análise da estrutura do filme

Foram realizadas, por meio de espectroscopia por espalhamento Raman, duas análises no filme DLC utilizado no revestimento da amostra de aço AISI M-35. Os dados obtidos foram tratados em uma versão de teste do software Origin. Por meio desse método foi realizada uma deconvolução gaussiana que permitiu a visualização dos picos sobrepostos característicos do DLC. O espectrograma obtido na primeira análise é apresentado na Figura 42:

Figura 42: Espectrograma Raman da amostra revestida por DLC – 1ª análise

Na Figura 43 é mostrado o espectrograma obtido na segunda análise.

Figura 43: Espectrograma Raman da amostra revestida por DLC – 2ª análise.

Os valores obtidos a partir da deconvolução são apresentados na Tabela 23:

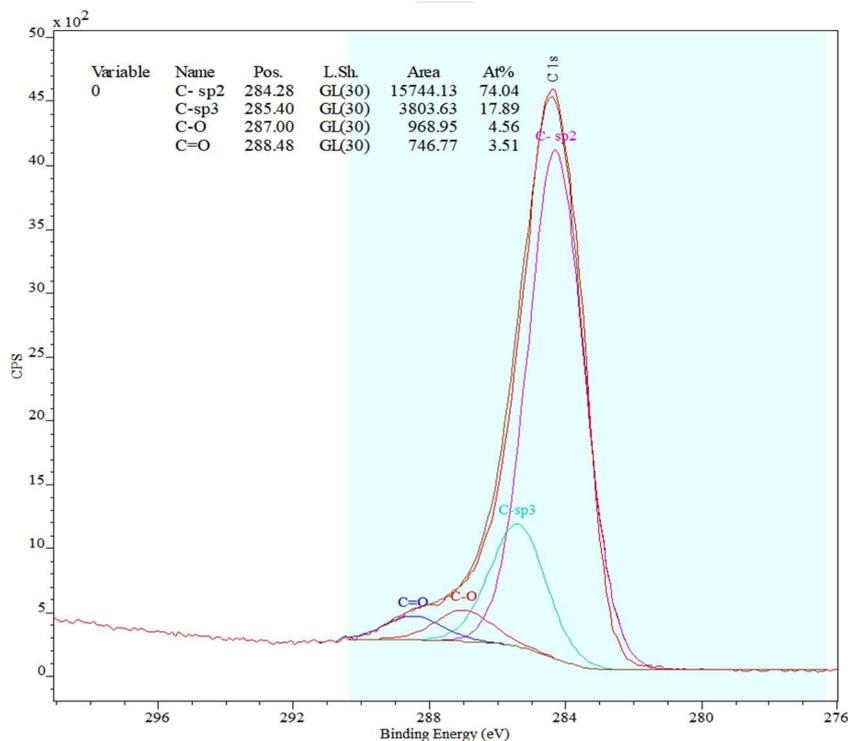
Tabela 23: Resultados obtidos através da deconvolução do espectrograma Raman

Amostra	1	2
Posição banda d'	1827	1830
Posição banda d	1350	1350
Posição banda g	1544	1539
Intensidade banda d'	54	32
Intensidade banda d	148	162
Intensidade banda g	130	150
ID/IG	1,14	1,08

Fonte: Próprio Autor

Por meio da espectroscopia Raman realizada no revestimento DLC foi possível calcular a razão entre as intensidades das bandas D e G representadas por ID/IG. Os valores obtidos das duas análises foram 1,14 e 1,08. Tais valores são indicativos de uma presença de ligações sp^3 em uma proporção menor que 20%, segundo Robertson e Ferrari (2002). Também de acordo com os autores, isso permite classificar o revestimento analisado como um carbono amorfo não tetraédrico, tipo a:C.

Com a finalidade de se determinar a presença e a concentração dos elementos químicos, foi também realizada a análise do revestimento DLC por XPS, conforme pode ser visto na Figura 44:

Figura 44: Análise do DLC por XPS

Fonte: Próprio autor

Através da análise dos picos encontrados foram obtidos os resultados que são apresentados na Tabela 24:

Tabela 24: Resultados obtidos no XPS

Ligação	Posição	%
C – sp ²	284,28	74,04
C – sp ³	285,40	17,89
C – O	287,00	4,56
C = O	288,48	3,51

Fonte: Próprio autor

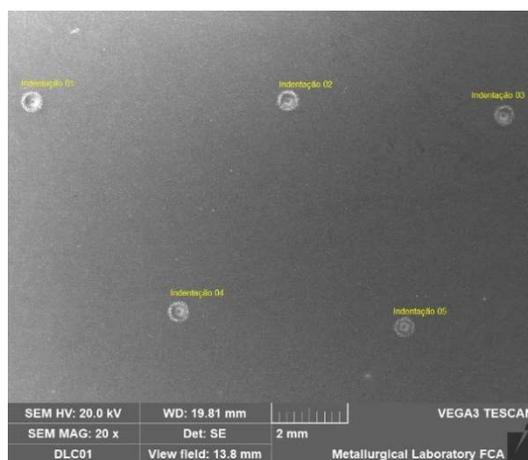
Os resultados obtidos demonstraram a presença de picos em valores semelhantes aos encontrados por Kimura et al. (2016) e Kao et al. (2019). Dessa forma, pode-se afirmar que o revestimento DLC analisado é composto pelos elementos carbono e oxigênio, com uma prevalência de carbono, que corresponde a mais de 92% do material. Os pequenos picos de oxigênio encontrados podem ser atribuídos a impurezas introduzidas no revestimento durante o processo de deposição ou a contaminações decorrentes da exposição do material ao ar (JO et al., 2018).

Além disso, o percentual de ligações sp^3 foi quantificado em 17,89%, portanto, dentro da margem que havia sido apontada pela Espectroscopia Raman. Esse dado, aliado à ausência de hidrogênio, permite concluir que se trata de um carbono amorfo não tetraédrico, tipo a:C (ROBERTSON & FERRARI, 2002; MARTINS, 2016).

5.2.2 Avaliação da adesão do filme

A Figura 45 mostra os pontos de realização das indentações em uma superfície de aço AISI M-35 revestida por DLC com o objetivo de avaliar a adesão do filme. As indentações foram realizadas em cinco pontos aleatórios da superfície.

Figura 45: Regiões submetidas às indentações para análise da adesão do filme



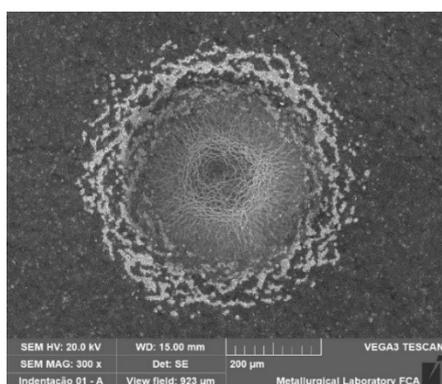
Fonte: Proprio autor

São mostradas na Figura 46 imagens obtidas por MEV das indentações ampliadas em 300 vezes. Em todas elas, pode ser verificada ao centro uma maior deformação decorrente da penetração do indentador. Também nessa região, podem ser observadas pequenas trincas que se propagam a partir do ponto central de contato entre o indentador e a superfície. A borda da indentação apresenta regiões de tonalidade mais clara, que se propagam no sentido radial e que demonstram a delaminação do revestimento e, a conseqüente exposição da superfície do substrato, visível em tonalidade mais escura. Tendo-se em vista o fato das trincas apresentarem aspecto uniforme, pode-se afirmar que o rompimento se deu após a ocorrência da deformação plástica do substrato, ocasionada pela penetração do indentador.

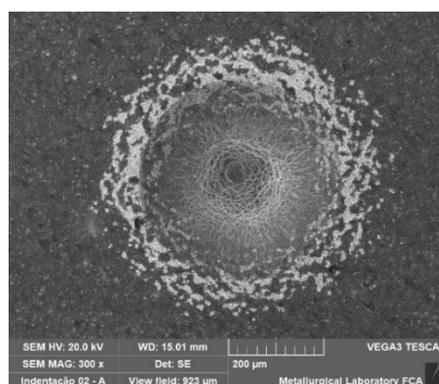
Apesar de, em todas as indentações, terem sido observadas delaminações,

não há continuidade entre elas, ou seja, o revestimento permanece preservado ao redor de parte da impressão. Isso permite classificar a adesão como HF3, que se encontra dentro dos limites aceitáveis segundo a Norma VDI 3198 (LENZ et al., 2020).

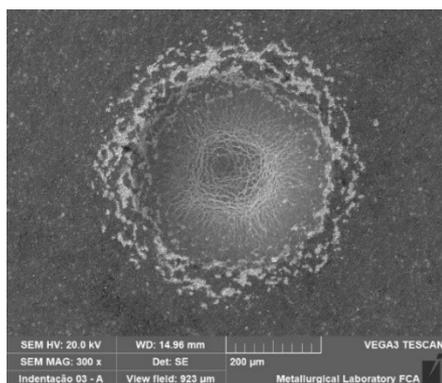
Figura 46: Imagens ampliadas das indentações



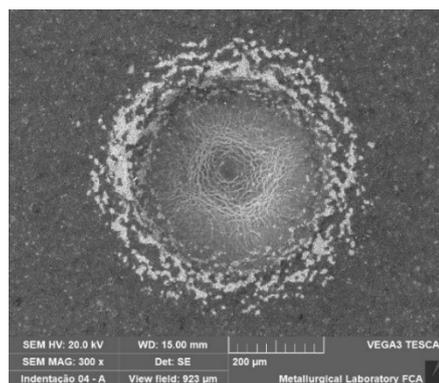
a) Indentação 1



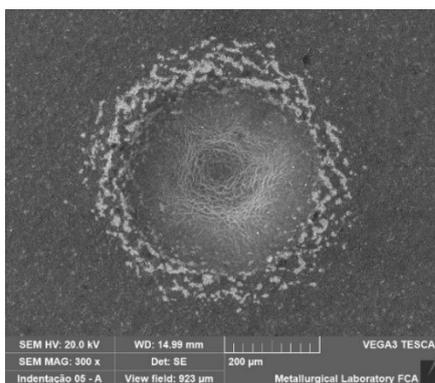
b) Indentação 2



c) Indentação 3



d) Indentação 4



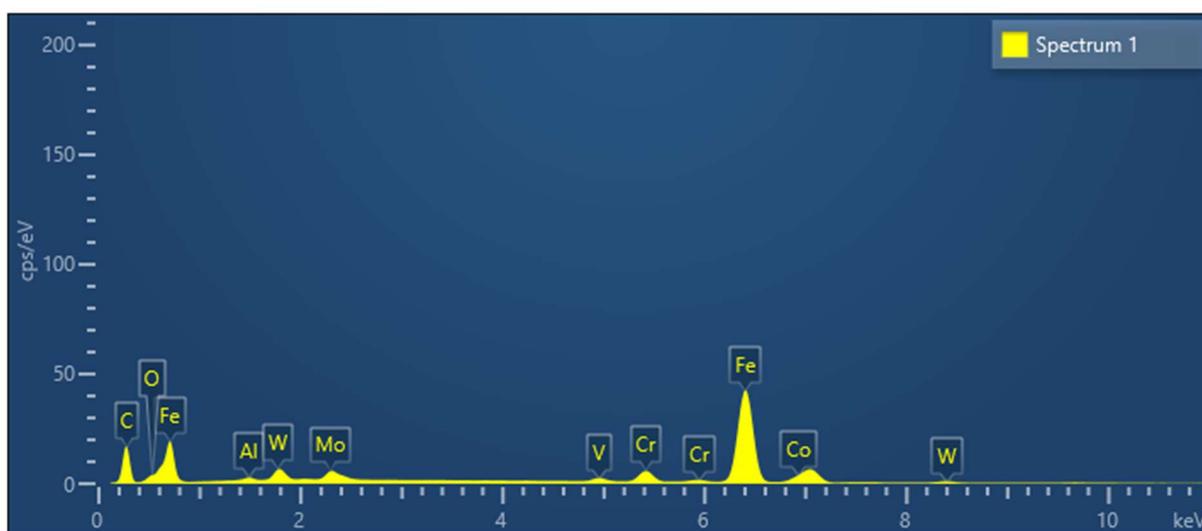
e) Indentação 5

Fonte: Próprio autor

A apresenta uma análise química por EDS da Indentação 1. Nesse ponto é possível observar a presença, em maior intensidade, de ferro, seguido por elementos

como vanádio, cromo, cobalto, tungstênio e carbono. A presença desses elementos está de acordo com a composição química do aço AISI M-35 apresentada na Tabela 18. Isso indica que na indentação foi atingido o substrato.

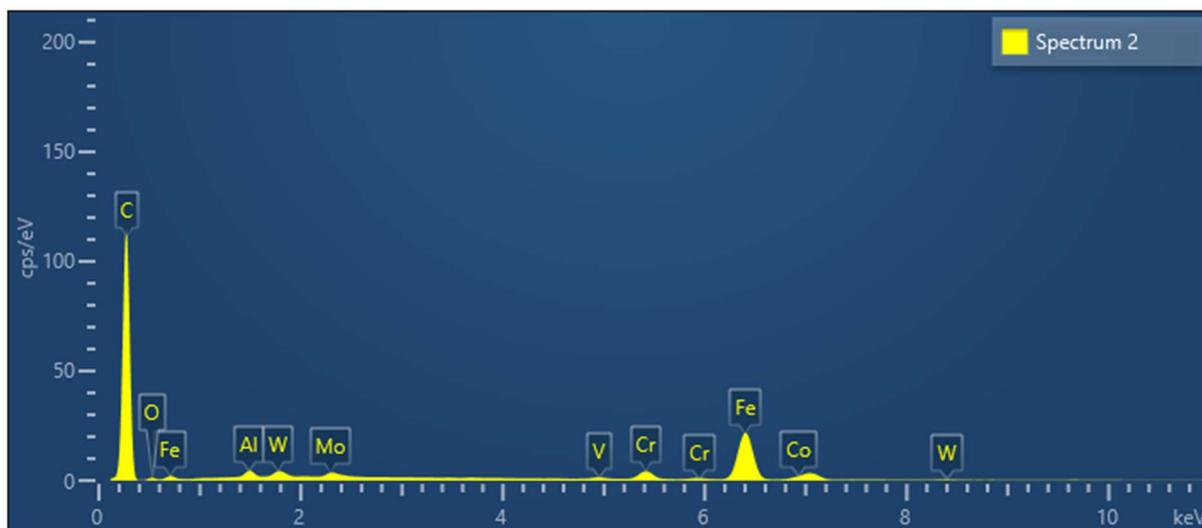
Figura 47: Análise química do ponto de indentação 1



Fonte: Próprio autor

No espectro referente ao ponto 2, apresentado na Figura 48, é observada maior presença do carbono, característico do revestimento DLC. Os outros elementos verificados correspondem aos que são característicos do aço AISI M-35, e sua detecção se justifica pela profundidade da análise, que supera a espessura do revestimento. Porém, parece tratar-se de um região na qual a indentação causou um dano menor, de maneira que o revestimento DLC manteve-se mais preservado.

Figura 48: Análise química do ponto de indentação 2

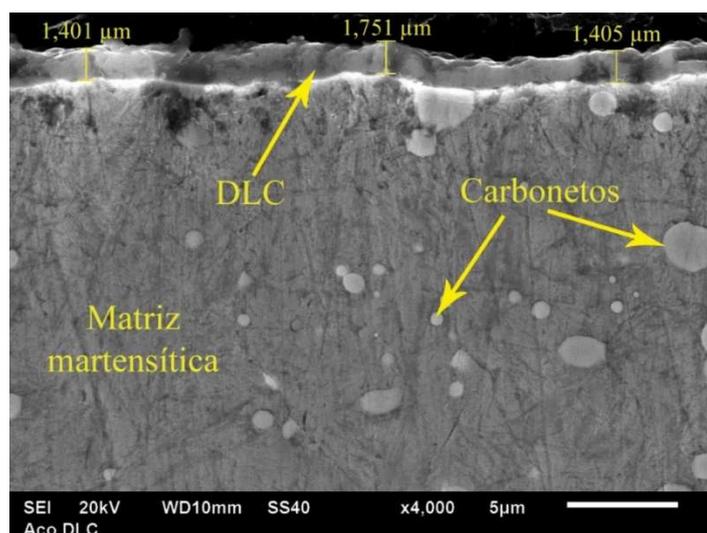


Fonte: Próprio autor

5.2.3 Avaliação da espessura do revestimento

A espessura do filme DLC foi avaliada por meio de MEV. Foram medidos três pontos de uma amostra, conforme a Figura 49:

Figura 49: Análise da espessura do filme DLC depositado sobre aço AISI-M35



Fonte: Próprio Autor

Os valores obtidos são apresentados na Tabela 25:

Tabela 25: Espessura do revestimento DLC sobre aço AISI-M35

Ponto	Espessura (mm)
1	1,401
2	1,751
3	1,401
Média aritmética	1,518
Desvio Padrão	0,202

Fonte: Próprio autor

Também foi feito o cálculo da espessura do revestimento por meio dos resultados obtidos no caloteste, conforme Tabela 26:

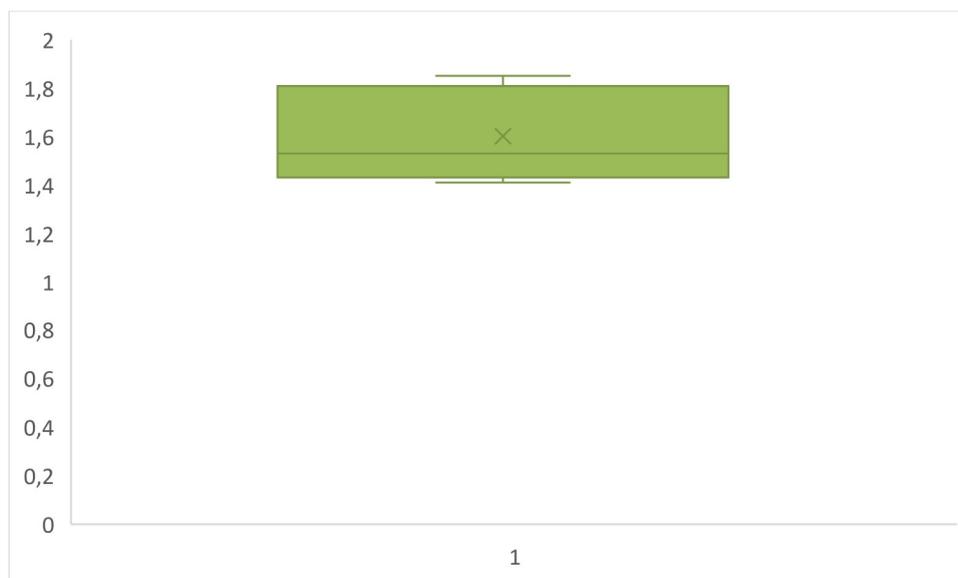
Tabela 26: Análise da espessura do revestimento DLC em varios pontos do aço AISI-M35

Espessuras (μm)	Média (μm)	Desvio padrão
1,766	1,6	0,2
1,531		
1,451		
1,411		
1,851		

Fonte: Próprio autor

Esses valores podem ser vistos também no gráfico apresentado na Figura 50:

Figura 50: Espessura do revestimento DLC



Fonte: Próprio autor

Tendo-se em vista os resultados obtidos, pode-se afirmar que a espessura do revestimento se mostrou uniforme. Além disso, os valores, em média de 1,518μm, quando avaliado por MEV e, 1,602μm, pelo método do caloteste, encontram-se dentro da faixa encontrada em outros estudos sobre filmes produzidos pelo processo *PVD* (POPESCU et al., 2017; KUMAR et al., 2020). Os resultados obtidos são, contudo, divergentes dos encontrados por Pires (2018), que correspondeu a, em média, 0,83μm para acabamento retificado, e também aos de Martins (2016), que afirmou não ter obtido regularidade na espessura do revestimento DLC aplicado sobre a superfície de aço rápido.

5.3 Caracterização da liga Al-Mg-Si 6061-T6

5.3.1 Caracterização da composição química

A forma utilizada nesse trabalho para determinar a composição química da liga Al-Mg-Si 6061-T6 foi a Espectrometria de Emissão Ótica. Foram realizadas três análises em uma amostra do material. O preparo necessário da amostra se restringiu à sua limpeza e secagem. A Tabela 27 mostra a composição química obtida:

Tabela 27: Composição química da amostra de Alumínio

Elemento	%	% médio obtido
Si	0,4 a 0,8	0,7
Fe	0,7	0,4
Cu	0,15 a 0,4	0,2
Mn	0,15	0,12
Mg	0,8 a 1,2	1,09
Cr	0,04 a 0,35	0,24
Zn	0,25	0,55
Ti	0,15	0,02
Outros (cada)	0,05	
Outros (total)	0,15	
Al	Restante	Aprox. 96,5

Fonte: Próprio autor

Conforme pode ser percebido, apesar de alguns elementos terem sido encontrados em composições médias diferentes das previstas, tais diferenças referem-se a proporções pouco significativas.

As ligas conformadas pertencentes à classe 6XXX possuem até 1,5% de magnésio e silício. Nesse caso, esses elementos exercem o papel de promover o aumento da resistência do material (GONÇALVES, 2012) (PIMENTA, 2017). Nas amostras analisadas, a soma dos percentuais médios obtidos dos dois elementos chegou a 1,79%. Apesar de ter sido um valor mais alto que o apontado por Gonçalves (2012), ele se manteve dentro do que havia sido certificado pelo fabricante e do previsto pela NBR 6834 (2000).

Enquanto elemento de liga, o cobre se faz presente na faixa entre 2 e 10%, composição bastante superior à encontrada, que foi de 0,2%. Quando ele se faz presente nessa faixa superior, entre 2% e 10%, as ligas Al-Cu respondem ao tratamento térmico com aumento na resistência, dureza e diminuição do alongamento. Uma vez que, no material analisado, ele foi encontrado em uma proporção bem menor, pode ser considerado como uma impureza. Porém, é importante mencionar que a presença do cobre, por si só, pode influenciar na redução da contração interna do material (GONÇALVES, 2012) (PIMENTA, 2017).

O zinco é um elemento que só é considerado como parte das ligas de alumínio na classe 7XXX. Apesar de ter sido encontrado em uma proporção maior que a

esperada, 0,55 frente a 0,25, uma vez que a liga avaliada não pertence ao grupo 7XXX, pode-se afirmar que, no material avaliado, ele também corresponde a uma impureza. No que tange à sua função nas ligas de alumínio, Pimenta (2017) afirma que o zinco auxiliaria no aumento da resistência à corrosão.

Sobre os outros elementos, o titânio é usado, principalmente, para auxiliar no refino do grão e prevenção de trincas. Há de se observar, porém, que esse elemento foi encontrado em uma proporção quase dez vezes menor que a esperada para a liga Al-Mg-Si 6061 (GONÇALVES, 2012) (PIMENTA, 2017).

Já o cromo, o ferro e o manganês são usualmente encontrados como impurezas no alumínio primário (GONÇALVES, 2012) (PIMENTA, 2017).

5.3.2 *Obtenção da Dureza*

Os valores de dureza obtidos na avaliação da liga Al-Mg-Si 6061-T6 são apresentados na Tabela 28:

Tabela 28: Dureza da liga Al-Mg-Si 6061-T6

Medida	Dureza (HRB)
1	54
2	55
3	57
4	57
5	56
Média	56

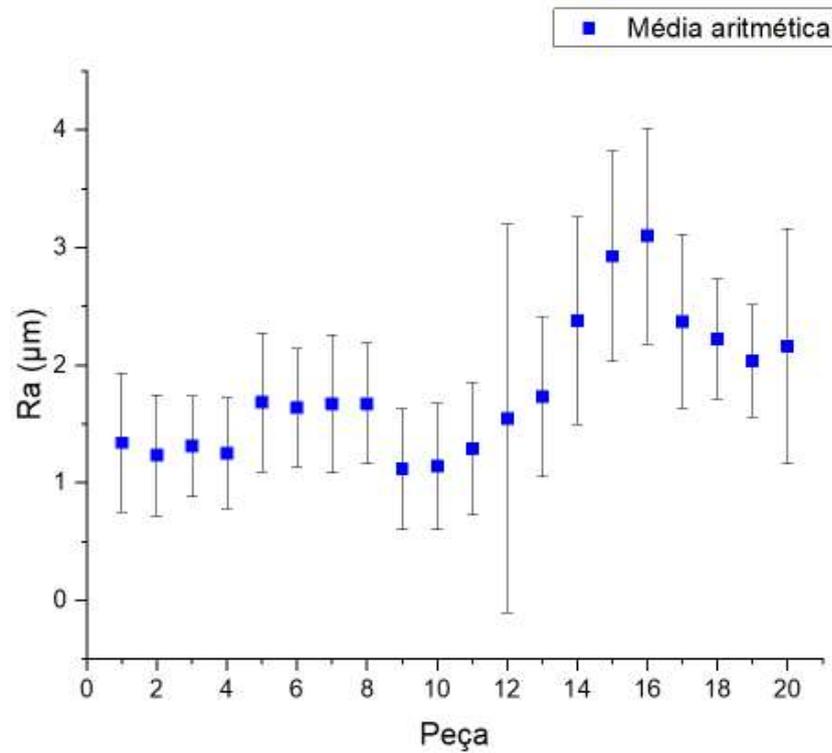
Fonte: Próprio autor

5.4 **Análise de acabamento superficial, erros de forma, desgaste e adesão do material usinado à superfície da ferramenta durante o processo de usinagem da liga Al-Mg-Si 6061-T6**

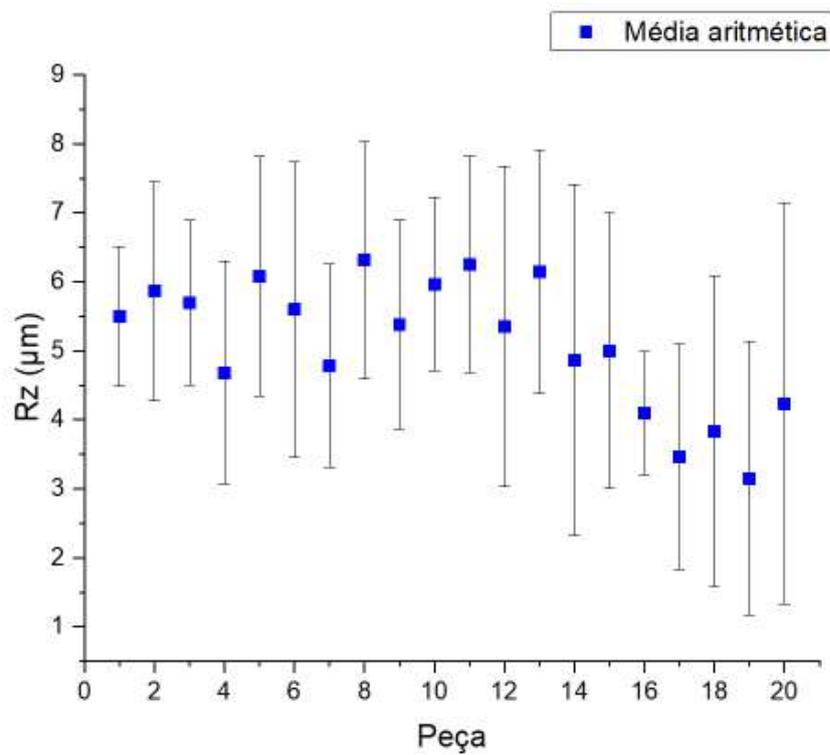
5.4.1 *Obtenção dos parâmetros de rugosidade*

Na Figura 51 são apresentados os gráficos onde são apresentados os valores médios de Rugosidade Superficial R_a , R_z , R_q e R_t .

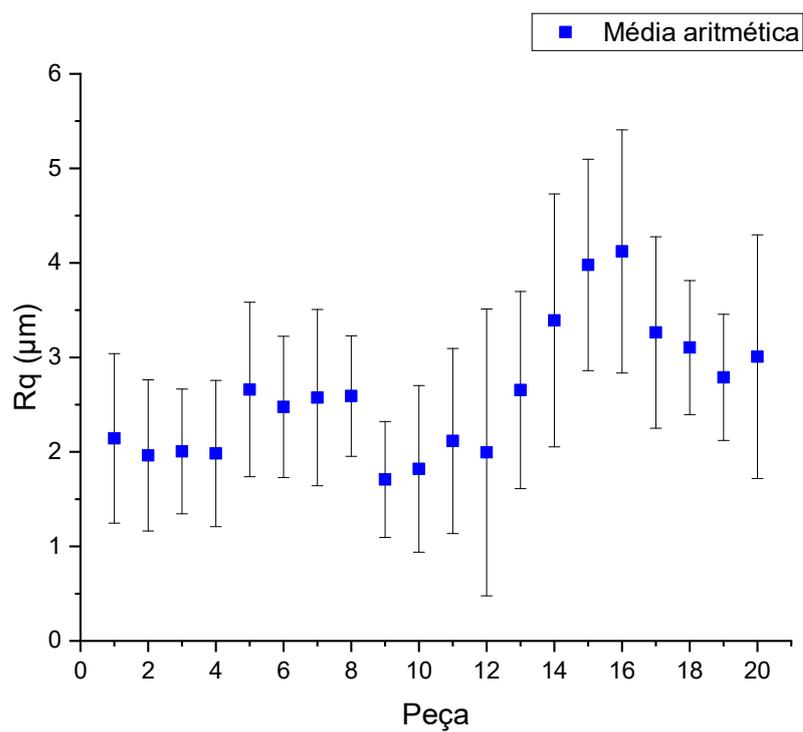
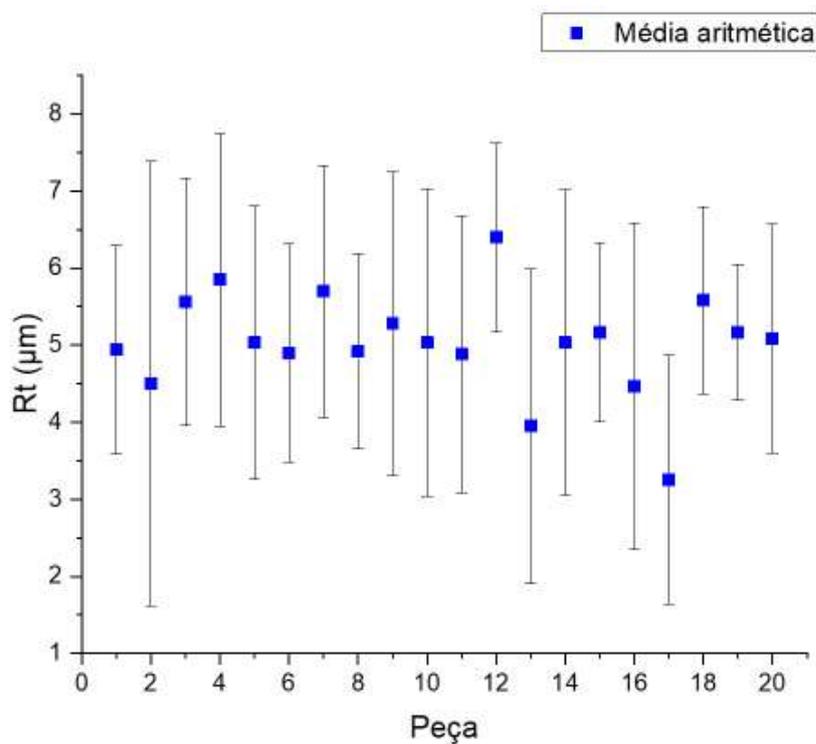
Figura 51: (a, b, c e d) Parâmetros de superfície R_a , R_z , R_q e R_t ao logo do número de peças usinadas



a) Superfície R_a



b) Superfície R_z

c) Superfície R_q d) Superfície R_t

Fonte: Próprio autor

O parâmetro R_a corresponde à média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem. Pode-se afirmar que, em relação aos

valores encontrados no parâmetro R_a nas peças usinadas, média e desvio padrão não sofreram grandes variações, principalmente, até a peça de número 11. Isso sugere a preservação do revestimento DLC aplicado sobre a superfície da ferramenta e o consequente êxito na execução de seu papel de evitar o desgaste da ferramenta e a adesão do material usinado sobre a superfície da mesma. Importante mencionar que essa observação é realizada mesmo após terem sido usinados o equivalente a 550 furos ou 8250 mm, sem utilização de fluido de corte. Mesmo a partir da peça 12, os valores se mantiveram uniformes, apesar de terem apresentado ligeira elevação e, em seguida, decréscimo quase proporcional. Isso permite concluir que mesmo após a conclusão da etapa de usinagem, quando foram obtidos 1000 furos a seco, o revestimento DLC continuou cumprindo sua função.

R_z corresponde à soma da altura máxima dos picos e a maior profundidade dos vales no comprimento de amostragem, o que permite considerá-lo mais sensível às mudanças no acabamento superficial. A uniformidade mantida até a peça de número 11, assim como o discreto acréscimo na dispersão verificado após esse ponto permitem fortalecer a avaliação de que ao longo de todo o processo de usinagem, o revestimento DLC manteve-se preservado e cumprindo sua função.

O parâmetro R_q refere-se à raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem. Apesar do fato de tratar-se de uma média quadrática ter o poder de tornar mais evidentes os valores distantes da média, o perfil obtido mostrou-se muito semelhante ao de R_a , corroborando com a avaliação em torno da uniformidade das condições das superfícies.

R_t corresponde à soma da maior altura do pico e da maior profundidade do vale no comprimento de amostragem. Os valores médios obtidos foram muito uniformes até a peça de número 11, passando a apresentar uma maior variação a partir daí. Devido ao fato dele considerar todo o comprimento de avaliação, os resultados obtidos em R_t também auxiliam no sentido de permitir a afirmação de que o acabamento superficial das superfícies usinadas manteve-se uniforme mesmo após a execução de 1000 furos sem a utilização de fluido de corte.

De uma maneira geral, em todos os quatro parâmetros de avaliação de rugosidade foi possível verificar uniformidade nos resultados. As variações encontradas, porém, podem ser relacionadas à adesão de material usinado à ferramenta, tal como Farid e Yussof (2020) observaram em sua análise sobre os efeitos da estratégia de corte na qualidade das superfícies na liga Al-Mg-Si 6061-T6.

Segundo os autores, mesmo dentro de cada uma das estratégias de corte ocorriam grandes variações nos valores de R_a devido a ocorrência da aresta postiça de corte.

Outro ponto a ser observado diz respeito ao que foi percebido por Liu et al. (2020), em sua pesquisa sobre o comportamento em relação ao atrito de chapas da liga Al-Mg-Si 6061 submetidas ao processo de estampagem. Segundo os autores, com a elevação das temperaturas, a chapa de Al-Mg-Si 6061 tinha sua dureza diminuída, ficando mais macia. Isso fazia com que houvesse uma maior facilidade de deformação plástica, o que causava mudanças na superfície, alterando os níveis de rugosidade. Também de acordo com os autores, tal alteração seria responsável também por oscilações no coeficiente de atrito, o que traria então sérias consequências para todos os aspectos tribológicos envolvidos no processo de usinagem.

5.4.2 Avaliação da evolução do diâmetro e dos erros de forma macrogeométricos

Na Tabela 29 são apresentados os valores médios e de desvio padrão obtidos na avaliação da evolução do diâmetro e dos erros de forma macrogeométricos de cilindridade e circularidade. Os valores foram obtidos em um momento posterior ao da usinagem em ensaio realizado em um laboratório, com temperatura controlada na faixa de 20°C. O batimento foi avaliado a cada troca de peça, ou seja, a cada 50 furos usinados. Houve uma variação nos valores de 0,005 mm a 0,02 mm.

Tabela 29: Avaliação das medidas e desvios padrões dos diâmetro, cilindridade e circularidade

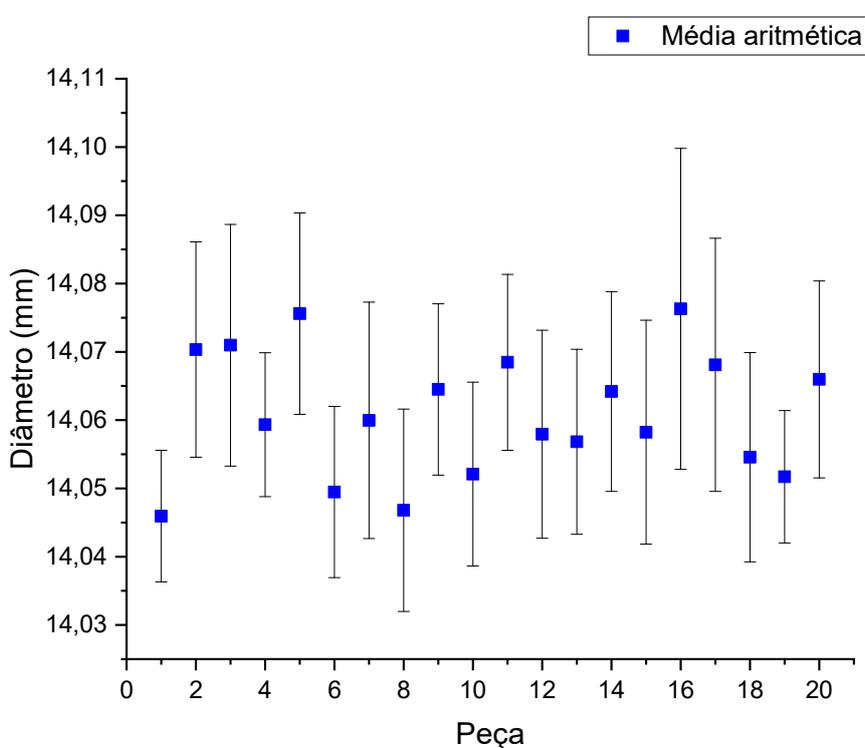
Diâmetro	Média	14,06
	Desvio Padrão	0,017
Cilindridade	Média	0,015
	Desvio Padrão	0,01
Circularidade	Média	0,039
	Desvio Padrão	0,02

Fonte: Próprio autor

O gráfico com a evolução do diâmetro em função do número de peças é apresentado na Figura 52. Conforme pode ser observado, todos os valores

encontrados foram superiores à soma do diâmetro nominal da broca e do batimento, ou seja, $14,00\text{mm} + 0,02\text{mm} = 14,02\text{mm}$. O maior valor foi medido na peça 16 e atingiu o valor de $14,10\text{mm}$. Uma vez que em nenhum dos pontos foi verificado diâmetro inferior ao mencionado, pode-se afirmar que o revestimento DLC cumpriu sua função de preservar a ferramenta do desgaste. Por outro lado, a obtenção de valores superiores a $14,02\text{mm}$ pode ser um indicativo da adesão do material usinado à superfície da ferramenta.

Figura 52: Evolução do diâmetro por número de peças



Fonte: Próprio autor

São mostradas na Figura 53, imagens das arestas de corte anteriores à usinagem da 16ª peça, na qual foi obtida a maior medição do diâmetro. Pelas imagens é possível perceber a presença de material aderido à ferramenta.

Figura 53: Imagens da aresta de corte anteriores à usinagem da 16ª peça



a) Região de análise da aresta de corte ponto 1



b) Região de análise da aresta de corte ponto 2



c) Região de análise da aresta de corte ponto 3

Fonte: Próprio autor

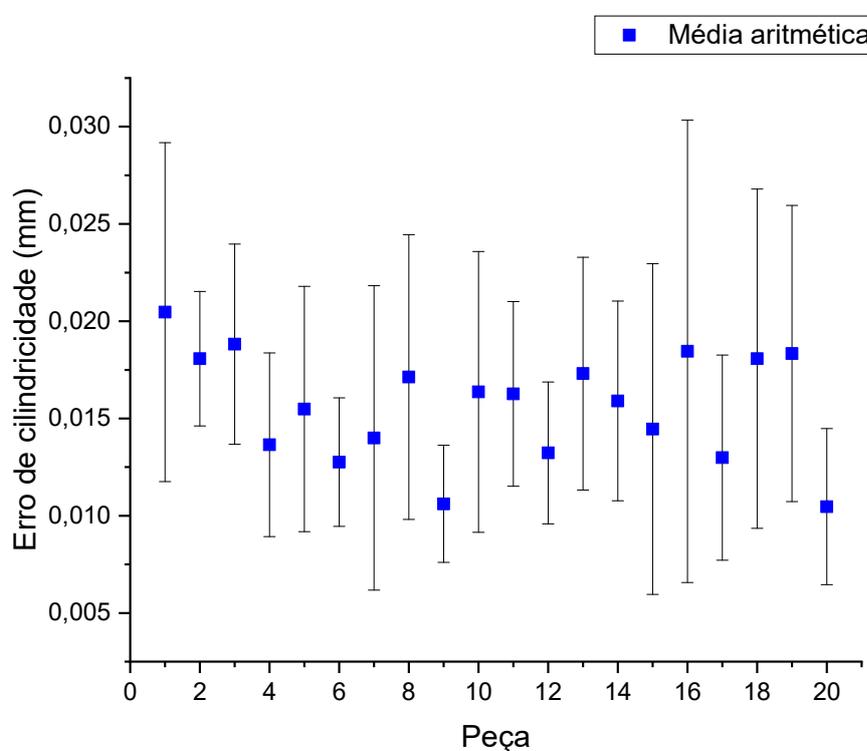
A Figura 54 apresenta o gráfico com a evolução dos erros de cilindricidade e circularidade em função do número de peças usinadas.

Com relação à cilindricidade, os valores absolutos variaram entre 0,005 a 0,030mm. Assim como na evolução do diâmetro, o maior valor obtido e a maior dispersão de valores foram verificados na peça 16. Também a exemplo da evolução

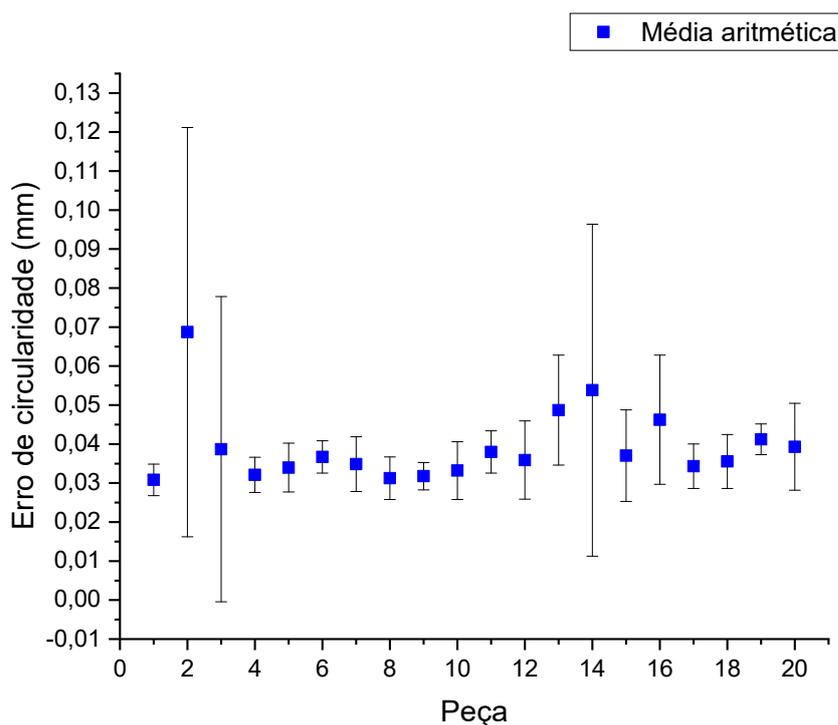
do diâmetro, é possível relacionar tais resultados à adesão de material à superfície da ferramenta, assim como é observado na Figura 53.

Na avaliação do erro de circularidade foram obtidos valores médios que variaram entre 0,03mm e 0,07mm. Por outro lado, houve uma dispersão muito alta nos resultados encontrados em três peças, as de números 2, 3 e 14. Os erros medidos por esse parâmetro dizem respeito à imperfeição do círculo e, também como nos casos da evolução do diâmetro e do erro de cilindridade, estão ligados à adesão de material sobre a superfície da ferramenta.

Figura 54: (a e b) Erros de cilindridade e circularidade



a) Erro de forma Cilindridade



b) Erro de forma Circularidade

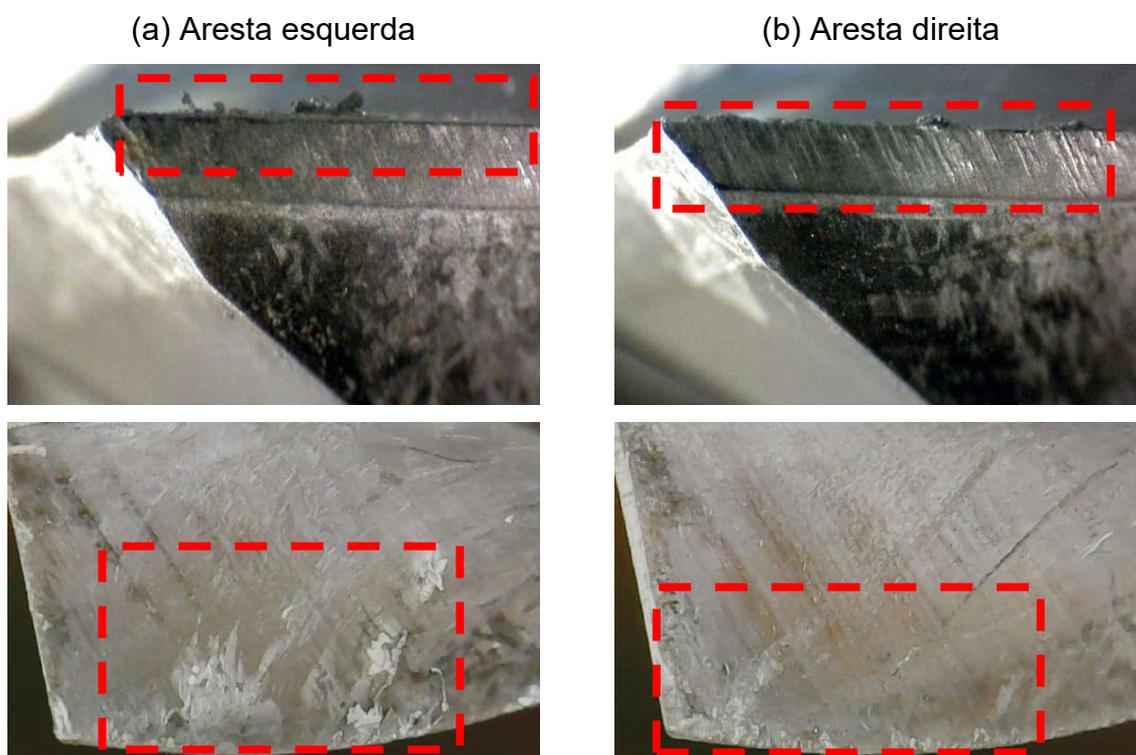
Fonte: Próprio autor

Dessa maneira, a partir dos dados obtidos na análise de evolução do diâmetro e dos erros de cilindridade e circularidade, é possível concluir que os desvios encontrados possuem relação com a adesão do material usinado à superfície da ferramenta e não com o desgaste da aresta de corte.

5.4.3 *Análise da evolução do desgaste das arestas de corte e da adesão de material usinado sobre a superfície da ferramenta*

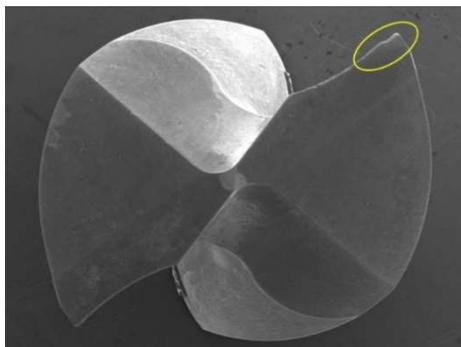
Na Figura 55 (a) e (b) são apresentadas imagens obtidas através da lupa eletrônica e que foram ampliadas em 80 vezes. Essas imagens mostram a presença de material aderido às arestas de corte esquerda e direita da ferramenta utilizada na usinagem da liga Al-MG-Si 6061-T6.

Figura 55: (a) e (b) Detalhe da presença de material aderido à aresta principal de corte em grande proporção



Fonte: Próprio autor

Na Figura 56 é apresentada uma imagem do topo da broca revestida por DLC utilizada na usinagem da liga Al-Mg-Si 6061-T6. Essa imagem foi obtida por meio de MEV e encontra-se ampliada em 20 vezes. Nela está indicada a aresta de corte da broca, que foi analisada quanto ao desgaste e adesão do material usinado.

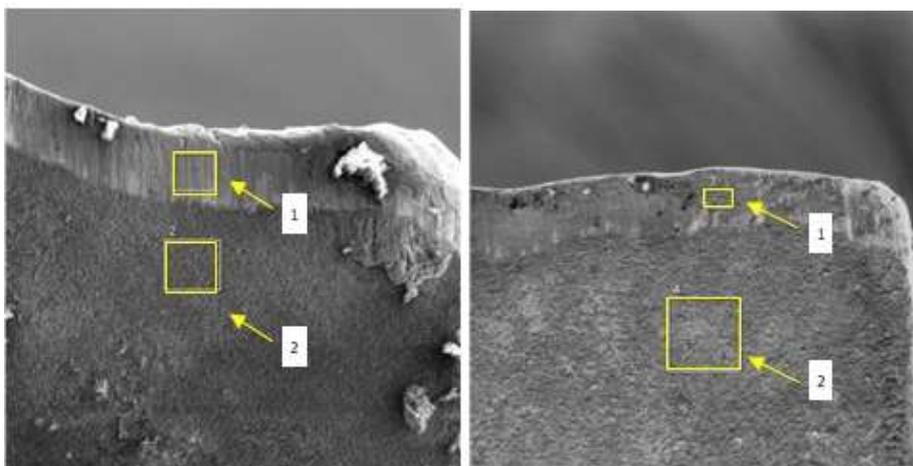
Figura 56: Mapa para obtenção das imagens

Fonte: Próprio autor

Na Figura 58 são apresentadas imagens da aresta de corte da região assinalada que é mostrada na Figura 57. Elas foram obtidas por MEV antes e após a realização da decapagem química e ampliadas em 500 vezes. Nas imagens também se encontram delimitadas as áreas nas quais foi realizada a análise da composição química por EDS.

Figura 58: Imagens da aresta de corte

(a) anterior à decapagem (b) posterior à decapagem



Fonte: Próprio autor

Na Tabela 30 são apresentados os resultados obtidos através da análise por EDS do ponto 1 da aresta de corte da imagem (a), realizada antes da decapagem química:

Tabela 30: Análise EDS ponto 1 – anterior à decapagem

Elemento	%
Al	47,17
Fe	33,99
C	12,67
Cr	2,29
Mo	1,22
V	1,01
W	0,85
Mg	0,79
Total	100,00

Fonte: Próprio autor

O alto percentual de Al encontrado na aresta de corte, próximo de 50%, é um indicativo da adesão de parte do material usinado à ferramenta. Já a presença de Fe, próxima de 35%, aponta o deslocamento do revestimento DLC naquelas regiões. Ambas situações podem ser consideradas indicativas de um baixo desempenho do filme (MARTINS, 2016).

Na Tabela 31 são apresentados os resultados obtidos através da análise por EDS do ponto 2 da aresta de corte da imagem (a), realizada antes da decapagem química:

Tabela 31: Análise EDS ponto 2 – anterior à decapagem

Elemento	%
C	83,17
Fe	7,82
O	5,22
Al	2,22
Cr	0,76
V	0,33
Mo	0,28
W	0,21
Total	100,00

Fonte: Próprio autor

O alto percentual de C encontrado nas regiões abaixo das arestas de corte, acima de 80%, está relacionado à presença do revestimento DLC. Também a presença de Al nessa região, ainda que em uma baixa concentração, cerca de 2%, pode indicar uma falha no processo de expulsão dos cavacos.

Na Tabela 32 são apresentados os resultados obtidos através da análise por EDS do ponto 1 aresta de corte da imagem (a), realizada após a decapagem química:

Tabela 32: Análise EDS ponto 1 posterior à decapagem

Elemento	%
Fe	54,46
C	36,90
Cr	3,33
Mo	2,20
V	1,84
W	1,26
Total	100,00

Fonte: Próprio autor

O alto percentual de Fe encontrado nas arestas de corte, maior que 50%, refere-se a parte do substrato que foi exposta em função do deslocamento de parte do DLC ocorrido naquelas regiões. Por outro lado, a indicação de um percentual de C também considerável, na faixa de 30%, mostra que outra parte do DLC se manteve preservada.

Na Tabela 32 são apresentados os resultados obtidos através da análise por EDS do ponto 2 da aresta de corte da imagem (a), realizada após a decapagem química:

Tabela 33: Análise EDS ponto 2 posterior à decapagem

Elemento	%
C	92,75
Fe	5,85
Cr	0,47
Al	0,30
Mo	0,25
V	0,20
W	0,15
Ca	0,04
Total	100,00

Fonte: Próprio autor

Nesse caso, o alto percentual de C também se encontra relacionado à presença do revestimento DLC, que se manteve bastante preservado nessa região.

O deslocamento, por deixar parte da superfície da ferramenta exposta, pode ter contribuído para o aumento do atrito na região e, conseqüentemente, para fenômenos como o aumento nas temperaturas de usinagem e a adesão do material usinado à ferramenta. Isso está relacionado ao que foi verificado por Liu et al. (2020) e que corresponde ao fato de que, além da diminuição da dureza, já mencionada, em altas temperaturas, ocorre uma adesão muito maior de material nas ferramentas de corte, em função das interações químicas e atômicas presentes.

Bhowmick et al. (2015) analisaram o comportamento tribológico de ligas Al-Si de diferentes concentrações de silício durante a furação a seco com ferramentas revestidas por DLC Hidrogenado, diamante CVD e fabricadas em WC-CO. No estudo, eles perceberam que o uso das ferramentas revestidas foi capaz de causar uma grande redução na formação de aresta postiça de corte nas brocas. Por outro lado, a furação utilizando ferramentas revestidas por DLC hidrogenado em ligas de Al-Si hipereutéticas deu origem ao pior desempenho em termos de vida útil das ferramentas, uma vez que partículas de silício removeram o revestimento e então aumentaram o atrito. Ao final, os autores perceberam que o DLC hidrogenado é capaz de substituir ferramentas de diamante CVD.

Por tratar-se de um estudo acerca da usinagem de um material dúctil como o alumínio, alguns aspectos devem ser considerados. No estudo realizado por Diniz et al. (2016), sobre os mecanismos de desgaste de ferramentas na usinagem de aços e

aços inoxidáveis, concluiu-se que o desgaste por adesão tem uma importância aumentada quando se trata da usinagem de materiais dúcteis. Além disso, também no que se refere à relação entre o desgaste por adesão e a usinagem de materiais dúcteis, segundo os autores, há uma tendência de que rebarbas do material arrancado estimulem o mecanismo de desgaste por adesão.

6 CONCLUSÕES

Na análise da composição química do aço AISI M-35 foi verificada a presença dos principais elementos de liga previstos para esse material. Dentre eles, porém, quatro foram observados em proporções fora dos parâmetros estabelecidos: Ni, Co, V, W. Tais elementos podem ter contribuído para a presença de carbonetos, que foram observados dispostos em uma matriz martensítica. Não foi possível, contudo, mensurar o impacto dessas variações, uma vez que seria necessário um estudo que permitisse comparar o desempenho do aço AISI M-35 utilizado no presente estudo com outro que se encontrasse integralmente dentro das faixas especificadas de composições química.

Antes da aplicação do revestimento DLC nas amostras de aço AISI M-35 foi verificada uma pequena dispersão nos valores de Rugosidade Média R_a . Essa dispersão sofreu um aumento após a aplicação do revestimento, cuja média aritmética foi de 2,7%. Tendo-se em vista as discretas variações encontradas na análise apresentada, pode-se afirmar que a aplicação do revestimento DLC no material utilizado neste trabalho não provocou alterações significativas nos valores de R_a , ou seja, o revestimento DLC acompanhou a rugosidade do substrato.

Com relação à dureza, a média aritmética dos valores encontrados nas cinco regiões avaliadas foi de 66HRC, valor próximo ao que foi encontrado por outros pesquisadores ao avaliar o aço AISI M-35.

A comparação entre os diâmetros das calotas e os coeficientes de desgaste específico obtidos no ensaio de desgaste por microabrasão no aço AISI M-35 não revestido por DLC e no aço revestido, evidenciaram que as amostras que receberam o revestimento DLC tiveram o diâmetro médio reduzido em cerca de 71%. Já o coeficiente de desgaste específico médio foi 142 vezes maior no aço não revestido por DLC. Ambos os resultados demonstram que houve uma melhora significativa na resistência ao desgaste a partir da utilização do filme DLC.

Por meio da espectroscopia Raman foi possível verificar a presença de ligações sp^3 no revestimento DLC em uma proporção menor que 20%, o que permite classificar o revestimento como um carbono amorfo não tetraédrico, tipo a:C.

Os resultados obtidos na análise por XPS demonstraram a presença dos elementos carbono e oxigênio, com uma prevalência de carbono, que corresponde a mais de 92% do material. A presença do oxigênio pode ser atribuída a impurezas

introduzidas no revestimento durante o processo de deposição ou a contaminações decorrentes da exposição do material ao ar. O percentual de ligações sp^3 foi quantificado em 17,89%. Por ele se encontrar dentro da margem que havia sido apontada pela Espectroscopia Raman, tem-se uma confirmação do fato de tratar-se de um carbono amorfo não tetraédrico, tipo a:C.

No ensaio para verificação da adesão do revestimento foram identificados pontos de delaminação ao redor de toda a impressão. Não há, contudo, uma continuidade entre eles. Isso permite classificar a adesão como HF3, que se encontra dentro dos limites aceitáveis segundo a norma utilizada. Em uma análise química por EDS da área de uma das indentações foi observada a maior presença do carbono, característico do revestimento DLC. Isso permite afirmar tratar-se de um região na qual a indentação causou um dano menor, de maneira que o revestimento DLC manteve-se mais preservado.

A espessura do revestimento se mostrou uniforme. Além disso, os valores avaliados por MEV e por caloteste, encontram-se dentro da faixa encontrada em outros estudos sobre filmes produzidos pelo processo *PVD*, além de terem se mostrado muito próximos.

A média aritmética e o desvio padrão dos valores obtidos na avaliação do parâmetro R_a nas superfícies usinadas da liga Al-Mg-Si 6061-T6 mantiveram-se uniformes, principalmente, na primeira metade do experimento. Isso evidencia a preservação do revestimento DLC aplicado sobre a superfície da ferramenta e o consequente êxito na execução de seu papel de evitar o desgaste da ferramenta e a expressiva adesão do material usinado sobre a superfície da mesma.

No parâmetro R_z também foi verificada uniformidade até a peça de número 11 e, após esse ponto, um discreto acréscimo na dispersão. Isso permite fortalecer a avaliação de que ao longo de todo o processo de usinagem, o revestimento DLC manteve-se preservado e cumprindo sua função.

Os resultados obtidos do parâmetro R_q mostraram-se muito semelhantes aos de R_a , corroborando com a avaliação em torno da uniformidade das condições das superfícies.

Os valores médios obtidos em R_t também foram muito uniformes até a peça de número 11, passando a apresentar uma maior variação a partir daí. Devido ao fato dele considerar todo o comprimento de avaliação, os resultados obtidos em R_t também auxiliam no sentido de permitir a afirmação de que o acabamento superficial das

superfícies usinadas manteve-se uniforme mesmo após a execução de 1000 furos sem a utilização de fluido de corte.

Em relação à evolução do diâmetro, o maior valor foi medido na peça 16 e atingiu 14,10 mm. Não foi verificado diâmetro inferior à soma do diâmetro nominal da broca e do batimento, 14,02 mm. Pode-se então afirmar que o revestimento DLC cumpriu sua função de preservar a ferramenta do desgaste. Por outro lado, a obtenção de valores superiores ao diâmetro nominal da broca pode ser um indicativo da adesão do material usinado à superfície da ferramenta.

Com relação à cilindridade, os valores absolutos variaram entre 0,005 a 0,030 mm. Assim como na evolução do diâmetro, o maior valor obtido e a maior dispersão de valores foram verificados na peça 16. Também a exemplo da evolução do diâmetro, é possível relacionar tais resultados à adesão de material à superfície da ferramenta.

Na avaliação do erro de circularidade foram obtidos valores médios que variaram entre 0,03 e 0,07 mm. Porém, houve uma dispersão muito alta nos resultados encontrados em três peças. Os erros medidos por esse parâmetro dizem respeito à imperfeição do círculo e, assim como nos casos da evolução do diâmetro e do erro de cilindridade, estão ligados à adesão de material sobre a superfície da ferramenta. Esse fenômeno, juntamente do deslocamento do revestimento em algumas regiões foram confirmados na análise de adesão de material usinado sobre a superfície da ferramenta, realizada por meio de EDS.

Os resultados obtidos nos testes tribológicos aplicados na caracterização do material demonstraram melhora nas características de resistência ao desgaste apresentadas pelo aço AISI M-35 revestido por DLC, em comparação ao aço não revestido. Já os resultados obtidos na análise do material usinado revelaram que mesmo após a usinagem de 1000 furos a seco, o revestimento DLC, apesar de ter apresentado deslocamento em algumas regiões, manteve-se preservado e cumprindo sua função.

Nesse sentido, pode-se concluir que a utilização de revestimento por DLC em ferramentas de corte produzidas em aço AISI M-35 pode se apresentar como uma alternativa promissora, quando se busca uma melhor resistência ao desgaste e, conseqüentemente, maior vida útil das ferramentas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM INTERNATIONAL. **Metals Handbook: Properties and selection: irons steels and high performance alloys**. 10th ed. Ohio: ASM International; 1990. Wrought Tool Steels, Specialty Steels and Heat-Resistant Alloys; p. 1763-1839

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO (ABAL). **Têmperas**. Disponível em: <http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/temperas/>. Acesso em 20/01/2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 4288**: Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 3002-1**: Grandezas básicas em usinagem e retificação Parte 1: Geometria da parte cortante das ferramentas de corte – Termos gerais, sistemas de referência, ângulos da ferramenta e de trabalho e quebra-cavacos. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 3685**: Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento. Rio de Janeiro, 2017.

BERMEJO, D. **Introducción a la espectroscopia Raman**. Washington: OEA, 1988.

BORBA, R.B. **Estudo da influência das afiações em brocas escalonadas de canal reto na furação da liga de alumínio SAE 306**. Dissertação (Mestrado). São João Del Rei: UFSJ, 2013.

BRZEZINKA, T. *et al.* DLC and DLC-WS2 Coatings for Machining of Aluminium Alloys. **Coatings** 9, 2019.

CAI, R. *et al.* Wear mechanism evolution on brake discs for reduced wear and particulate emissions. **Wear** 452-453, 2020

CASTILLO, W.J.G. **Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal duro com canais retos**. Dissertação (Mestrado). Santa Catarina: UFSC, 2005.

CASTRO, P.R.A. **Aspectos tecnológicos da usinagem a seco e com mínima quantidade de fluido de corte na furação com broca helicoidal**. Dissertação (Mestrado). Santa Catarina: UFSC, 2001.

CHAUS, A.S. Complex fine-scale diffusion coating formed at low temperature on high-speed steel substrate. **Applied Surface Science**, V. 437, 2018 (257-270)

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7ª ed. ampl. e rev. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 2008.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4^a ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2008.

CONSTANTINO, M. *et al.* Enhancing the nanoscratch resistance of pulsed laser deposited DLC films through molybdenum-doping. **Surface & Coatings Technology** 330, 185-195, 2017.

COZZA, R. C. C. **Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste micro-abrasivo**. Dissertação (Mestrado). São Paulo: USP, 2006.

DALIBÓN, E. *et al.* Characterization of DLC coatings over nitrided stainless steel with and without nitriding pre-treatment using annealing cycles. **Journal of Materials Research and Technology** 8, 2019.

DASCH, J. M. *et al.* A comparison of five categories of carbon-based tool coatings for dry drilling aluminium. **Surface & Coatings Technology**, v. 200, 2006.

DELFIN, F. *et al.* Carbon based films: Influence of the processing parameters on the structure and properties. **Revista Matéria** 23, 2018.

EL-ESKANDARANY, M. Mechanical Alloying: Nanotechnology, **Materials Science and Powder Technology**. 2nd ed. Oxford: Elsevier; 2015. Vapor deposition;

ENKE, K. Dry machining and increase of endurance of machine parts with improved doped DLC coatings on steel, ceramics and aluminium. **Surface & Coatings Technology**, 1999.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **DD ENV 1071**: Advanced technical ceramics. Methods of test for ceramic coatings. Brussels: DIN, 2001.

FARIA, D. L. A.; PUGLIERI, T. S. Um exemplo de aplicação da Microscopia Raman na autenticação de obras de arte. **Química Nova**, v.34, 2011.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgar Blucher, 2006.

FUKUI, H. *et al.* Cutting performance of DLC coated tools in dry machining aluminium alloys. **Surface & Coatings Technology**, v. 187, 2004.

GAJRANI, K. K.; SURESH, S.; SANKAR, M. R.; Environmental friendly hard machining performance of uncoated and MoS₂ coated mechanical micro-textured tungsten carbide cutting tools. **Tribology International**, 2018.

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

HADDOCK, D. *et al.* Characterisation of Diamond-Like Carbon (DLC) laser targets by Raman spectroscopy. **Journal of Physics: Conference Series** 713, 2016.

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

JOST, H. Tribology – origin and future. **Wear** 136, 1-17, 1990.

KUMAR, C. *et al.* Applicability of DLC and WC/C low friction coatings on Al₂O₃/TiCN mixed ceramic cutting tools for dry machining of hardened 52100 steel. **Ceramics International** 46, 2020.

LENZ, B. *et al.* Automated evaluation of Rockwell adhesion tests for PVD coatings using convolutional neural networks. **Surface & Coatings Technology** 385, 2020.

MACHADO, A. R. *et al.* **Teoria da usinagem dos metais**. 3. ed. São Paulo: 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, P.S. Geometria de furos usinados com broca de aço rápido VK5 a alta velocidade em peça de Al-Si. **Revista Máquinas e Metais**, ano 53, nº 617, 2017. Disponível em:

http://www.arandanet.com.br/revista/mm/materia/2017/08/21/geometria_de_furos.html

MELO, S. A. **Minimização dos erros micro e macro geométricos em peças torneadas usando a metodologia de superfície de resposta**. Dissertação de Mestrado. São João Del Rei: UFSJ; 2016.

PACHECO, R.E. **Análise da qualidade de furação na liga de Alumínio AA2011**. Dissertação de Mestrado. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2016.

PERUS, I. *et al.* Improving of hot workability and expanding the temperature range of safe hot working for M35 high-speed steel. **Materiali in Tehnologije**, 2017, Vol.51(3), pp.485-491.

PILLACA, E.J. *et al.* DLC deposition inside a long tube by using the pulsed-DC PECVD process. **Surface & Coatings Technology** 359, 55-61, 2018.

PIRES, S.S. **Aspectos tribológicos de revestimento Diamond-like carbono sobre a superfície de aço rápido AISI M2**. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: CEFET-MG, 2018.

POPESCU, C. *et al.* An Experimental Study on Nano-Carbon Films as an Anti-Wear Protection for Drilling Tools. **Coatings** 7; 2017.

QI, Y. *et al.* Wear of WC inserts textured by shot peening and electrical discharge machining. **Wear** 452-453, 2020.

RAHMATI, B.; SARHAN, A. A. D.; SAYUTI, M. Morphology of surface generated by end milling Al6061-T6 using molybdenum disulfide (MoS₂) nanolubrication in end milling machining. **Journal of Cleaner Production**, v. 66, 2014.

ROBERTSON, J.; FERRARI, A. Raman Spectroscopy of Amorphous, Nanostructured, Diamond-like Carbon and Nanodiamond. **Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences** 362, 2004.

ROUSSEAU, A. F. **Metallurgical Characterization and Performance of High Speed Tool Materials used in Metal Cutting Applications**. Melbourne: RMIT University, 2016.

ROUSSEAU, A.; DOYLE, E.; MCCULLOCH, D. Vacuum heat treatment of high speed steel cutting tools. **International Heat Treatment and Surface Engineering** 3, vol 7, 2013.

ROUSSEAU, A. *et al.* Carbon evolution during vacuum heat treatment of High Speed Steel. **Vacuum** 124, 85-88, 2016.

SALA, O. **Fundamentos da espectroscopia Raman e no Infravermelho**. São Paulo: UNESP, 2008.

SALAH, N. *et al.* Tribological behavior of diamond-like carbon thin films deposited by the pulse laser technique at different substrate temperatures. **Tribology International** 103, 274-280, 2016.

SALES, W. F. *et al.* Dynamic behavior analysis of drill-threading process when machining AISi Al-Si-Cu₄ alloy. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer-Verlag London, February 2008.

SANTOS Jr. M. C. *et al.* Machining of aluminium alloys: a review. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer-Verlag London, February 2016.

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

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

SILVA, W. *et al.* Performance of carbide tools coated with DLC in the drilling of SAE 323 aluminium alloy. **Surface & Coatings Technology** 284, 404-409, 2015.

SILVA, W. *et al.* Improving precision in aluminium alloy machining due to the application of diamond-like carbon thin film. **Journal of Tribology** 143, 2021.

SOLIS, J. *et al.* Tribological performance of an H-DLC coating prepared by PECVD. **Applied Surface Science** 383, 222-232, 2016.

SOUZA, P.S. **Caracterização das propriedades mecânicas do revestimento de carbono tipo diamante em ferramenta de furação.** Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: PUC-MG, 2014.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I.** Florianópolis: UFSC, 1995

TANG, L. *et al.* Significantly enhanced mechanical and tribological properties of Co-based alloy coatings by annealing treatment. **Tribology International** 146, 2020

UCUN, I. *et al.* The performance of DLC-coated and uncoated ultra-fine carbide tools in micromilling of Inconel 718. **Precision Engineering** 41, 135-144, 2015.

VILLARES METALS. **Aços rápidos – VK5E.** São Paulo, 2020. Catálogo. Disponível em: < <http://www.villaresmetals.com.br/pt/Produtos/Acos-Rapidos/VK5E>>. Acesso em 20/01/2020.

WANG, C. *et al.* Indentation and scratch testing of DLC-Zr coatings and ultrafine-grained titanium processed by high-pressure torsion. **Wear** 306, 2013.