UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO NO TORNEAMENTO DO AÇO SAE 8640 EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO

GUSTAVO HENRIQUE CORREIA ROSA LEANDRO

Catalão – GO

2020

SIBI
SISTEMA DE BIBLIOTECAS UFG

PRPG
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO

UFG

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o(a) autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico: **[X] Dissertação** **[ ] Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

Nome completo do autor : Gustavo Henrique Correia Rosa Leandro

Título do trabalho: Avaliação do Comportamento no Torneamento do aço SAE 8640 em diferentes condições de lubri-refrigeração.

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento [x] SIM [ ] NÃO[1]

Independente da concordância com a disponibilização eletrônica, é imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.

Assinatura do autor

Ciente e de acordo:

Assinatura do orientador

Data: 06 / 04 / 2020

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.
Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Digitalizado com CamScanner

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO NO TORNEAMENTO DO AÇO SAE 8640 EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO

GUSTAVO HENRIQUE CORREIA ROSA LEANDRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Goiás, como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.

Área de Concentração: Engenharia e Desenvolvimento de Produtos e Processos.

Orientador: Prof. Dr. André Alves de Resende.

Catalão – GO

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Henrique Correia Rosa Leandro, Gustavo
AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO NO TORNEAMENTO DO AÇO SAE 8640 EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE LUBRI REFRIGERAÇÃO [manuscrito] / Gustavo Henrique Correia Rosa Leandro. - 2020.
XCI, 91 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. André Alves de Resende.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia e Administração, Catalão, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Catalão, 2020.
Bibliografia. Apêndice.
Inclui siglas, fotografias, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, algoritmos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICAÇÃO (MQL). 2. RUGOSIDADE (RA - RT). 3. METAL DURO. 4. DESGASTE. 5. GRAFITE. I. Alves de Resende, André , orient. II. Título.

CDU 658.5

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE ENGENHARIA

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº **17** da sessão de Defesa de Dissertação de **GUSTAVO HENRIQUE CORREIRA ROSA LEANDRO**, que confere o título de Mestre em **Engenharia de Produção**, na área de concentração em **Engenharia de Operações e Processos Industriais.**

"Banca Examinadora de Qualificação/Defesa Pública de Dissertação/Tese realizada em conformidade com a Portaria da CAPES n. 36, de 19 de março de 2020, de acordo com seu segundo artigo:

Art. 2o A suspensão de que trata esta Portaria não afasta a possibilidade de defesas de tese utilizando tecnologias de comunicação à distância, quando admissíveis pelo programa de pós-graduação stricto sensu, nos termos da regulamentação do Ministério da Educação."

Ao/s **trinta dias do mês de março do ano de dois mil e vinte**, a partir das **09 horas**, na **Sala Virtual (https://conferenciaweb.rnp.br/webconf/lucas-10)**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada **"AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO NA USINAGEM DO AÇO SAE 8640 EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE LUBRIFICAÇÃO"**. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **ANDRE ALVES DE RESENDE (PPGEP),** via vídeo conferência, com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor **RICARDO RIBEIRO MOURA (PPGEP)**, via vídeo conferência, membro titular interno; Professor Doutor **WISLEY FALCO SALES (POSMEC/ UFU)**, via vídeo conferência, membro titular externo. Durante a arguição os membros da banca **fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor **ANDRE ALVES DE RESENDE**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos trinta dias do mês de março de dois mil e vinte.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO NO TORNEAMENTO DO AÇO SAE 8640 EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO

Documento assinado eletronicamente por **Andre Alves De Resende**, **Orientador**, em 30/03/2020, às 14:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Ribeiro Moura**, **Professor do Magistério Superior**, em 30/03/2020, às 16:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Wisley Falco Sales**, **Usuário Externo**, em 01/04/2020, às 08:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?

acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1255425** e o código CRC **C0C9985E**.

Referência: Processo nº 23070.013536/2020-19 SEI nº 1255425

À minha avó Maria (in memoriam), que não pode estar ao meu lado neste momento tão importante, mas que sempre torceu pelo meu sucesso.

AGRADECIMENTOS

Com relação aos anos de mestrado, gostaria de agradecer a algumas pessoas e instituições que foram fundamentais para a realização de mais este sonho. Por isso expresso aqui, através de palavras sinceras, um pouco sobre a importância que elas tiveram e ainda têm, nesta conquista. Minha sincera gratidão a todas elas:

À Universidade Federal de Goiás (UFG) Regional Catalão, pela oportunidade de desenvolvimento desta pesquisa.

À Escola SENAI Catalão, especialmente à Diretora Aliana Calaça e ao Supervisor de Educação e grande amigo Danilo Corinto, pelo incentivo, apoio e disponibilização do Laboratório de Usinagem para o desenvolvimento desta pesquisa.

Minha gratidão em especial ao Prof. Dr. André Alves de Resende, meu orientador, por ter acreditado e depositado sua confiança em mim ao longo de todo esse período de mestrado. Agradeço por todo apoio.

Ao Prof. Dr. Ricardo Ribeiro Moura, pelas dicas e orientações práticas necessárias para a realização dos ensaios de usinagem.

Aos meus pais Saloed e Neide, pela compreensão e pelo contínuo apoio nos meus estudos. Agradeço por desejaram sempre o melhor para mim, por se esforçarem para que eu superasse cada obstáculo em meu caminho e chegasse até aqui. Gratidão principalmente pelo amor imenso que vocês sempre me deram.

À minha amiga Flávia Freitas, por compartilhar importantes conhecimentos acadêmicos e estar sempre ao meu lado disposta a ajudar.

Aos meus amigos do Laboratório de Usinagem da Escola SENAI-Catalão, João Paulo Ferreira, Victor Tiago, João Martins, Edir Freire e Pedro Henrique, agradeço pelo companheirismo e amizade.

Um obrigado especial ao meu amigo Henrique Thavares, quem eu realmente considero como irmão, e que sempre esteve ao meu lado, me apoiando e torcendo por mim, independente da distância entre nós.

Ao meu amigo André Cessa, pelo companheirismo e apoio nos momentos difíceis durante a caminhada do mestrado.

À FAPEG, cujo suporte financeiro possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim, o agradecimento mais importante: à Deus, por estar sempre comigo, dando-me fé e forças necessárias para enfrentar todos os obstáculos e nunca desistir.

LEANDRO, G. H. C. R. **Avaliação do Comportamento no Torneamento do aço SAE 8640 em diferentes condições de lubri-refrigeração.** 91p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, GO. 2020.

RESUMO

Durante os processos de usinagem, busca-se por métodos e parâmetros que possibilitam baixos valores de rugosidade da superfície usinada, devido sua influência sobre a qualidade final da peça. Dessa forma, é necessário associar parâmetros de usinagem com a ferramenta de corte e condições mais adequadas de lubri-refrigeração por estarem diretas ou indiretamente ligadas a qualidade final da superfície usinada. Nesse sentido, este trabalho apresenta um estudo sobre o lubrificante sólido no processo de torneamento do aço SAE 8640. Os ensaios foram a seco, com Mínima Quantidade de Lubrificação - MQL e MQL, contendo na solução 10% em peso de lubrificante sólido, com grafite GR 20 (grafite com tamanho de partícula de 20 μm). Para o sistema MQL foi utilizado dois bicos nebulizadores com pressão de 6 bar e vazão de 4 ml/min. Foram utilizadas como variáveis de entrada a Velocidade de corte - Vc (360 m/min, 290 m/min, 220 m/min e 150 m/min), avanço – f (0,01 mm/rot e 0,06 mm/rot) e a profundidade de corte - ap constante (0,5 mm), para as três condições de lubri-refrigeração mencionadas. Os parâmetros avaliados nos ensaios foram: acabamento da superfície usinada (R_a e R_t), desgaste da ferramenta de corte e análise do cavaco e grau de recalque (R_c). Os resultados dos ensaios mostraram que ao acrescentar o grafite, a rugosidade diminui, considerando que utilizando o mesmo volume de fluido, a temperatura não foi um fator decisivo nesta redução (de MQL para MQL+ grafite). Isso é uma evidência que, de fato, o MQL tem uma ação importante como lubrificante, tanto que o grafite apresentou menores valores de rugosidade Ra e Rt - menor desgaste da ferramenta de corte, bem com a redução do grau de recalque. Desse modo, o desgaste de flanco foi predominante nos ensaios para todas as condições de lubri-refrigeração. Sendo assim, é possível concluir que a aplicação do grafite no torneamento do aço SAE 8640 pode oferecer maior produtividade no processo de usinagem e melhor acabamento da peça de trabalho.

Palavras-Chave: Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL), Metal Duro, Rugosidade (Ra e Rt), Grafite, Desgaste da Ferramenta.

LEANDRO, G. H. C. R. **Behavior Assessment in SAE 8640 steel turning in different cooling-cooling conditions.** 91p. Masters Dissertation, Federal University of Goiás – Regional Catalão, GO. 2020.

ABSTRACT

During machining processes, methods and parameters are sought that enable low roughness values of the machined surface, due to their influence on the final quality of the part. Thus, it is necessary to associate machining parameters with the cutting tool and more suitable lubrication and cooling conditions, as they are directly or indirectly linked to the final quality of the machined surface. In this sense, this work presents a study on the solid lubricant in the SAE 8640 steel turning process. The tests were dry, with Minimum Amount of Lubrication - MQL and MQL, containing in the solution 10% by weight of solid lubricant, with cemented Carbide GR 20 (cemented Carbide with particle size of 20 μm). For the MQL system, two nebulizer nozzles were used with a pressure of 6 bar and a flow rate of 4 ml / min. Cutting speed - Vc (360 m / min, 290 m / min, 220 m / min and 150 m / min), feed - f (0.01 mm / rev and 0.06 mm / rot) and the depth of cut - constant ap (0.5 mm), for the three lubrication-cooling conditions mentioned. The parameters evaluated in the tests were: finishing of the machined surface (Ra and Rt), wear of the cutting tool and chip analysis and degree of repression (Rc). The results of the tests showed that when adding graphite, the roughness decreases, considering that using the same volume of fluid, temperature was not a decisive factor in this reduction (from MQL to MQL + graphite). This is evidence that, in fact, MQL has an important action as a lubricant, so much so that the graphite showed lower values of Ra and Rt roughness - less wear of the cutting tool, as well as a reduction in the degree of repression. Thus, flank wear was prevalent in the tests for all lubrication and cooling conditions. Therefore, it is possible to conclude that the application of graphite in the turning of SAE 8640 steel can offer greater productivity in the machining process and better finishing of the workpiece.

Keywords: Minimum Amount of Lubrication (MQL), Cemented Carbide, Roughness (Ra e Rt), Graphite, Tool Wear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos Processos de Fabricação....22
Figura 2 - Representação do processo de torneamento....23
Figura 3 - Cunha de corte da Ferramenta de Torneamento - 24
Figura 4 - Lista de materiais para ferramentas de corte....27
Figura 5 - Marcas de Avanço deixadas na superfície da peça 36
Figura 6 - Diagrama da cunha cortante 37
Figura 7 - Formação do cavaco: a) cavaco de cisalhamento ou cavaco de ruptura; b) cavaco contínuo 38
Figura 8 - Variáveis envolvidas no corte ortogonal 39
Figura 9 - Formas de cavaco resultante do processo de torneamento de metal 42
Figura 10 - Formação do cavaco em diferentes regimes de trabalho....43
Figura 11 - Sistema de lubrificação por MQL 45
Figura 12 - Análise do ciclo de vida da usinagem em Jorro x usinagem MQL para transmissão específica....46
Figura 13 - Direções possíveis de aplicação do fluido de corte....49
Figura 14 - Representação da estrutura de uma molécula de grafite....54
Figura 15 - Fluxograma da metodologia adotada....55
Figura 16 - Etapas de execução ensaio de Dureza Rockwell....57
Figura 17 - Representação transversal do corpo de prova utilizado nos ensaios de Dureza Rockwell C e endentações....57
Figura 18 - Dureza HRC do aço SAE 8640 nas quatro regiões de medição distanciadas entre si 90° 58
Figura 19 - (a) Amostra do corpo de prova embutido em baquelite - Aço 8640, (b) Amostra base (grãos de ferrita α - mais claros e perlita – mais escuros), ampliação de 100x.....59
Figura 20 - Torno CNC ROMI CENTUR 30D 60
Figura 21 - Geometria da Ferramenta de corte....60
Figura 22 - Suporte de Ferramenta de corte 61
Figura 23 - Conjunto MQL....62
Figura 24 - Conjunto MQL....63
Figura 25 - Posicionamento dos Bicos Nebulizadores ângulo de 45° e 90°....64
Figura 26 - Efeito guarda-chuvas durante o torneamento do aço SAE 8640 64
Figura 27 - Área de simulação do torneamento - Software CNC2D....68
Figura 28 - Digital Usb Zoom 1000x Hd Câmera 2.0 Mp e mesa de iluminação....68
Figura 29 - Posições de avaliação do desgaste da ferramenta de corte....69

Figura 30 - Parâmetro de Rugosidade Ra em Função da Velocidade de corte nas condições de lubri-refrigeração (Seco, MQL, MQL + Grafite), nas condições de corte de (f = 0,01 e 0,06mm/rot e ap 0,5mm) 71
Figura 31 - Parâmetro de Rugosidade Rt em Função da Velocidade de corte nas condições de lubri-refrigeração (Seco, MQL, MQL + Grafite), nas condições de corte de (f = 0,01 e 0,06mm/rot e ap 0,5mm) 72
Figura 32 - Evolução do desgaste de Flanco (Vb) ao longo da vida da ferramenta de corte com Vc de 360 m/min, f de 0,06 mm/rot e ap de 0,5 mm 74
Figura 33 - Evolução da rugosidade Ra ao longo da vida da ferramenta de corte com Vc de de 360 m/min, f de 0,06 mm/rot e ap de 0,5 mm 75
Figura 34 - Coloração dos cavacos obtidos nos testes de Rugosidade: (a) azul (b) marrom 80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Efeitos elementos liga na ferramenta de corte Metal Duro 27
Tabela 2 - Classe das ferramentas de metal duro 29
Tabela 3 - Tipos de desgastes em ferramentas de torneamento 32
Tabela 4 - Tipos de irregularidades de superfícies usinada 34
Tabela 5 - Parâmetros de rugosidade 35
Tabela 6 - Composição Química do Aço SAE 8640 44
Tabela 7 - Pesquisas utilizando MQL no processo de torneamento 48
Tabela 8 - Características dos tipos de fluidos de corte utilizados nas indústrias 50
Tabela 9 - Composição do aço SAE 8640 conforme certificado da empresa fornecedora 56
Tabela 10 - Parâmetros da Ferramenta de corte recomendado pelo fabricante 60
Tabela 11 - Informações Técnica do Suporte da Ferramenta de corte 61
Tabela 12 - Equipamentos, máquinas e Ferramentas utilizadas nos ensaios 66
Tabela 13 - Parâmetros experimentais 66
Tabela 14 - Planejamento dos experimentos para medição de rugosidade 67
Tabela 15 - Planejamento dos experimentos para desgaste da Ferramenta de corte 67
Tabela 16 - Classes de Rugosidade 73
Tabela 17 - Monitoramento da evolução do desgaste da ferramenta de corte nas três condições de lubri-refrigeração (SECO, MQL, MQL + Grafite) 76
Tabela 18 - Influência da Velocidade de corte e do tipo de lubri-refrigeração para o avanço de 0,01 mm/rot sobre a formação do cacavo 77
Tabela 19 - Influência da Velocidade de corte e do tipo de lubri-refrigeração para o avanço de 0,06 mm/rot sob a formação do cavaco 78
Tabela 20 - Classificação da forma do cavaco segundo a Norma ISO 3685 (1993), do aço SAE 8640, no avanço de 0,01 mm/rot 79
Tabela 21 - Classificação da forma do cavaco segundo Norma ISO 3685 (1993), do aço SAE 8640 no avanço de 0,06 mm/rot 79
Tabela 22 - Variação do grau de recalque nas três condições de Lubri-refrigeração no avanço de 0,01 mm/rot e 0,06 mm/rot 81

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURA

°C - Grau Celsius;

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas;

A_γ - Superfície de Saída;

AISI - *American Iron and Steel Institute;*

ap - Profundidade de Corte;

APC - Aresta Postiça de Corte;

A_α - Superfície de Folga;

CNC - Comando Numérico Computadorizado;

Co - Cobalto;

Cr - Cromo;

Cut-off - Comprimento da Amostra;

CVD - *Chenmical Vapour Desposition (*Deposição Química de Vapor);

f - Avanço;

H - Materiais Endurecidos (Classe de Ferramentas);

h - Espessura de corte (mm);

h' – Espessura do cavaco;

HRC - Dureza Rockwell C;

ISO - *International Organization for Standardization;*

K - Ferro Fundido (Classe de Ferramentas);

KT - Profundidade de cratera;

M - Aço inoxidável (Classe de Ferramentas);

Mo - Molibdênio;

MoS2 - Bissulfeto de Molibdênio;

MQL - Mínima Quantidade de Lubrificação;

N - Não Ferroso (Classe de Ferramentas);

NbC - Carbeto de Nióbio;

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora;

Ni - Níquel;

P - Aço (Classe de Ferramenta);

PVD - *Physical Vapor Deposition (*Deposição Física de Vapor);

PCD – *Polycriytaline Diamond (*Policristalino de Diamante);

Ra - Desvio Aritmético Médio;

Rc - Grau de recalque;

Rq - Desvio Métrico quadrático;

Rt - Altura do Perfil;

Rz - Altura Máxima do Perfil;

S - Ligas Resistentes Temperatura (Classe de Ferramentas);

s - Aresta Principal de Corte;

SAE - *Society of Automotive Engineers;*

SENAI - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial;

TaC - Carbeto de Tântalo;

Tic - Carboneto de Titânio;

VB_B - Desgaste de Flanco médio;

$VB_{MÁX}$ - Desgaste de Flanco máximo;

VB_N - Desgaste de entalhe de flanco principal;

Vc - Velocidade de Corte;

WC - Carboneto de Tungstênio;

Xr - Ângulo de posição;

β_0 - Ângulo de cunha;

Ø - Diâmetro;

γ_0 - Ângulo de saída.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I 18
INTRODUÇÃO 18
1.1. Objetivos 19
1.2. Justificativa 19
CAPÍTULO II 21
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 21
2.1. Usinagem 21
2.2. Ferramenta de corte 24
2.2.1. Materiais de Ferramenta de corte 25
2.2.2. Desgaste da Ferramenta de corte 29
2.3. Acabamento Superficial 32
2.4. Mecanismos de Formação do Cavaco 36
2.5. Aço SAE 8640 44
2.6. Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) 44
2.6.1. Fluido de corte 49
2.6.2. Lubrificante Sólido 51
2.6.2.1. Grafite 53
CAPÍTULO III 55
METODOLOGIA 55
3.1. Caracterização do Material 55
3.1.1. Ensaios de Dureza 56
3.1.2. Análise Micrográfica 58
3.2. Máquinas e Equipamentos 59
3.2.1. Torno CNC 59
3.2.2. Ferramenta de Corte 60
3.2.3. Sistema de Lubrificação MQL 62
3.2.4. Rugosímetro 64
3.3. Ensaios de Usinagem 65
3.3.1. Análise de desgaste da ferramenta de corte 68
3.3.2. Características do Cavaco 69
CAPÍTULO IV 71
RESULTADOS E DISCUSSÕES 71
4.1. Rugosidade 71
4.2. Desgaste da ferramenta de corte 74
4.3. Características do cavaco 76
4.3.1. Grau de recalque dos cavacos 80

CAPÍTULO V 82
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 82
5.1. Conclusões 82
5.2. Sugestões de trabalhos futuros 83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 84
APÊNDICE A 91

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

No processamento dos metais, mais precisamente no processo de torneamento, o corte do metal resulta uma geração de calor na interface ferramenta-peça devido a deformação plástica do material usinado e ao atrito com a ferramenta de corte. Na maioria das vezes esse calor pode afetar a qualidade da superfície da peça de trabalho e contribuir no aumento do desgaste da ferramenta de corte (TIWARI *et al.* 2020).

Muitos estudos de torneamento têm se concentrado na compreensão dos papéis dos parâmetros de corte, das ferramentas de corte em desempenhos direcionados em diferentes aplicações de lubri-refrigeração e na otimização desses parâmetros, incluindo análise da Rugosidade da superfície, projetos experimentais e análises estatísticas, conforme apresentado por Saikaew, Phacharat e Wisitorraat (2020), a fim de obter bom acabamento superficial da peça para suas aplicações adequadas.

Nesse sentido, o uso de fluidos de corte para dissipação de calor é uma prática comum, sendo a mais abrangente em jorro, o que na maioria das vezes pode resultar em uma prática de alto custo (NOVAREZA, SULISTIYARINI e WIRADMOKI, 2018). Normalmente, o uso de lubrificante não pode ser totalmente eliminado, mas pode ser reduzido. Isso por ser feito optando por técnicas como a usinagem utilizando a Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL).

A técnica MQL é uma integração do fluido de corte e ar comprimido para formar uma névoa de refrigerante que pode melhorar a capacidade dos fluidos em reduzir o calor e atrito durante a usinagem (MISHRA, GHOSH e ARAVIDAN, 2020).

As indústrias, os centros de pesquisas e as Universidades tem desenvolvido pesquisas e processos de produção alternativos, que combinando com soluções tecnológicas visam melhores resultados de rugosidade e durabilidade das ferramentas de corte (COSTA, 2014). Conforme GGD Metals (2020), outro ponto a ser observado são os materiais utilizados, como por exemplo o aço SAE 8640, sendo este o foco dessa pesquisa, utilizado na fabricação de rolamentos, buchas, cilindros, engrenagens, eixos hidráulicos e equipamentos mecânicos, que necessitam de baixa Rugosidade da superfície da peça, e também em situações onde possa substituir o aço SAE 1045 por consequência de sua melhor capacidade de endurecimento, resistência à fadiga e à fratura, além de apresentar baixo custo.

O aço SAE 8640 é um aço-níquel-cromo-molibdênio, de médio carbono e baixa liga. Para avaliar o comportamento do aço SAE 8640 no processo de torneamento, a rugosidade da superfície usinada, o desgaste da ferramenta de corte e a características formação e tipos de cavacos, foram analisados, abordando os métodos de lubri-refrigeração à Seco, MQL puro e MQL com adição de grafite. Como parâmetros de corte, foram considerados a velocidade de corte, avanço e profundidade de corte.

1.1. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o comportamento das variáveis de corte, no processo de torneamento do aço SAE 8640, através do método MQL e MQL com adição do grafite como lubrificante sólido.

Serão abordadas as condições de lubri-refrigeração a Seco, MQL e MQL + Grafite, e para contemplar o objetivo geral, são propostos os seguintes objetivos específicos:

Avaliar a rugosidade da superfície usinada;

Avaliar o desgaste da ferramenta de corte;

Analisar a formação do cavaco (tipo, coloração e grau de recalque).

1.2. Justificativa

Devido ao grande número de variáveis possíveis de serem relacionadas à usinabilidade de um material, se faz necessário o pleno conhecimento destas, afim de otimizar o processo com baixos valores de Rugosidade e menores taxas de desgaste de ferramenta de corte. Durante levantamento bibliográfico para desenvolvimento deste trabalho, foi observado uma carência em pesquisas que avaliam a usinabilidade do aço SAE 8640, visando atender as exigências da ciência e tecnologia nas diversas áreas de aplicação quando se trata do processo de torneamento

Utilizando o método MQL no torneamento do aço SAE 8640, este trabalho se justifica por se tratar de um tema que tem se intensificado nos últimos anos, a fim de avaliar e buscar preferíveis condições de usinabilidade aos diversos aços, confrontando o grafite como lubrificante sólido. Num levantamento bibliográfico pôde-se perceber que Moura e Da Silva (2014) pesquisaram o desempenho do grafite no torneamento do TI-6AL-4V, Oliveira Junior (2013) avaliou a lubrificação sólida em meio líquido, Reddy, Nouari e Yang (2010) realizaram experimentos comparando resultados obtidos com o aço AISI 4340 e Rao e Krishna (2008) investigou o efeito do lubrificante sólido no torneamento do aço ABNT 1040.

A usinagem assistida com lubrificantes sólidos é uma alternativa para evitar a utilização de fluidos de corte, tendo demonstrado ser uma solução positiva em substituição aos fluidos de convencionais, como apresentado por Machado *et al.* (2015).

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar a revisão da literatura sobre o processo de usinagem, relacionando ao processo de torneamento do aço SAE 8640. Trata-se de apresentar os efeitos dos diversos parâmetros de usinagem que foram abordados no desenvolvimento dessa pesquisa, bem como os assuntos que diz a respeito ao Processo de torneamento utilizado a Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) e Lubrificante Sólido.

2.1. Usinagem

Normalmente durante a fabricação de peças e conjuntos mecânicos como por exemplo, eixos, engrenagens, rolamentos, é necessário o uso de processos de usinagem em determinadas etapas do processo produtivo. Normalmente é empregada onde exige um alto grau de precisão dimensional e acabamento da superfície usinada.

Conforme definido por Ferraresi (2006), a usinagem pode ser entendida como um processo que confere à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens; e durante esse processo é produzido o cavaco. Na Figura 1, Machado e Da Silva (2004) apresentam uma classificação dos processos de fabricação, com destaque para a usinagem. A usinagem por sua vez pode ser dividida em convencional e não convencional, sendo que o torneamento pertence ao primeiro grupo.

Conforme Trent e Wright (2000), o processo de torneamento é a operação de usinagem mais comumente empregada em trabalhos de corte de metal. O torneamento é o processo de usinagem usado para fabricar peças de revolução cilíndricas, no qual a ferramenta desenvolve um deslocamento linear, enquanto a peça exerce um movimento rotacional. Normalmente executada por uma máquina-ferramenta chamada “torno”.

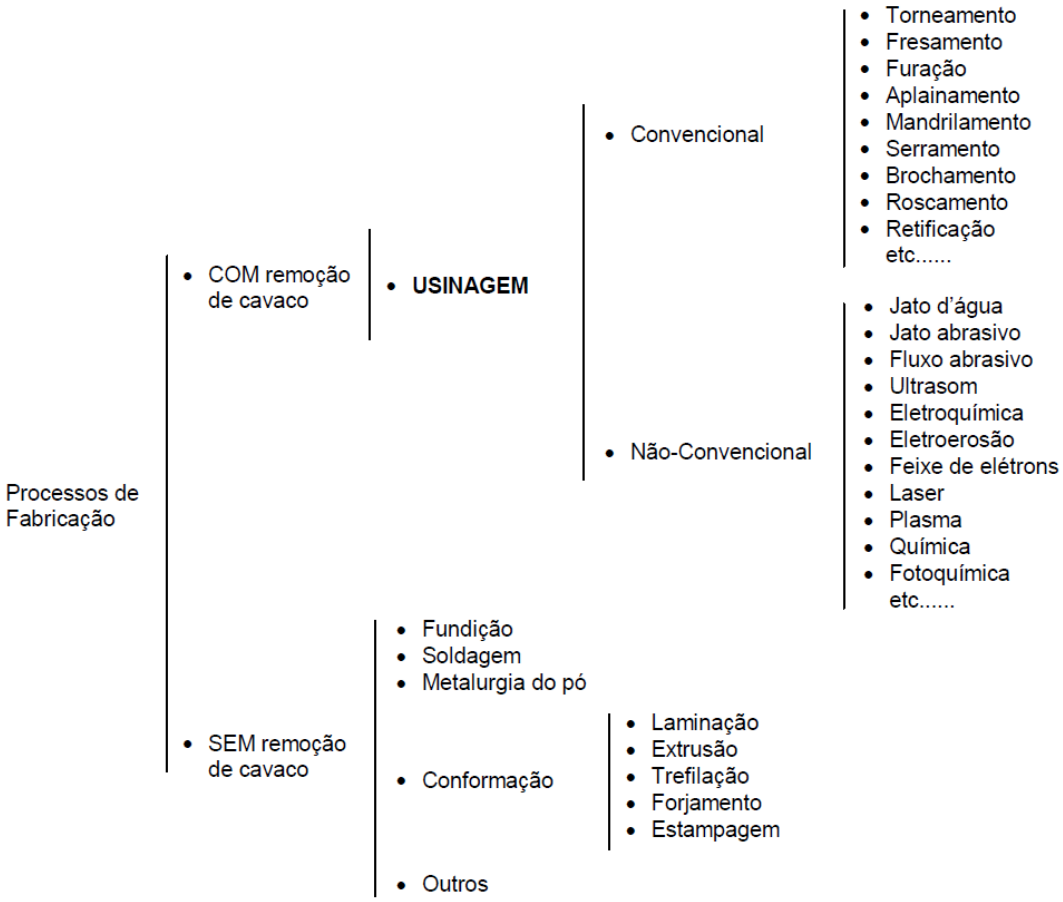


Figura 1 - Classificação dos Processos de Fabricação
Fonte: (MACHADO e Da Silva p.4 2004).

Além disso, Trent e Wright (2000) define o processo de torneamento como uma operação onde o material de trabalho é mantido no mandril de um torno e girado. A ferramenta é mantida rigidamente em uma porta ferramenta e movida a uma taxa constante ao longo do eixo da barra, cortando uma camada de metal para formar um cilindro ou uma superfície de perfil mais complexo. Isto é mostrado esquematicamente na Figura 2, sendo abordadas todas as variáveis que compõem o processo de torneamento, os quais serão apresentados e discutidos nos próximos tópicos deste capítulo.

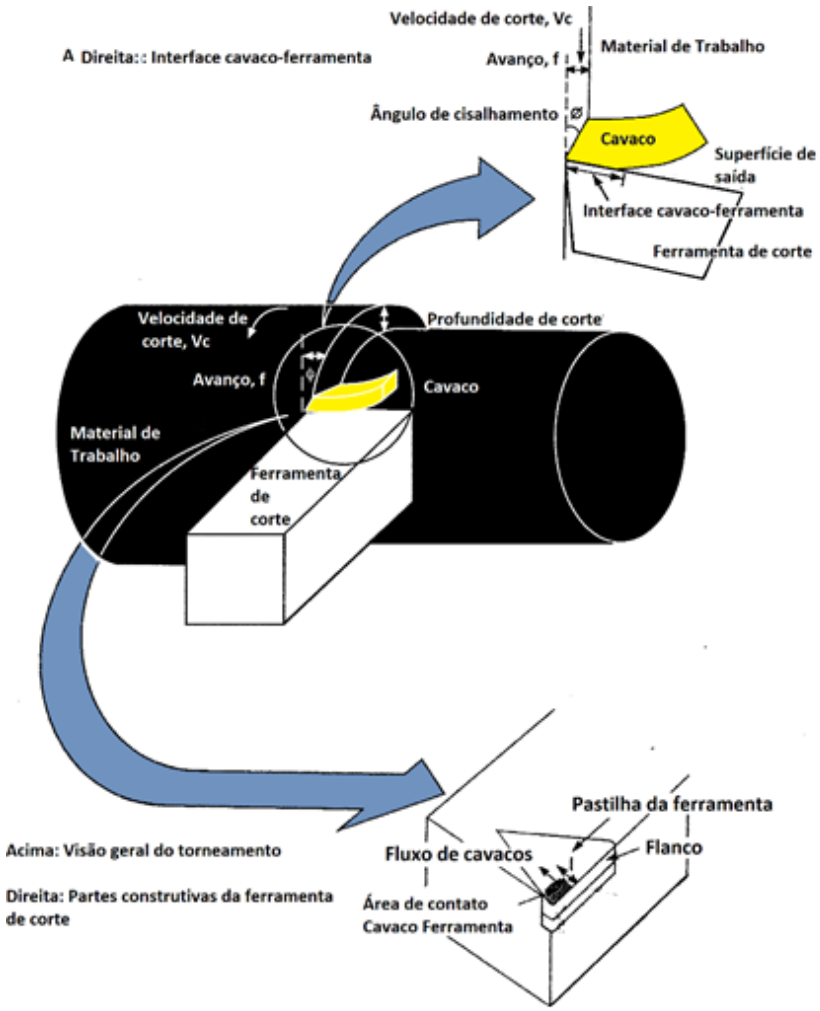


Figura 2 - Representação do processo de torneamento
Fonte: Adaptado: (TRENT e WRIGHT, 2000).

Existem, no torneamento, dois fatores cuja influência (independente do material da peça e da ferramenta) determina o resultado final do processo: os parâmetros de corte e a geometria da aresta de corte.

Para Trent e Wright (2000), velocidade de corte (V_c), é a velocidade linear relativa entre a ponta da ferramenta e a peça em rotação, a qual é expressa normalmente em m/min. O avanço (f) é a distância percorrida pela ferramenta por revolução da peça, e a profundidade de corte (a_p) é a espessura ou profundidade de penetração da ferramenta medida perpendiculamente ao plano de trabalho.

Segundo Machado *et al.,* (2015), basicamente duas operações podem ser executadas, sendo o “desbaste” e o “acabamento”. Em operação de desbaste geralmente são utilizadas velocidades de corte mais baixas e maiores avanços e profundidade de corte resultando em maior taxa de remoção de material. Na operação de acabamento, são utilizados maiores

velocidades de corte, com menores avanços e profundidades de corte resultando em menor taxa de remoção de material.

2.2. Ferramenta de corte

Diferentes formatos e materiais podem ser usinados conferindo forma e função a uma peça. Cada material tem suas características exclusivas que são influenciadas pelos elementos de liga, tratamento térmico, dureza e outros. A combinação desses elementos instiga significativamente a escolha da geometria da ferramenta de corte, a classe e os dados de corte.

O desempenho da usinagem está diretamente ligado à geometria da ferramenta de corte, assim, se a geometria da ferramenta escolhida para executar um determinado trabalho não for adequada, pode não haver êxito na operação (MACHADO e DA SILVA, 2004). Além disso, as ferramentas de usinagem apresentam algumas partes construtivas, sendo elas: ponta de corte, cunha de corte, superfície de saída e superfície principal de folga (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2001), conforme apresentado na Figura 3. Entre elas, a mais importante é a cunha de corte, local onde se origina o cavaco, que se forma devido ao movimento relativo entre a peça e a ferramenta (FERRARESI, 2006).

Conforme a NBR-6163 (1990), a geometria da ferramenta influencia na Formação do Cavaco, na Saída do Cavaco, na Força de corte, no Desgaste da Ferramenta e na Qualidade final do trabalho. A Figura 3, a partir de Diniz, Marcondes e Coppini (2001), ilustram todas as partes construtivas da ferramenta de corte:

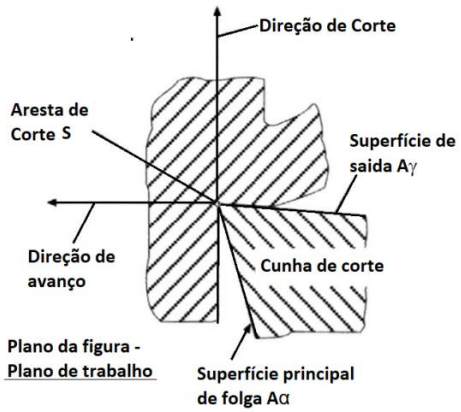


Figura 3 - Cunha de corte da Ferramenta de Torneamento -
Fonte: (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2001, p.36).

A geometria da ferramenta se expande para:

- Cunha de corte – é a cunha da ferramenta, formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga.

- Superfície de saída (Aγ) – é a superfície da cunha de corte sobre a qual o cavaco é formado e escoa durante sua saída da região do trabalho.
- Superfície principal de folga (Aα) – é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contem sua aresta principal de corte e que defronta com a superfície em usinagem principal.
- Aresta principal de corte (S) – é a aresta da cunha de corte formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga principal.
- Ponta de corte – é a parte da cunha de corte onde se encontram as arestas principal e secundária de corte. A ponta de corte pode ser a intersecção das arestas ou a concordância das duas arestas através de um arredondamento ou o encontro de duas arestas através de um chanfro.

2.2.1. Materiais de Ferramenta de corte

O conhecimento sobre o material de cada ferramenta de corte e seu desempenho é importante no momento da seleção para seu uso no processo de usinagem. As considerações incluem o material da peça a ser usinada, o tipo e formato da peça, as condições de usinagem e o nível do acabamento superficial necessário para cada operação.

De acordo com Amorim (2002), o maior desafio no desenvolvimento de ferramentas de corte está no balanço entre a dureza e a tenacidade do material, visto que são duas propriedades de extrema importância para o desempenho da ferramenta de corte e que não são facilmente encontradas em um mesmo material. Os materiais da ferramenta de corte têm diferentes combinações de dureza, tenacidade e resistência ao desgaste e estão divididas em várias classes com propriedades específicas. Conforme Sandvik (2019), o material de uma ferramenta de corte adequada para sua aplicação deve ser:

- Duro para resistir ao desgaste de flanco e deformação;
- Tenaz para resistir à quebra;
- Não reativo com o material da peça;
- Quimicamente estável para resistir à oxidação e difusão;
- Resistente a mudanças térmicas repentinas.

De acordo com Moura e Da Silva (2014), o segundo grande impulso na área dos materiais de ferramenta de corte aconteceu com o aparecimento do metal duro. O primeiro foi com o surgimento do aços-rápidos meados do ano de 1927. Com os metais duros, novamente, as velocidades de corte puderam ser aumentadas em praticamente uma ordem de grandeza (de 35 m/min com os aços-rápidos, para 250~300 m/min com os metais duros).

As ferramentas de metal duro produzidas inicialmente, contendo apenas Carboneto de Tungstênio (WC) e Cobalto metálico (Co), obtiveram resultados excelentes na usinagem de ferro fundido cinzento e materiais não ferrosos. Porém, na usinagem de aços, esta ferramenta apresentou baixa resistência à formação de cratera, ocorrendo devido ao forte atrito observado na superfície de saída. Eram geradas altas temperaturas e ainda, devido à afinidade entre os materiais da ferramenta e peça, ocasionava a difusão de materiais do cavaco para a ferramenta e vice-versa (MACHADO *et al.,* 2015).

O metal duro é um material da metalurgia do pó, composto de partículas de WC e um ligante rico em Co. A quantidade e composição do ligante rico em Co controlam a tenacidade e a resistência da classe quanto a deformação plástica. Os metais duros para aplicações de usinagem representam mais de 80% do WC, caracterizando a fase dura. Os carbonitretos cúbicos adicionais são outros componentes importantes, especialmente em classes com gradiente sintetizado. O corpo do metal duro é conformado através de prensagem do pó ou técnicas de molde por injeção, dentro de um corpo que é sinterizado até densidade total (SANDVIK, 2019).

Dessa forma, os principais elementos das ferramentas de metal duro, conforme apresentado por Gama (2014) e Sandvik (2019), apresentam as seguintes características:

- Co: geralmente usado como aglomerante para as partículas de carbonetos. Sua adição causa a queda da dureza a quente.
- WC – é solúvel no cobalto, o que gera ligações internas de alta resistência. Possui grande resistência ao desgaste, mas sua utilização na usinagem de aço é limitada devido à tendência de difusão de carbono e de dissolução no cobalto e no ferro.
- TiC – aumenta a resistência à difusão dos metais duros. Em contrapartida, causa a queda da resistência das ligações internas, diminuindo a resistência da ferramenta, fragilizando o material. Metais duros com altos teores de TiC são usados na usinagem de aços com altas velocidades de corte.
- Carbeto de Tântalo (TaC) – em pequenas porcentagens, restringe o tamanho de grão, aumentando a tenacidade e a resistência do metal duro.
- Carbeto de Nióbio (NbC) – possui efeito semelhante ao TaC. Ambos os carbetos ocorrem no metal duro como cristais mistos Ta – (Nb) – C.

A Tabela 1 indica os principais efeitos de alguns elementos de liga sobre o metal duro:

Elemento	Quantidade Relativa	Efeito Sobre			
		Resistência ao desgaste	Dureza a quente	Resistência à formação de cratera	Resistência Mecânica
Co	Pequena	+++	+	++	---
	Grande	---	++	--	+++
WC	Pequena	---	-	--	+++
	Grande	+++	+	++	---
TaC e NbC	Pequena	++	++	++	++
	Grande	--	++	++	--
TiC	Pequena	++	++	++	--
	Grande	++	++	+++	--
Grão fino	Pequena	++	+-	++	---
	Grande	++	+-	++	---
Grão Grosso	Pequena	--	+-	--	++
	Grande	---	+-	---	+++

- Diminui; -- Diminui Ligeiramente; --- Diminui Muito; + Aumenta; ++ Aumenta ligeiramente; +++Aumenta muito; +- pequeno efeito

Tabela 1- Efeitos elementos liga na ferramenta de corte Metal Duro
Fonte: Adaptado de (SANDVIK, 2019).

A Figura 4 apresenta os principais materiais para ferramentas existentes no mercado. Como se observa, estes materiais estão em ordem crescente de dureza e decrescente de tenacidade. Esta ordem também representa o avanço tecnológico dos materiais (MACHADO *et al.,* 2015):

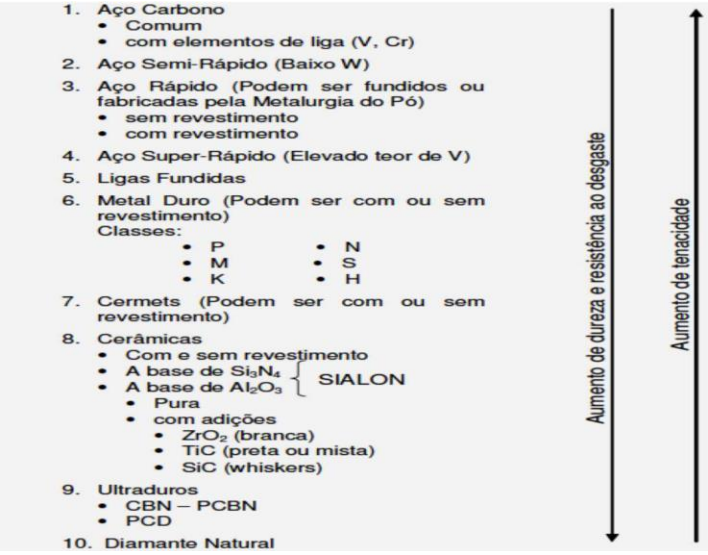


Figura 4 - Lista de materiais para ferramentas de corte
Fonte: (MACHADO *et al.,* p.12 2015)

Uma ferramenta de corte de metal duro pode ser utilizada no processo de torneamento com revestimento ou sem revestimento. Segundo Moura (2017), o revestimento de ferramentas de metal duro ganhou uma importância muito grande, pois o mesmo pode garantir um desempenho bem superior à ferramenta sem revestimento na usinagem de materiais ferrosos, sendo estes os materiais mais utilizados na indústria mecânica.

O metal duro com revestimento representa 80 - 90% de todas as pastilhas das ferramentas de corte. Seu desempenho como material de ferramenta de corte se deve à sua exclusiva combinação de resistência ao desgaste e tenacidade, além de sua habilidade para conformidade com formatos complexos. O metal duro combina com cobertura e juntos eles formam uma classe personalizada para sua aplicação. As classes de metal duro com cobertura são a primeira escolha para uma variedade de ferramentas e aplicações e os dois tipos de revestimentos, como apresentado pelo fabricante Sandvik, são CVD e PVD.

De acordo com Sandvik (2019), CVD significa deposição química de vapor. A cobertura CVD é gerada por reações químicas em temperaturas de 700 - 1050 °C e sua característica está relacionada a alta resistência ao desgaste e alta adesão ao metal duro. As classes com cobertura CVD são a primeira escolha em uma ampla variedade de aplicações em que a resistência ao desgaste é importante. Tais aplicações são encontradas em torneamento geral e mandrilamento de aços, com resistência a craterização oferecida pelas coberturas CVD espessas.

Ainda de acordo com Sandvik (2019), as coberturas por Deposição Física de Vapor (PVD) são formadas em temperaturas relativamente baixas (400 - 600°C) e o processo envolve a evaporação de um metal que reage com nitrogênio para formar uma cobertura de nitreto, mantendo-se na superfície da ferramenta de corte. As coberturas PVD agregam resistência ao desgaste a uma classe devido à sua dureza. Além disso, as tensões de compressão das coberturas também agregam tenacidade à aresta e resistência contra trincas térmicas. As classes com cobertura PVD são recomendadas para arestas de corte tenazes e afiadas, bem como para materiais com tendência a abrasão.

A “*International Organization for Standardization*”, na ISO 513 (2013) determina a divisão das ferramentas de metal duro em classes. São seis classes denominadas pelas letras P, M, K, N, S e H em função de suas aplicações básicas. As características dessas classes são apresentadas na Tabela 2.

Classe	Característica
P	Compreendem os metais duros com elevado teor de TiC e TaC, o que confere elevada dureza a quente e resistência ao desgaste. São aplicados na usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos contínuos (ou longos) e dúcteis. As ferramentas desta classe são empregadas na usinagem de aços não ligados; aços de alta liga; aços fundidos e ferros maleáveis de cavacos longos. Por formarem uma grande área de atrito entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta desenvolvem temperaturas elevadas e grande desgaste de cratera. Não são indicadas para aços inoxidáveis com estrutura austenítica.
M	Neste grupo encontram-se os metais duros com propriedades intermediárias, destinados a ferramentas que tenham múltiplas aplicações. São aplicados na usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam tanto cavacos contínuos como cavacos curtos. São empregados na usinagem de aços inoxidáveis austeníticos, ferríticos e martensíticos; aços fundidos; aços-manganês; ferros fundidos e ferros fundidos maleáveis.
K	Este grupo foi o primeiro a ser desenvolvido, e é composto principalmente por carboneto de tungstênio aglomerado por cobalto. Como este metal duro não é resistente ao desgaste de cratera, são aplicados na usinagem de metais frágeis e ligas ferrosas que apresentam cavacos curtos e ainda em materiais não-metálicos.
N	Os metais duros e PCD, deste grupo, são aplicados em vários tipos de alumínio e outros metais não-ferrosos; plásticos e madeira.
S	Neste grupo se encontram os metais duros e cerâmicas (Al2O3 + SiC), indicados para a usinagem de ligas resistentes ao calor; ligas especiais à base de níquel ou cobalto; titânio e suas ligas; aços de alta liga e demais materiais de difícil remoção de cavacos.
H	Metais duros e cerâmicas (Al2O3 + TiC e PCBN), para aplicações que incluem os materiais endurecidos como aço temperado; ferro fundido temperado; ferro fundido coquilhado e aço manganês.

Tabela 2 - Classe das ferramentas de metal duro
Fonte: ISO 513 (2013).

2.2.2. Desgaste da Ferramenta de corte

Segundo Ferraresi (2006), a vida da ferramenta é o tempo em que a mesma trabalha efetivamente, sem perder o corte ou até que se atinja um critério de fim de vida previamente estabelecido. Através do controle de fatores como qualidade da peça, ruído, força, vibração é possível saber quando a ferramenta deve ser substituída e estabelecer o limite econômico de uma ferramenta, utilizando-a ao máximo e prolongando sua vida útil.

É importante ressaltar que o desgaste da ferramenta atua diretamente na temperatura da interface ferramenta-peça, na qualidade da superfície usinada, na precisão dimensional e, finalmente no custo do produto final. Segundo a Norma ISO 3685 (1993), a vida da ferramenta pode ser expressa por fatores como:

- Número de peças produzidas;
- Percurso de avanço (mm);
- Percurso efetivo de corte (km);
- Tempo de trabalho (min);
- Volume de material removido;
- Velocidade de corte para determinado tempo de vida.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001), avaliar o desgaste de uma ferramenta de corte envolve a consideração de variáveis tais como do material, geometria e revestimento da ferramenta, características do material da peça, condições de corte, o tipo e o método de aplicação do fluido de corte, as características dinâmicas da ferramenta e da máquina. Nos desgastes ocorridos em ferramentas de corte, as propriedades do material de corte são de fundamental importância no que diz respeito à vida e ao desgaste da ferramenta, assim como os parâmetros adotados para o processo de usinagem.

O desgaste da ferramenta de corte pode ser avaliado através de métodos diretos e indiretos. No método direto, mede-se a geometria da ferramenta usando dispositivos óticos. Já o método indireto utiliza a aquisição de valores medidos de variáveis do processo como: a força de corte, temperatura, vibração, emissão acústica, perda de qualidade da superfície e da relação entre o desgaste da ferramenta e esses parâmetros no processo.

Os desgastes da ferramenta de corte de aço-rápido, metal duro e cerâmica são qualificados pela norma ISO 3585 (1998), utilizando os seguintes parâmetros:

- Desgaste de Flanco médio (VB_B) = 0,30mm;
- Desgaste de Flanco máximo ($VB_{máx}$) = 0,60mm;
- Profundidade de cratera (KT) = 0,60 + 0,3 F_c;
- Desgaste de entalhe, (VB_N) = 1,00mm;
- Falha catastrófica.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001), existem vários mecanismos de desgaste, resultado de processos físicos e químicos durante a operação de usinagem. Os desgastes das ferramentas podem ser causados por vários fenômenos, sendo eles: aresta postiça de corte, difusão, aderência, abrasão mecânica e oxidação.

Além dos desgastes, podem ocorrer avarias em uma ferramenta de usinagem devido a: deformação plástica da aresta de corte, martelamento dos cavacos, lascamento, trincas e quebras. A deformação plástica da aresta de corte é causada pela elevada pressão aplicada à ponta da ferramenta, aliada à alta temperatura, o que pode causar a deformação da aresta. O martelamento ocorre quando a parte da aresta de corte que não está em uso é danificada pelo martelamento de cavacos e a provável causa é o desvio dos cavacos contra a aresta de corte. O lascamento consiste na retirada, durante o processo de corte, de pequenas partículas da ferramenta (GAMA, 2014).

A evolução do desgaste pode levar à quebra da ferramenta, embora isso possa acontecer devido a outros fatores como: ferramenta muito dura, carga excessiva sobre a ferramenta, corte interrompido etc (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2001). As trincas, por sua vez, são causadas pela variação da temperatura e/ou pela variação dos esforços mecânicos, como acontecem nos cortes interrompidos (GAMA, 2014).

Conforme apresentado por Sandvik (2019), para compreender as vantagens e as limitações de cada material, é importante ter o conhecimento sobre os diferentes mecanismos de desgaste aos quais as ferramentas de corte estão sujeitas. Para obter dados de corte otimizado, a melhor qualidade possível da peça e melhor vida útil da ferramenta, é importante sempre verificar a aresta de corte após a usinagem.

A Tabela 3, baseada em Trent e Wright (2000), ilustra os principais tipos de desgaste de ferramentas de corte bem como a descrição das causas.

Tipo	Causa	Representação
Desgaste de Flanco - Abrasivo	O tipo mais comum de desgaste e preferível porque oferece vida útil da ferramenta previsível e estável. Ocorre devido à abrasão causada por elementos duros no material da peça	
Caterização - Química	É localizada na face de ataque da pastilha e ocorre devido a uma reação química entre o material da peça e a ferramenta de corte e pode ser ampliada pela velocidade de corte. A caterização excessiva enfraquece a aresta de corte e pode causar a quebra.	
Aresta postiça de corte APC – Adesão	Este tipo de desgaste da ferramenta é causado pela ligação mecânica em baixas temperaturas. Ele é mais comum em usinagem de materiais dúcteis como aços com baixo teor de carbono, aços inoxidáveis e alumínio. Ocorre em baixas Vc.	
Desgaste tipo entalhe – Adesão	O desgaste da pastilha é caracterizado pelo excesso de danos localizado na face de ataque e no flanco da pastilha na profundidade da linha de corte. É causado pela adesão (soldagem dos cavacos por pressão) e deformação na superfície endurecida.	
Deformação Plástica – Térmica	Acontece quando o material da ferramenta de corte é dúctil e a temperatura de corte é muito alta para uma determinada classe. Em geral, classes mais duras e coberturas mais espessas melhoram a resistência ao desgaste por deformação plástica.	
Trincas Térmicas	Quando a temperatura da aresta de corte muda rapidamente de quente para frio, podem surgir diversas trincas perpendiculares à aresta de corte. Estão relacionadas aos cortes interrompidos.	
Lascamento / quebra da aresta - Mecânico	Resultado de uma sobrecarga por tensões de tração mecânicas. Essas tensões podem ser resultado de diversas razões como martelamento de cavacos, profundidade de corte ou avanço muito altos, inclusões de areia no material da peça, APC, vibração ou desgaste excessivo na pastilha.	

Tabela 3 - Tipos de desgastes em ferramentas de torneamento
Fonte: Adaptado de Trent e Wright (2000)

2.3. Acabamento Superficial

Em projetos mecânicos, o acabamento da superfície da peça é representado pela rugosidade, que consiste em um conjunto de irregularidades, com espaços regulares ou irregulares, que tendem a formar um padrão de textura característicos em uma superfície.

Essas irregularidades estão presentes em todas as superfícies reais, por mais perfeitas que estas sejam, e muitas das vezes constituem uma herança dos parâmetros e condições do processo de fabricação, sendo ele torneamento, fresamento, furação ou outro.

Como apresentado por Freitas *et al.* (2016a) e Acayaba e Escalona (2015), a rugosidade de componentes usinados pode ser essencial para garantir o seu perfeito funcionamento, dessa forma recebe grande atenção de pesquisadores. Valores de rugosidade fora de padrões especificados pela engenharia, sejam valores maiores ou menores de rugosidade, podem resultar em mau funcionamento durante o trabalho de determinada peça ou equipamento.

A integridade da superfície de uma peça é o termo utilizado por Almeida (2010), para representar as condições e a qualidade de superfícies usinadas, e resulta da combinação do processo de deformação plástica, propagação de trincas, reações químicas e forma de energia empregada para a remoção do cavaco.

O levantamento das irregularidades da superfície pode ser realizado através de um apalpador que percorre todas as irregularidades e envia um sinal para um transdutor que transforma o sinal mecânico em eletrônico. O sinal transformado é manipulado segundo um algoritmo que, ao ser quantificado, atribui-se ao mesmo um valor equivalente a uma unidade de comprimento, geralmente na ordem de mícrons (*μm)*. Uma vez conhecido este valor, ele é colocado de forma gráfica e/ou manuseado estatisticamente para gerar todos os parâmetros de controle de uma superfície (ALMEIDA, 2010). Nesse contexto, Machado e Da Silva (2004), Almeida (2010) e Moura (2017) apontam que as irregularidades de uma superfície podem ser classificadas como: Rugosidade Superficial, Ondulações, Marcas de Avanço e Falhas, conforme apresentado na Tabela 4.

Irregularidades	Características
Rugosidade Superficial	São finas irregularidades resultantes de ações inerente ao processo de corte, ou seja, marcas de avanço. A altura ou profundidade média dessas irregularidades são medidas em um pequeno comprimento chamado "*cut-off*" (comprimento da amostra). Pode-se dizer que a rugosidade e ondulações constituem a textura de uma superfície, apesar de apresentarem outras caracterizações.
Ondulações	Consistem de irregularidades superficiais, cujos espaçamentos são maiores em aproximadamente 1mm que o "*cut-off*", causado por deflexões e vibrações da ferramenta ou da peça.
Marcas de Avanço	Denotam as direções das irregularidades superficiais, dependendo da orientação da peça e da ferramenta de corte na máquina, ou do movimento relativo da peça e ferramenta.
Falhas	São interrupções na topografia típica da superfície de um componente, sendo inesperadas e indesejáveis, causadas por defeitos tais como trincas, bolhas e inclusões que podem surgir durante o processo de corte.

Tabela 4 - Tipos de irregularidades de superfícies usinada
Fonte: Adaptado de (MACHADO e DA SILVA, 2004)

Para Costa (2014), a rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou de erros microgeométricos resultantes da ação inerente ao processo de corte, como: marcas de avanço, aresta postiça de corte e desgaste de ferramenta.

Além disso, Machado, *et al.* (2015) complementa que a rugosidade de uma peça usinada é também o reflexo dos fatores como rigidez da máquina-ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e material da ferramenta e operação de usinagem.

A tabela 5 apresenta os principais parâmetros de rugosidade de acordo com a norma NBR ISO 4287 (ABNT,2002).

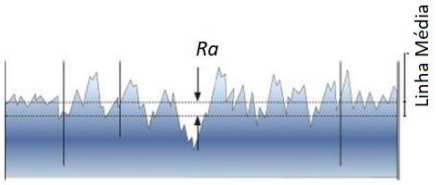
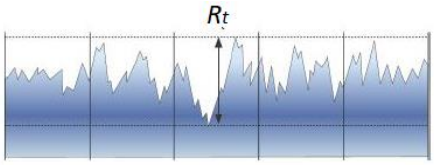
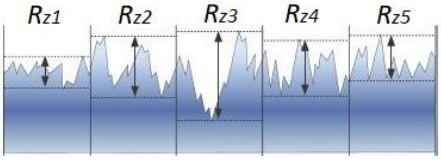
Tipo	Representação	Definição
Desvio aritmético médio	R_a 	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem. Um valor médio de todos os desvios de uma linha reta dentro do comprimento de avaliação, independente da direção vertical. Isso significa que é impossível usar um valor R_a para determinar se os desvios são picos ou vales. R_a não é significativamente afetado por desvios individuais, ou seja, há um risco de faltar um pico grande ou um arranhão.
Altura do perfil	R_t 	A altura total do perfil é a soma da altura do pico mais alto do perfil e a maior profundidade do vale do perfil dentro no comprimento de avaliação (que normalmente abrange os cinco comprimentos de referência).
Altura máxima do perfil	R_z 	A altura máxima do perfil é o valor médio das alturas individuais do perfil R_z, obtido entre a maior altura de pico e o maior vale dentro do comprimento de avaliação. Geralmente, há cinco comprimentos de referência.

Tabela 5 - Parâmetros de rugosidade
Fonte: Adaptado da Norma NBR ISO 4287 (ABNT, 2002).

A Figura 5 representa as marcas deixadas em uma superfície usinada, em uma operação de torneamento cilíndrico externo, utilizando uma ferramenta com raio de ponta r.

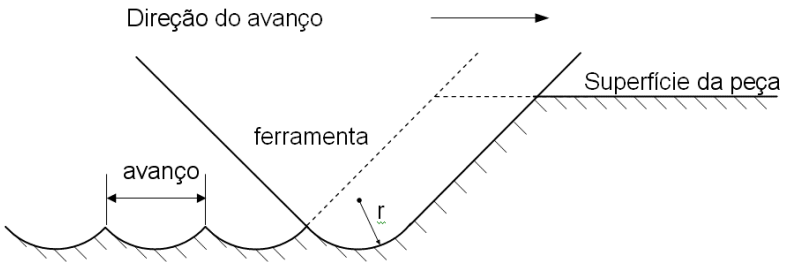


Figura 5 - Marcas de Avanço deixadas na superfície da peça
Fonte: Usinagem dos metais (MACHADO e DA SILVA, 2004).

Avaliando a velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, De Paula e Benini (2017), identificaram que a velocidade e a profundidade de corte exerceram as maiores influências nos resultados de rugosidade das superfícies usinadas. Esse cenário também se assemelha aos resultados encontrados por outros pesquisadores, como Deveras (2017), Machado e Da Silva (2004), Oliveira Junior (2013), em experimentos realizados com aço SAE 8640 e em outros materiais, onde o aumento da profundidade de corte proporciona, de maneira geral, o aumento da rugosidade superficial. Isso se justifica, porque com o aumento da profundidade de corte também são aumentadas as forças de usinagem e a possibilidade de flexões.

De acordo com Machado e Da Silva (2004), baixas velocidades de corte dão um aspecto rugoso na peça, que aliado a um alto valor de avanço, pioram ainda mais os valores de rugosidade. O aumento da profundidade e do avanço durante um processo de usinagem aumenta a força de usinagem, pois há um aumento das áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário, o que aumenta as deflexões durante o processo e piora o acabamento da peça.

Considerando que essas condições influenciem nos valores da rugosidade no processo de torneamento, vale ressaltar que os resultados demonstram uma necessidade de estudos de valores intermediários nos parâmetros de usinagem, permitindo compreender a melhor evolução da rugosidade para o aço SAE 8640.

2.4. Mecanismos de Formação do Cavaco

O estudo da formação de cavaco em ligas metálicas e não metálicas, tem sido discutido amplamente nas duas últimas décadas e com maior interesse devido aos relativos avanços da simulação numérica. Como apresentado por Machado e Da Silva (2004), durante a usinagem uma nova superfície é gerada na peça, ou pela formação de um cavaco contínuo

- quando se usina materiais dúcteis, ou pela formação de um fluxo de elementos de cavacos quebrados em pedaços - quando se usina materiais frágeis.

No processo de torneamento está presente uma gama de variáveis de complexa análise, a fim de obter melhores resultados de acabamento da superfície da peça e vida da ferramenta. Diniz, Marcondes e Coppini (2001) e Trent e Wright (2000), descrevem que a formação do cavaco influencia diversos fatores ligados a usinagem como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado na usinagem e a penetração do fluido de corte. Como apresentado por Machado e Da Silva (2004), o mecanismo de formação do cavaco é um processo cíclico composto em 4 (quatro) etapas, sendo elas:

1. Recalque (deformação plástica);
2. Deformação Plástica;
3. Ruptura;
4. Movimento sobre a superfície de saída da ferramenta.

Alguns autores como Trent e Wright (2000) e Machado e Da Silva (2004) apontaram que para o entendimento dessas quatro etapas do processo de formação do cavaco, pode ser melhor compreendida se considerado o volume de metal representado pela seção “klmn”, como abordado na Figura 6, se movendo em direção a cunha cortante.

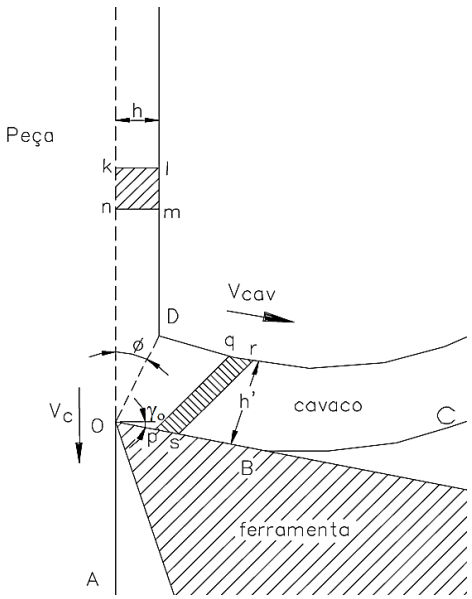


Figura 6 - Diagrama da cunha cortante
Fonte: (TRENT e WRIGHT, 2000)

Segundo Ferraresi (2000), a formação do cavaco, nas condições normais de usinagem, se processa da seguinte forma:

- Durante a usinagem, devido à penetração da ferramenta na peça, uma pequena porção de material, ainda sólida à peça, representada na Figura 6 pelo elemento “klmn”, é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta.

- O material recalcado sofre uma deformação plástica, a qual aumenta progressivamente, até que as tensões de cisalhamento se tornem suficientemente grandes, de modo a se iniciar um deslizamento entre a porção de material recalcado e a peça. Esse deslizamento, sem perda de coesão, se realiza segundo os planos de cisalhamento dos cristais da porção de material recalcada. Durante a usinagem, estes planos instantâneos irão definir certa região entre a peça e o cavaco, chamada “região de cisalhamento” ou, de forma mais simples, “plano de cisalhamento” (plano definido pela linha OD na Figura 6). Este plano é tomado quanto possível paralelo aos planos de cisalhamento dos cristais dessa região e é definido pelo ângulo de cisalhamento Φ.

- Ainda com a penetração da ferramenta em relação à peça, haverá uma ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, dependendo naturalmente da ductibilidade do material e das condições de usinagem. Para os materiais frágeis, pode-se originar o “cavaco de cisalhamento” ou “cavaco de ruptura” (Figura 7a). Para os materiais altamente deformáveis, a ruptura se realiza somente nas imediações da aresta cortante e o cavaco é denominado “cavaco contínuo” (Figura 7b)

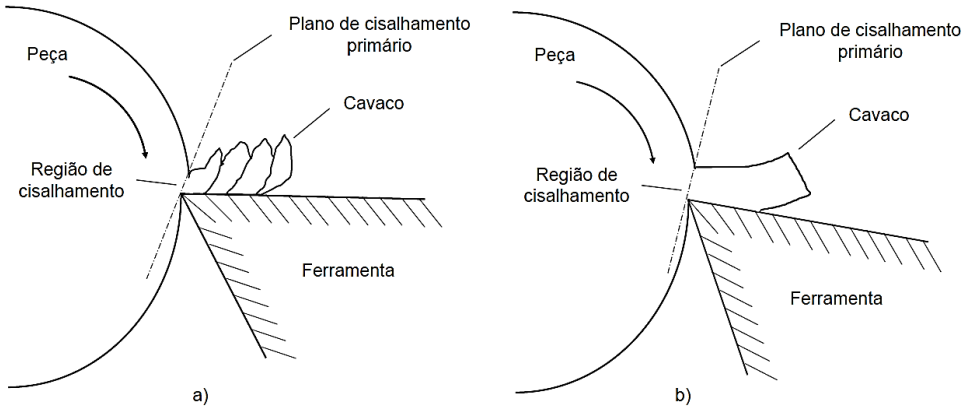


Figura 7 - Formação do cavaco: a) cavaco de cisalhamento ou cavaco de ruptura; b) cavaco contínuo
Fonte: Adaptado de (FERRARESI, 2006).

- Assim, devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção do material deformada e cisalhada (cavaco) sobre a superfície de

saída da ferramenta. Enquanto isso ocorre, uma nova porção de material está se formando e cisalhando. Esta nova porção de material também escorregará sobre a superfície de saída da ferramenta, repetindo novamente o fenômeno.

O grau de recalque do cavaco é a razão entre a espessura do cavaco (h') e a espessura do corte (h). No corte ortogonal, representado na Figura 8, o grau de recalque é uma medida da quantidade de deformação sofrida pelo cavaco e pode ser usado, entre outras coisas, para calcular o ângulo de cisalhamento e a velocidade de saída do cavaco (TRENT e WRIGHT, 2000), como representado na equação 1 - (Eq. 1):

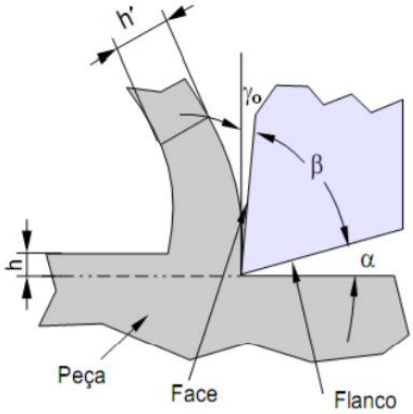


Figura 8 - Variáveis envolvidas no corte ortogonal
Fonte: Adaptado de Stoeterau (2007)

Onde:

α = ângulo de folga;

β = ângulo de cunha;

γ_o = ângulo de saída;

h = espessura de usinagem (antes da retirada do cavaco);

h' = espessura de corte (depois da retirada do cavaco).

$$Rc = \frac{h'}{h} \qquad \text{Eq. (1)}$$

Dessa forma, obtêm-se o valor do grau de recalque através de medição direta da espessura do cavaco *h'* juntamente com a grandeza *h*, obtida nas condições de usinagem ($h = f.senX_r$, onde f é o avanço de corte e X_r, o ângulo de posição principal (FERRARESI, 2000).

O ângulo de cisalhamento ϕ pode ser determinado pela medição direta da espessura do cavaco, h', representado na equação 2 (Eq.2).

$$tg\Phi = \frac{cos\gamma_o}{Rc - sen\,\gamma_o}$$

Eq. (2)

Os valores do grau de recalque*, Rc,* e do ângulo de cisalhamento, ϕ*,* fornecem uma boa indicação da quantidade de deformação dentro da zona de cisalhamento primária. Pequenos valores de ϕ (alto valores de *Rc)* significam grande quantidade de deformação no plano de cisalhamento primário, e vice-versa (MACHADO e Da SILVA, 2004).

O cavaco, apesar de ser um subproduto da usinagem, pode ser ao mesmo tempo evidência e causa de problemas no processo de usinagem. Ou seja, como abordado por Diniz, et *al.* (2001) e Amorin (2002), ao mesmo tempo em que determinado tipo de cavaco pode causar algum problema, como danos na superfície da peça ou estar ocupando volume excessivo, a sua forma e tamanho podem ser indicativos de problemas, relativos tanto à qualidade do material usinado, quanto às condições da ferramenta de corte utilizada.

Alguns pesquisadores como Trent e Wright (2000), Ferraresi (2006) e Diniz, Marcondes e Coppini (2001), apresentam que existem três possibilidades de formação de cavacos: cavacos contínuos, cavacos descontínuos e cavacos segmentados. De maneira geral, a formação de cavacos do tipo contínuos e descontínuos depende muito da ductibilidade do material da peça e das condições do corte. Já para o cavaco segmentado, são produzidos normalmente na usinagem de materiais de baixa condutividade térmica, na presença de cisalhamento.

Por outro lado, Trent e Wright (2000) e Machado e Da Silva (2004), apontam uma outra classificação mais detalhada dos tipos dos cavacos, sendo classificados como cavaco contínuo, cavaco parcialmente contínuo, cavaco descontínuo e cavaco segmentado, como apresentado abaixo:

- **Cavaco contínuo:** São formados na usinagem de materiais dúcteis, como aços de baixa liga, alumínio e cobre. O metal cisalha na zona de cisalhamento primário com grande quantidade de deformações (da ordem de 2 a 5mm/mm), permanecendo em uma forma homogênea, sem se fragmentar. Apesar da forma de fita desses cavacos não apresentar, normalmente, nenhuma evidência de fratura ou trinca, uma nova superfície está sendo gerada na peça e isto tem que envolver fratura. A tensão normal do plano de cisalhamento primário será, portanto, uma variável para determinar se o cavaco será contínuo ou descontínuo, e ela é fortemente influenciada pelo ângulo de cisalhamento, Φ, e pelas condições da interface cavaco-ferramenta (zona de cisalhamento secundário).

- **Cavaco parcialmente contínuo:** é um tipo intermediário entre os cavacos contínuos e descontínuos, onde a trinca se propaga só até uma parte do plano de cisalhamento primário. É, muitas vezes, denominado cavaco de cisalhamento. Sugere-se que dois fatores são importantes: (i) a energia elástica acumulada na ferramenta pode não ser suficiente para continuar a propagação da trinca. O cavaco perderá contato com a ferramenta, interrompendo o crescimento (propagação) da trinca; (ii) a presença de grande tensão de compressão no plano de cisalhamento primário, um pouco além da ponta da ferramenta, que supressa a propagação da trinca (MOURA e Da Silva, 2014).
- **Cavaco descontínuo:** Os cavacos descontínuos são mais comuns quando usinando materiais frágeis, como o bronze e os ferros fundidos cinzento, que não são capazes de suportarem grandes quantidades de deformações sem fratura. Machado e Da Silva (2004) e Moura e Da Silva (2014) apresentam que possivelmente em baixas velocidades, ângulo de saída pequeno e grandes avanços podem também gerar cavacos descontínuos em certos materiais semi-ducteis. Com o aumento da velocidade de corte, o cavaco tende a se tornar mais contínuo, primeiro porque a geração de calor é maior e o material, por conseguinte, mais dúctil, segundo porque é mais difícil a penetração de “contaminantes” na interface cavaco-ferramenta ou plano de cisalhamento secundário (pois o tempo possível diminui) para reduzir a tensão normal ao plano de cisalhamento primário que permitiria a propagação da trinca.
- **Cavaco segmentado:** Os cavacos segmentados são caracterizados por grandes deformações continuadas em estreitas bandas entre segmentos com muito pouca, ou quase nenhuma deformação no interior destes segmentos. É um processo totalmente diferente daquele como descrito na formação do cavaco contínuo. A taxa de diminuição na resistência do material, devido ao aumento local da temperatura (devido às deformações plásticas) iguala ou excede a taxa de aumento da resistência proporcionado pelo encruamento, no plano de cisalhamento primário. Isto é peculiar a certos materiais com pobres propriedades térmicas, como o titânio e suas ligas. O cisalhamento para formar o cavaco começa a ocorrer em um plano de cisalhamento primário particular, quando as tensões impostas pelo movimento da ferramenta contra a peça excedem o limite de escoamento do material. A energia associada com esta deformação é convertida em calor imediatamente, e devido as pobres propriedades térmicas do material, altas temperaturas são desenvolvidas localmente. Isto vai provocar o amolecimento localizado do material e, portanto, as deformações continuam na mesma faixa (plano) de material, ao invés de se mudarem para um novo plano de material adjacente na medida em que o material se movimenta, como ocorre na formação dos cavacos contínuos. Com o prosseguimento da deformação, existe uma rotação no plano de cisalhamento, que começa a se afastar da ponta da

ferramenta e se movimenta por sobre a superfície de saída. Esta rotação vai prosseguindo até que o aumento de força a esta rotação exceda a força necessária para deformar plasticamente o material frio em outro plano mais favorável, resultando num processo cíclico de produção de cavacos na forma de um dente de serra.

Apesar das condições de corte poderem ser escolhidas para evitar, ou pelo menos reduzir a tendência de formação de cavacos longos em fita (contínuos, parcialmente contínuos ou segmentados), até o momento, o método mais efetivo e popular para produzir cavacos curtos é o uso de dispositivos que promovem a quebra mecânica deles. Esses dispositivos são popularmente conhecidos como “quebra-cavacos” (MACHADO e Da Silva, 2004). Como também apresentado em recentes pesquisas Scandiffio (2000), Tai et *al.* (2014), Marques (2015) e Souza (2016), o sistema MQL tem apresentado como característica secundária a expulsão do cavaco no momento de corte, facilitando a sua quebra. Dessa forma, essa técnica será aplicada nessa pesquisa, onde será abordado nos capítulos sequente os resultados encontrados na formação e na quebra dos cavacos.

A Figura 9 ilustra os tipos de cavacos formados no processo de torneamento, ferramentas de metal duro para atender aos requisitos de controle de cavacos ao cortar materiais de trabalho específicos em diferentes velocidades, avanço e profundidade de corte, conforme classificado pela Norma ISO 3685 (1993):

Figura 9 - Formas de cavaco resultante do processo de torneamento de metal
Fonte: Adaptado de (SANTOS JUNIOR, 2012)

Pesquisadores como Machado e Da Silva (2004), Ferraresi (2006) e Trent e Wright (2000), apontam que o material da peça é o fator principal que vai influenciar na formação do cavaco. Estes autores apresentam que fatores como Velocidade de Corte, Avanço e Profundidade de corte também tem influência na forma do cavaco. Trent e Wright (2000), apresentaram, em uma pesquisa realizada com aço 1045 em diferentes regimes de trabalho

encontrando diferentes formas de cavaco. Os resultados encontrados na pesquisa assemelham com os resultados encontrados com o Aço SAE 8640, pois apresentam semelhanças em sua composição química. A Figura 10 apresenta os resultados encontrados:

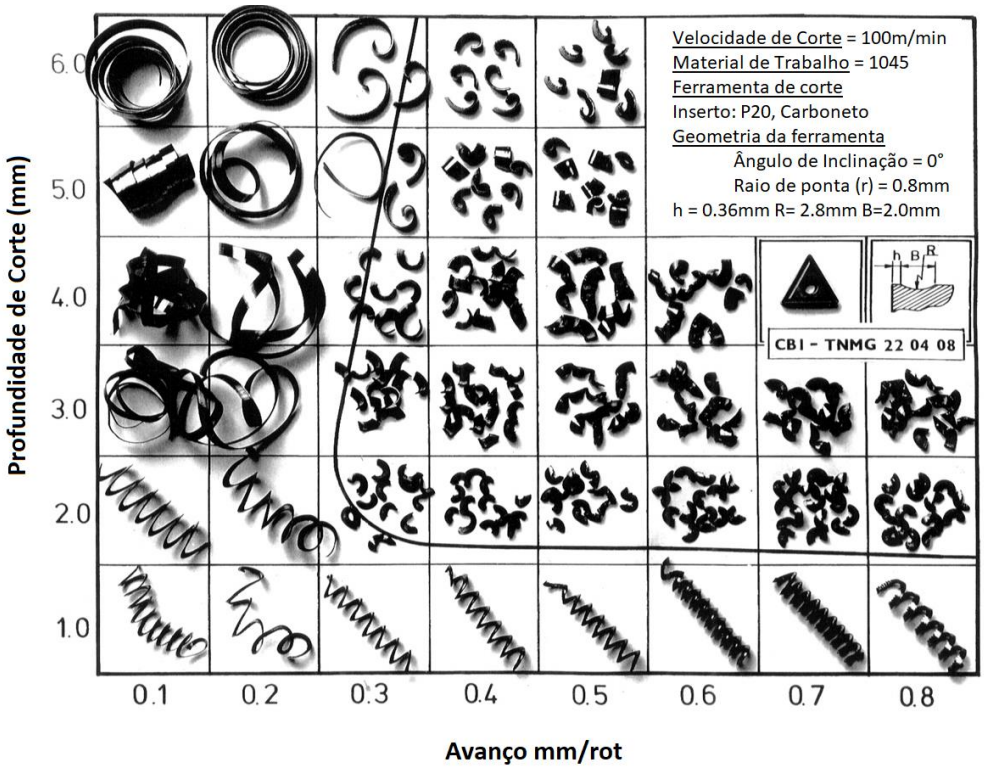


Figura 10 - Formação do cavaco em diferentes regimes de trabalho
Fonte: Adaptado (TRENT e WRIGHT, 2000)

É possível observar na Figura 10, diferentes regimes de formação de cavacos para vários avanços e profundidades de corte. Pode se perceber que a figura, não apenas fornece a capacidade de desempenho de uma ferramenta de corte, mas também asume uma função importante na seleção de parâmetros de corte (como avanço, profundidade de corte, velocidade de corte) para uma operação específica, sendo destacado pelo autor uma região satisfatória, quando se obtem cavacos quebradiços, sendo esses com suas vantagens particulares, conforme já apresentado nesta pesquisa.

Na realidade a forma dos cavacos longos é que causam os maiores problemas relativos à segurança e produtividade e, portanto, estas formas de cavacos exigem cuidados especiais.

Os resultados encontrados por Trent e Wright (2000), no gráfico de cavacos apresentado na Figura 10, se assemelham com os resultados também apresentado por Smith (1989). Nestes estudos obteve-se o entendimento, em geral, que um aumento da velocidade de corte, uma redução no avanço ou um aumento no ângulo de saída, tende a produzir

cavacos em fitas (ou contínuos, quanto ao tipo). O avanço é o parâmetro que mais interfere e a profundidade de corte o que menos influência na forma dos cavacos.

2.5. Aço SAE 8640

O aço SAE 8640 é um aço-níquel-cromo-molibdênio, de médio carbono e baixa liga e é mais utilizado para fabricação de componentes mecânicos, pois possui alta resistência mecânica, boa usinabilidade, alta tenacidade, elevada temperabilidade e baixa soldabilidade (LIMA, 2007). Sua dureza superficial varia entre 52 e 57 HRC, podendo ser melhoradas com o tratamento térmico de Nitretação.

Após o tratamento térmico de têmpera na faixa de 850 a 900°C, o SAE 8640 é utilizado em grandes como na fabricação de rolamentos, buchas, cilindros, engrenagens, eixos hidráulicos, eixos furados, entre outros, podendo substituir o aço SAE 1045. O tratamento térmico particulariza propriedades como resistência a fadiga e à fratura, quando comparado com outros materiais, sendo um diferencial nas seções transversais (CARVALHO, 2004; FREITAS *et al.,* 2016b).

Silveira *et al.* (2018), na avaliação da estrutura do aço SAE 8640, através do tratamento térmico de Têmpera, observou-se que a mudança de temperatura altera drasticamente as propriedades do aço. Nesse sentido, o autor mostra que as propriedades do aço dependem não só de sua composição química, mas também de como são produzidos, e o que é relevante, ou seja, sua estrutura interna. A composição química do aço SAE 8640 é apresentada na Tabela 6.

Elemento	**C**	**Mn**	**Si**	**Ni**	**Cr**	**Mo**
%	0,38	0,75	0,15	0,40	0,4	0,15
	0,43	1	0,3	0,7	0,6	0,25

Tabela 6 - Composição Química do Aço SAE 8640
Fonte: Manual de tecnologia Mecânica p.42.

2.6. Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL)

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2004), F. W. Taylor no início do século XX foi o primeiro pesquisador a introduzir água no processo de usinagem, a fim de resfriar a ferramenta, e adicionar uma solução de água e sabão para evitar a oxidação da peça e/ou ferramenta. Desde então, várias técnicas de aplicação dos fluidos de corte têm sido estudadas por pesquisadores com o objetivo de encontrar melhores resultados de produtividade,

melhores condições de usinabilidade dos metais, aumento da velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Machado e Da Silva (2004), apontam que na usinagem, o fluido de corte deve ser aplicado usando um método que permite que ele chegue o mais próximo possível da aresta de corte, dentro da interface cavaco-ferramenta, para que ele possa exercer suas funções adequadamente.

Alguns pesquisadores como Dhar, Ahmed e Islam (2007), Boubekri *et al.* (2010) e Geiser, Mello e Souza (2011) testaram novas técnicas que visam reduzir a quantidade de lubrificante no processo de usinagem, aplicando a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação – MQL. Ainda em tempo, o nome “MQL” é dado ao processo no qual uma pequena quantidade de óleo atomizado em um fluxo de ar comprimido é fornecida a um ponto de corte.

Normalmente é feito através da implantação de dispositivos na máquina de usinagem, com o objetivo de transportar o lubrificante e o ar pressurizado para a região de corte da ferramenta. Nesse conjunto, apresentado por Eker *et al.* (2014), é ilustrado na Figura 11 um reservatório, uma ou duas unidades de regulação da mistura (pressão e vazão) e linhas de lubrificante com bicos de pulverização em suas extremidades, alimentando a ferramenta como um aerossol em forma de gotículas, sobre pressão normalmente de 6 bar e vazão 4ml/min.

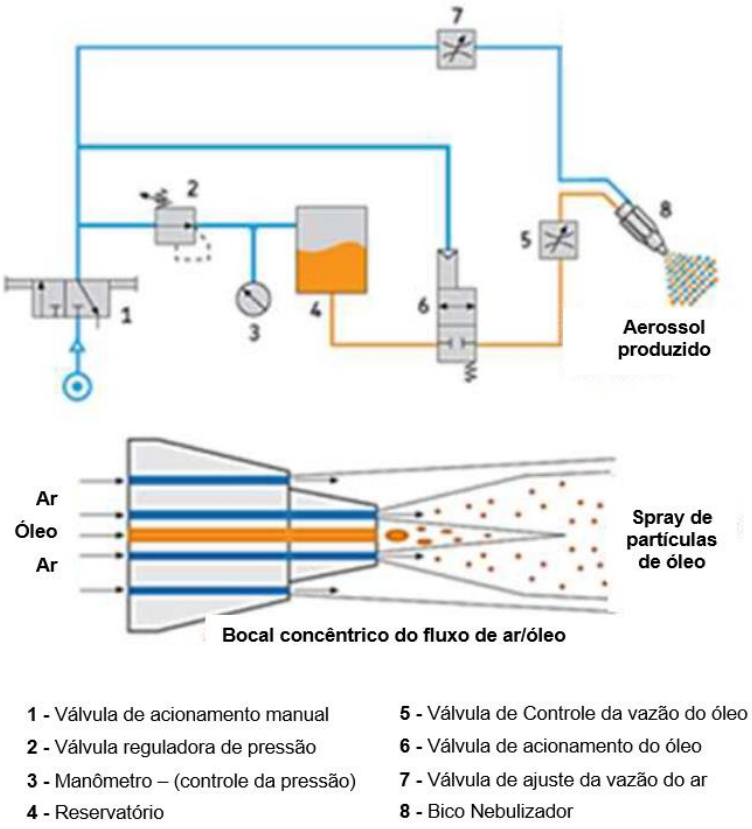


Figura 11 - Sistema de lubrificação por MQL
Fonte: Adaptado de (EKER *et al.*, 2014)

A Figura 11 representa um esquema de MQL utilizado por Eker, *et al* (2014), por um bico de fluxo concêntrico triplo. O autor explica que existem duas unidades de regulação de mistura (ar e óleo), linhas de lubrificantes com bicos de pulverização e um reservatório. O reservatório de lubrificante é pré-pressurizado pelo ar comprimido e o lubrificante é transportado através de um sistema de dutos e linhas para o bico de pulverização que produz partículas de lubrificante extremamente finas, transportadas pelo ar. Souza *et al.* (2016*)* apresentam que *o* spray pode ser pulverizado contra a saída do cavaco ou entre a superfície de folga da ferramenta e a peça, fazendo com que a pequena quantidade de óleo possa ser suficiente para reduzir o atrito nestas interfaces e diminuir a tendência à aderência.

Boubekri *et al.* (2010) apresentam uma técnica cuja lubrificação é obtida por meio do lubrificante, enquanto a ação de resfriamento mínima é obtida pelo ar pressurizado, que alcança a interface da ferramenta.

Um estudo desenvolvido por Furnes, *et al.* (2006) mostram que os custos com processos de lubrificação tradicionais são mais altos quando comparados ao MQL. Os autores relatam, conforme apresentado a seguir, na Figura 12, uma economia de mais de 15% nos custos de aquisição de um sistema MQL, comparando com sistema de jorro abundante de lubrificação. Os custos relacionados ao refrigerante, incluindo equipamentos, licenças, tratamento, descarte e preocupações com a saúde e a segurança, são fatores-chave no custo total dos componentes usinados. Isso ocorre devido ao custo oriundo dos equipamentos como filtros, resfriadores, tubulações, bombas e até mesmo o fluido de corte.

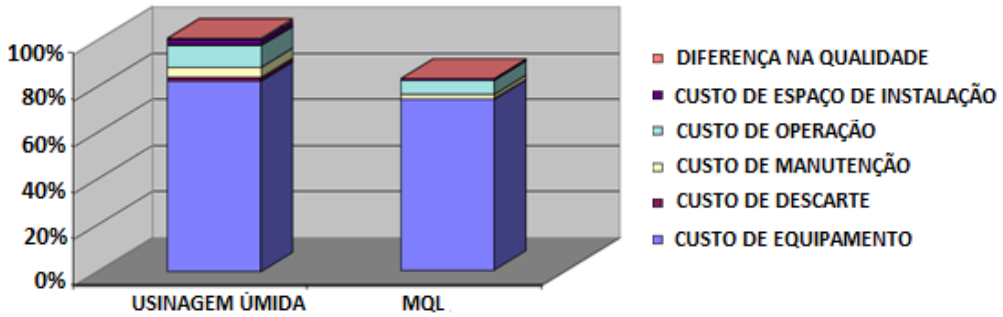


Figura 12 - Análise do ciclo de vida da usinagem em Jorro x usinagem MQL para transmissão específica
Fonte: Adaptado de Furnes *et al.* (2006).

A concepção de que maior quantidade de uso de fluido de corte proporciona melhor corte e aumenta a vida útil da ferramenta está sendo mudada, pois há um novo paradigma declarado pela palavra “Mínimo”. Com os recentes avanços que priorizam a maximização da produtividade que atendam as especificações do produto usinado, técnicas eficientes de refrigeração MQL estudadas apresentam condições vantajosas como produtividade, melhor acabamento usinado e maior vida da ferramenta no processo de usinagem, os estudos a

seguir são representativos da pesquisa realizada na área e cada um destaca uma ou mais contribuições desta tecnologia emergente para o campo da tecnologia de fabricação.

Scandiffo (2000), observou a viabilidade de utilização do corte a seco e MQL, comparando com o óleo solúvel em abundância no torneamento do aço SAE 1045, com pastilha de metal duro recoberta. Nos resultados, encontraram a redução de 10% no desgaste da ferramenta e melhora na rugosidade da peça, nas três condições de refrigeração/lubrificação citadas. No que se refere aos cavacos formados durante o processo de torneamento com MQL, Rahim, *et al.* (2015) mostraram que a aplicação de óleo sintético à base de MQL como fluido de corte foi eficiente no processo de usinagem, reduzindo a temperatura de corte em 20% em relação à técnica de usinagem a seco.

Numa investigação entre as diferentes condições de lubrificação e refrigeração, Souza (2016) concluiu que a usinagem com MQL gerou uma redução aproximada de 20% da força de usinagem do aço AISI 420C. Os autores constataram que as diferenças nos resultados da força de corte na aplicação do fluido em jorro em comparação à MQL podem estar relacionadas com uma maior capacidade de refrigeração quando utilizando em Jorro e uma maior capacidade de lubrificação quando utilizado MQL.

Itoigawa, *et al.* (2006), investigaram o MQL apenas com óleo e MQL, combinando com gotículas de água no processo de torneamento do alumínio. Na condição de carga leve, o corte MQL com gotículas de água mostrou baixo e constante atrito em toda a faixa de relação de comprimento de corte, devido a sua função efetiva quanto a lubrificação e refrigeração. Porém, a força de atrito com o corte MQL tornou-se maior à medida que a proporção do comprimento de corte aumentava, devido ao pequeno efeito de refrigerante ocasionado pelo ar comprimido, sendo apresentado uma técnica difícil de substituir completamente por técnicas de resfriamento por jorro abundante.

De acordo com Boubekri *et al.* (2010) e Furnes *et al.* (2006), a experiência de produção de MQL até o momento indicou aplicações de redução de custos favoráveis devido ao custo reduzido de gerenciar os fluidos de corte. Os autores relataram que uma oferta contínua de MQL é benéfica em termos de vida da ferramenta, enquanto a interrupção da oferta de MQL leva a uma queda significativa na vida útil da ferramenta, especialmente no caso de brocas sensíveis ao calor. Com relação ao tipo de lubrificante MQL, um tipo de baixa viscosidade com alta capacidade de resfriamento dá origem a uma vida útil da ferramenta consideravelmente prolongada. Os autores mostraram também que ao usar o lubrificante sintético isento de óleo mais 40% de água, a vida útil da ferramenta aumenta em 100%.

A Tabela 7 apresenta alguns parâmetros de corte e de lubrificação utilizados pelos autores citados.

PARÂMETROS DE USINAGEM	Autores		Dhar, Ahmed e Islam (2007)	Reddy, Nouari e Banerjee (2007)	Rao e Krishna (2008)	Bandyopadhya y e Endapally (2009)	Hadad e Sadeghi et *al.* (2013)	Moura (2017)	Paul e Varadarajan (2013)	Dambhare et *al.* (2015)	Rahim et *al.* (2015)	Souza et *al.* (2016)	Ojolo, Damisa e Ikekilo (2011)
	Máquina		Torno de Alta performance, 15hp	-	-	Torno Emmes	-	Torno CNC ROMI Multiplic 35D	Kirloskar Turn master-35 lathe	-	Torno CN	Torno CNC Quick Turn Nexus 100-II	NL 25 lathe machine
	Material		AISI 1040	AISI 1040	AISI 52100	AISI-4140	AISI 4140	Ti-6Al-4V	AISI 4340	AISI 1040	AISI 1045	AISI 420	Aço baixo/médio/ alto teor de carbono
	Dimensões (mm)		Ø 125x760	-	Ø 70	-	Ø 45x50	Ø 200 x 300	Ø 80x360	Ø 30x43	Ø 150x2	Ø 76x120	Ø 20X80
	Ferramenta de Corte		Carboneto, SNMM 120408 P30 (ISO)	Metal duro sem revestimento	Pastilhas de cerâmica e SNGN	TINCNMG 120408	HSS (18 200)	SNMG120408-SM 1105	PSBNR 2525 M12	CNMG 120412 TF	-	TNMX 160408 WF	HSS
	Suporte da ferramenta		PSBNR 2525M12 (ISO)	-	CSBNR 2525M12	-	-	-	PSBNR 2525 M12	PCLNR/L 1616H 12-M	-	-	-
	MQL	**Pressão**	-	8 bar	3 bar	6 Bbar	3 bar	3 bar	-	4 bar	0,2 Mpa	2 kPa	-
		Vazão	6 g/s	-	5 ml/min	100ml/h	30 ml/h	4 ml/min	0,5 - 15 ml/min	15 l/h		4 l/h	-
		Distância do bico (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	4	20	-
		Ângulo do bico	-	-	-	-	-	-	26°	-	45°	-	-
		Lub. Sólido	MoS_2	-	MoS_2 + Grafite	-	-	MoS + Grafite	Graxa - Grafite	-	-	-	Grafite
		Lub. Líquido	-	-	Quimatic® Super Fluido 3	Óleo 6519 Castrol	Água + óleo RS 1642 - 10%	óleo sintético óleo Emulsionável 10%	10% óleo + água	Óleo indiano	Éster sintético	BD-Fluid B90 5%	SAE 40
	Torneamento a seco		sim	sim	-	sim	sim	Sim	sim	sim	sim	-	-
	Vc (m/min)		72 - 94 - 139 - 164	100 - 125 – 150 - 175 - 200	50 - 75 - 100 - 125 - 150	79 – 111 – 140 - 175	50,2 - 100,4 - 141,4	30 - 50 – 60 – 70 – 90	80 - 90 - 100	21,93 - 33,73 - 50,55	350 - 450 - 550	240 - 290	10 - 15
	f (mm/rev)		0,10 - 0,13 - 1,16 - 0,20	0,10 - 0,15 - 0,20 - 0,25 - 0,30	0,04 - 0,08 - 0,12 - 0,16 - 0,20	0,254	0,09 - 0,22	0,05 - 0,10 - 0,15 - 0,20	0,08 - 0,1 - 0,12	0,1658 - 0,1855 - 0,2107	0,08 -0,10 - 0,12	0,1 - 0,2	0,15 - 0,25
	ap (mm)		1,5	-	0,2	1,5	0,5 - 1 - 1,5	0,5 – 1 – 1,5	0,5	0,5 - 0,75 - 1	2	1 - 2	-
	(+) Bom (++) Muito bom		++	++	++	++	++	++	+	+	++	+	++

Tabela 7 - Pesquisas utilizando MQL no processo de torneamento
Fonte: Autor

A posição do bico MQL tem influência importante no desempenho do processo de torneamento MQL.

Como apresentado por Marques (2015), durante o processo de usinagem, o fluido de corte pode ser aplicado em quatro diferentes direções, conforme apresentado na Figura 13. A aplicação sobre-cabeça (sobrecavaco) - (A), aplicação entre a superfície de saída e o cavaco - (B), aplicação do fluido de corte entre a superfície de folga e a peça - (C) e a quarta possibilidade é a aplicação do fluido de corte pelo interior da ferramenta - (D), através de um canal que entrega o fluido de corte na interface cavaco-ferramenta (MACHADO et *al. 2015*).

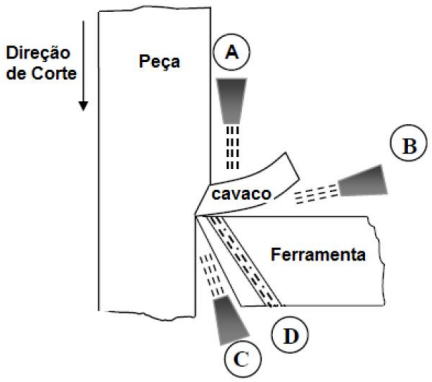


Figura 13 - Direções possíveis de aplicação do fluido de corte
Fonte: Marques (2015)

Marques (2015) apresenta, ainda, as características de aplicação do fluido nas quatro possíveis regiões durante a usinagem. A posição sobre-cabeça (A) é a forma mais tradicional de aplicação do fluido de corte. No entanto, esta forma se torna ineficiente quando cavacos emaranhados são produzidos durante a usinagem, impedindo o acesso do fluido à interface ferramenta/cavaco.

Já a aplicação entre a superfície de saída e cavaco (B) é recomendado apenas quando o fluido é aplicado sob alta pressão. A aplicação do fluido entre a superfície de folga e a peça na direção (C), apresenta a vantagem de atingir diretamente a interface ferramenta/peça, reduzindo o desgaste de flanco e contribuindo para a qualidade da peça usinada (MACHADO *et al.* 2015).

2.6.1. Fluido de corte

Nos últimos anos, grandes avanços tecnológicos foram obtidos e fizeram com que a demanda por fluidos de corte crescesse consideravelmente. Na usinagem, o fluido de corte apresenta como função principal refrigerar em altas velocidades de corte e lubrificar em baixas velocidades de corte. De acordo com Ferraresi (2006), pode-se dizer que o fluido de corte

deve ser aplicado de forma que se possibilite que ele chegue o mais próximo possível da aresta de corte, dentro da interface peça-ferramenta, para que seja possível executar suas funções corretamente.

Cada fluido de corte possui características particulares, vantagens e limitações distintas. Por meio da distinção destas características é possível fazer uma classificação dos diversos tipos de fluidos de corte. Eles podem ser classificados em:

- Óleos de corte (integral ou aditivado);
- Fluidos solúveis em água:
- Emulsionáveis convencionais (óleos solúveis);
- Emulsionáveis semi-sintéticos;
- Soluções (fluidos sintéticos).

De acordo com Costa (2014) é necessário entender, para cada aplicação se refere os fenômenos tribológicos atuantes de cada lubrificante. Ao serem entendidas, as características de cada lubrificante e de posse delas, as vantagens de cada um se aliam a cada condição de operação. Dessa forma, Moura (2017) e Gonçalves, Yaginuma e Yamamoto (2010) relacionam algumas características dos quatro principais tipos de fluidos de corte: óleo mineral, óleo solúvel, fluidos semi-sintético e fluidos sintéticos, mostrados na Tabela 8.

Características	Miscíveis em água			Integral
	Sintético	Semi-Sintético	Óleo Solúvel	Óleo Mineral
Calor Removido	****	***	**	*
Lubrificação	*	**	***	****
Manutenção	***	**	*	****
Filtrabilidade	****	***	**	*
Custo	****	***	**	*

** ruim; ** bom; *** muito bom; **** excelente*

Tabela 8 - Características dos tipos de fluidos de corte utilizados nas indústrias
Fonte: Adaptado: Gonçalves, Yaginuma e Yamamoto, (2010).

Para Diniz, Marcondes e Coppini (2001), os fluidos sintéticos são soluções químicas, constituídas de materiais (sais) orgânicos e inorgânicos dissolvidos em água, não contendo óleo mineral. São compostos monofásicos de óleos dissolvidos totalmente em água. Não há a necessidade da atuação de elementos emulsificadores, pois os compostos reagem quimicamente formando fases únicas.

De maneira geral, os fluidos de corte sintético e os emulsionáveis são usados quando a função principal é resfriar o conjunto peça-ferramenta, então os óleos minerais são usados

quando a lubrificação é mais importante do que o resfriamento no processo selecionado. De acordo com Ebbrell *et al.* (2000), as emulsões são compostas de pequenas partículas derivada do petróleo ou sintéticos suspensos na água. As emulsões de óleo e petróleo geralmente tem capacidades lubrificantes maiores, porém capacidade de refrigeração inferior, apresentando propriedades lubrificantes e refrigerantes moderados.

Dessa forma, mesmo com as particularidades de cada tipo de fluido de corte, a função principal é a dissipação de calor para que a ferramenta não atinja uma temperatura elevada enquanto o efeito de lubrificação diminui a geração de calor no processo. Quando o fluido é a base de água, a dissipação de calor (refrigeração) é mais importante que a redução de calor. Segundo Gonçalves, Yaginuma e Yamamoto (2010), a ação lubrificante ocorre devido a formação de uma película de fluido entre a peça e a ferramenta, evitando assim o contato direto entre ambos.

Nesse contexto, Yildiz e Nalbant (2008) e Lawal, Choudhury e Nukman (2013), afirmaram que a aplicação de fluido de corte nos processos de usinagem desempenha um papel muito importante, muitas operações não podem ser realizadas de forma eficiente, sem refrigeração. A alta temperatura gerada na região da aresta de corte da ferramenta tem uma forte influência de controle sobre a taxa de desgaste da ferramenta de corte e do atrito entre o cavaco e a ferramenta durante o processo de usinagem.

Com a finalidade de aumentar a produtividade na usinagem, técnicas eficientes estão sendo estudadas, com a implementação de lubrificante sólido aos lubrificantes líquidos, sendo um excelente método adotado atualmente em processos de usinagem para diminuição da temperatura na região de corte. Os lubrificantes sólidos apresentam algumas vantagens sobre os líquidos, pois possuem maior adesão e são mais fáceis de aplicar, entre outros benefícios.

Dessa forma, de acordo com Oliveira Junior (2013), uma combinação de lubrificantes sólidos e líquidos produz uma diminuição significativa no coeficiente de atrito, quando comparado a adição do lubrificante líquido apenas, sugerindo a existência de uma sinergia positiva entre os lubrificantes líquidos e sólidos. No estudo apresentado, essa ação conjunta aumentou significativamente a durabilidade do regime de lubricidade do sistema, reduziu o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste.

2.6.2. Lubrificante Sólido

A partir do levantamento na literatura é possível destacar que há muitos benefícios em usar lubrificantes sólidos durante o processo de torneamento. A usinagem com lubrificantes sólidos é uma tentativa de evitar ou minimizar a utilização de fluidos de corte, em função dos problemas gerados pela sua utilização. Wypych (2014), aponta que os lubrificantes sólidos são importantes quando óleos e graxas são impossíveis de serem utilizados devido

principalmente às condições drásticas de uso ou quando a contaminação é indesejável, como no caso de altas e baixas temperaturas, devido à perda de propriedades dos materiais tradicionalmente líquidos e pastosos.

Autores como Kumar, Singh e Kalsi (2017) e Moura (2017) relataram melhorias significativas na utilização dos lubrificantes sólidos aplicados externamente nos processos de usinagem, em comparação com a usinagem com fluido de corte em termos de acabamento superficial, força de corte e desgaste da ferramenta.

De acordo com Kumar, Singh e Kalsi (2017), alguns pesquisadores exploraram a ideia de usar lubrificantes sólidos como grafite, bissulfeto de molibdênio (MoS_2) e fluoreto de cálcio durante o processo de usinagem.

A lubrificação sólida é uma das opções mais promissoras para controlar o atrito e desgaste com consequente ganho na eficiência dos sistemas mecânicos. Uma combinação de lubrificantes sólidos e líquidos é viável e pode ter um efeito sinérgico benéfico na redução de atrito e no aumento da resistência ao desgaste da ferramenta de usinagem. Paul e Varadarajan (2013), apresentaram um desempenho promissor no corte, utilizando graxa com 10% de grafite durante o torneamento de aço AISI 4340. Como resultados o uso de lubrificantes semissólidos - graxa e grafite na interface ferramenta-cavaco juntamente com MQL reduziu a vibração da ferramenta, a força de corte, a temperatura de corte, o desgaste da ferramenta e melhorou o acabamento da superfície.

Já em um estudo apresentado por Ojolo, Damisa e Ikekolo (2011), o uso de lubrificante sólido durante o corte ortogonal do aço carbono mostrou uma redução de 20% nos valores de rugosidade superficial em comparação com a usinagem, utilizando lubrificante líquido. Reddy, Nouari e Yang (2010), verificaram que a vida útil da ferramenta foi melhorada significativamente durante as operações de perfuração pelo uso de grafite como lubrificante sólido.

A utilização de MoS_2 e grafite como lubrificantes sólidos no processo de torneamento explorado por Dilbag e Rao (2008), mostram uma melhora considerável no acabamento superficial, obtendo uma diminuição dos valores de rugosidade superficial de 8 a 15% em relação ao torneamento a seco. Já Reddy, Nouari e Banerjee (2007), relataram que a geração de calor e o atrito foram reduzidos na zona de moagem durante o uso de grafite e bissulfeto de molibdênio como lubrificantes sólidos durante a moagem do SiC.

De acordo com Marques (2015), os requisitos para as propriedades dos lubrificantes sólidos estão relacionados à baixa resistência ao cisalhamento na direção de deslizamento. Esta propriedade proporciona baixo coeficiente de atrito, devido ao fácil movimento de cisalhamento do material lubrificante. Além disso, ele deve ter uma alta resistência à compressão na direção da carga (perpendicular à direção de deslizamento). Dessa forma, Zailani *et al.* (2011) complementa que um lubrificante sólido, possuindo resistência à

compressão elevada, é capaz de suportar cargas elevadas, sem que haja contato direto entre as superfícies de atrito. Ao mesmo tempo, o lubrificante deve ter também uma boa aderência na superfície do substrato para se garantir sobre a superfície da peça, mesmo em altas tensões cisalhantes.

2.6.2.1. Grafite

O grafite e o MoS_2 são os materiais predominantemente utilizados como lubrificante sólido, pois apresentam excelentes propriedades lubrificantes, devido a estrutura lamelar presente nesses sólidos. Nesse trabalho, portanto, o grafite será utilizado como o lubrificante sólido. Uma vez que ele é um mineral natural, extraído de jazidas em todo o mundo; sua estrutura lamelar proporciona baixo atrito e alta resistência ao desgaste em superfícies deslizantes, dessa forma, devido a sua boa lubrificação, abundância e baixo custo, ele é utilizado em muitas aplicações industriais. Se aplicado na forma de pó, é considerado como um aditivo aos lubrificantes, agindo de maneira eficaz devido a sua estrutura lamelar como apresentado.

O grafite é constituído por camadas planas de átomos de carbono organizados em anéis ordenados. O conjunto desses anéis forma lâminas conhecidas como grafeno, que se sobrepõem ligados entre si por ligações covalentes, formando uma rede infinita de tipo hexagonal. As camadas planas do átomo de carbono (grafeno), apresentam uma forte ligação covalente entre elas, e essas ligações presentes entre os planos são fracas, denominadas de ligações do tipo Van der Waals, como apresentado na Figura 14. Dessa forma, elas podem ser mecanicamente quebradas, dando ao grafite uma característica de lubricidade. Conforme Wypych (2014), durante a utilização do grafite - devido às propriedades anisotrópicas e fracas forças de ligação entre as lamelas - ele pode ser facilmente delaminado e ocupar ranhuras e irregularidades superficiais, minimizando o atrito e o desgaste prematuro.

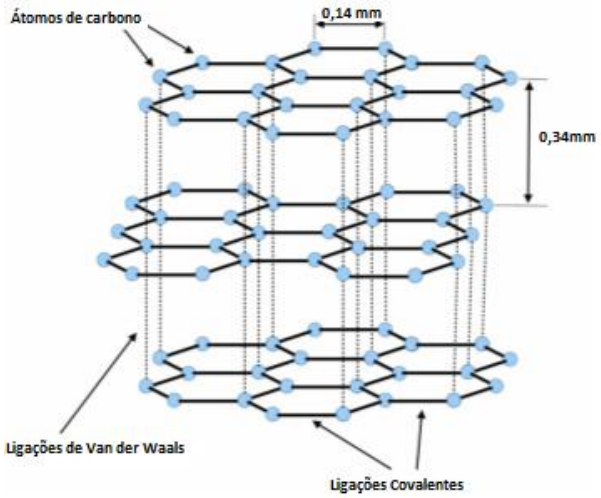


Figura 14 - Representação da estrutura de uma molécula de grafite
Fonte: Moura (2017).

Moura (2017) mostra que o grafite é caracterizado por dois grupos principais: natural e sintético. O grafite sintético é um produto sintetizado a alta temperatura e é caracterizado pela sua elevada pureza de carbono (99,5 - 99,9%). O grafite sintético de grau primário pode apresentar excelente lubricidade assim como o do grafite natural de qualidade. Já o grafite natural é derivado da mineração. A qualidade do grafite natural varia em função da qualidade do minério e do processamento pós-mineração. O produto final é o grafite com um elevado teor de carbono (96,0 - 98,0%). Quanto maior for o teor de carbono e o grau de grafitização (elevado cristalino), melhor será a lubrificação e resistência à oxidação. Para aplicações em que não é necessária uma elevada lubrificação e é necessário um revestimento mais isolante termicamente, pode ser escolhido o grafite amorfo que possui menor quantidade de carbono (80,0%).

As propriedades únicas do grafite, resultantes de sua estrutura, fazem com que o material seja escolhido para inúmeras aplicações, sendo excelentes propriedades de lubrificação, particularmente a elevada temperatura e pressão.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os procedimentos utilizados para a realização do trabalho, detalhando o processo, os materiais e os equipamentos necessários à pesquisa. O trabalho experimental foi realizado no Laboratório de Usinagem, da Escola SENAI Catalão e no Laboratório de Processos de Fabricação, da Universidade Federal de Goiás - Regional Catalão. A Figura 15 representa o fluxograma, abordando as etapas da metodologia.

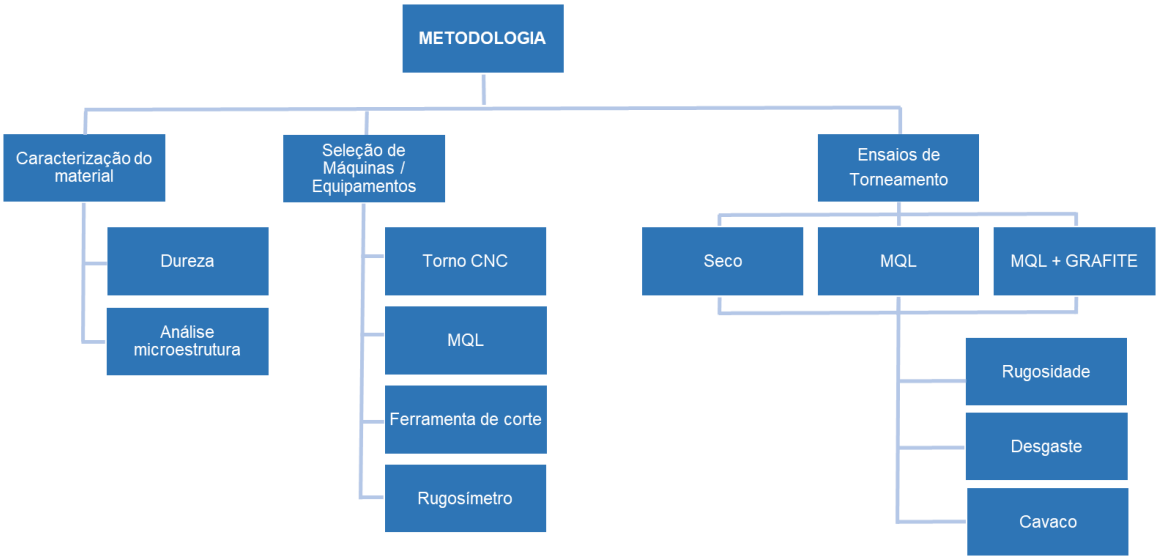


Figura 15 - Fluxograma da metodologia adotada
Fonte: Autor

3.1. Caracterização do Material

O material do corpo de prova utilizado nos experimentos tem sua caracterização como um aço de baixa-liga. O aço SAE 8640 é composto por Níquel, Cromo e Molibdênio (Ni – Cr

– Mo), conforme já apresentado no Capítulo II. Devido a sua composição química, a sua boa temperabilidade e pouca adição de elementos de liga, proporciona condições de propriedades mecânicas excelentes. A adição de Níquel substituindo o Cromo é responsável pela alta tenacidade e resistência ao desgaste; o Cromo e Molibdênio são responsáveis pela formação de carbonetos, proporcionando o aumento da abrasão.

O aço SAE 8640 é utilizado em componentes de sistemas mecânicos onde o aço 1045 não pode ser utilizado devido a sua capacidade de endurecimento, resistência à fadiga e à fratura (CARVALHO, 2004; FREITAS *et al;* 2016b). O aço em questão pode ser utilizado na fabricação de rolamentos, buchas, cilindros, engrenagens, eixos hidráulicos, eixos furados, entre outros. Dessa forma, exige-se que a superfície dos elementos possíveis de serem fabricados como por exemplo rolamentos, tenham uma rugosidade e tolerâncias dimensionais adequadas para essa finalidade.

Nesse sentido, o uso do lubrificante sólido e o método MQL nessa pesquisa, visa obter um desempenho favorável conforme exigências para essa finalidade com melhor acabamento da superfície usinada do material estudado.

O material utilizado foi adquirido da empresa Aços Favorit, nas dimensões de Ø 76,2mm x 700mm, sendo apresentado o certificado de composição do material, com suas respectivas porcentagens de elementos liga, conforme apresentado na Tabela 9.

Elemento	**C**	**Mn**	**Si**	**Ni**	**Cr**	**Mo**
%	0,380	0,790	0,210	0,440	0,510	0,170

Tabela 9 - Composição do aço SAE 8640
Fonte: Aços Favorit

Dessa forma, os valores de cada elemento de liga do material do corpo de prova, apresenta os limites determinados pela ABNT, conforme Tabela 6 apresentada no Capítulo II.

3.1.1. Ensaios de Dureza

Para a realização do ensaio de dureza, o corpo de prova foi seccionado e lixado. O lixamento e polimento ocorreu na máquina “Politriz”, de velocidade variável e da marca Teclago, modelo PVV, com as lixas granulometria #80, 100, 180, 240, 320, 400, 1000, 1200, respectivamente, o polimento com pano apropriado e alumina 1µm com dimensões Ø76,2 x 10mm.

Para medição de dureza, foi utilizado o método Rockwell escala C (HRC), com o auxílio de um Durômetro Mitutoyo HR-300. A carga máxima utilizada no ensaio foi de 150kgf. Foi

utilizado um penetrador com ponta de diamante com cone de 120º, de acordo com a norma NBR 6508 (2008). O ensaio de dureza foi executado conforme as etapas apresentadas a seguir:

1. Aplicação da Pré-Carga (F_0) de 10 kgf sobre a amostra até estabilizar a força;
2. Aplicação da carga adicional F_1 (140 kgf), sendo a carga total ($F_0 + F_1$) 150 kgf;
3. Remoção da Carga adicional (F_1) e permanência da Pré-carga (F_0).

Como apresentado por Mitutoyo (2019), o resultado da medição da dureza HRC é determinado em relação da dimensão “h” da endentação formada no corpo de prova, conforme representando na Figura 16.

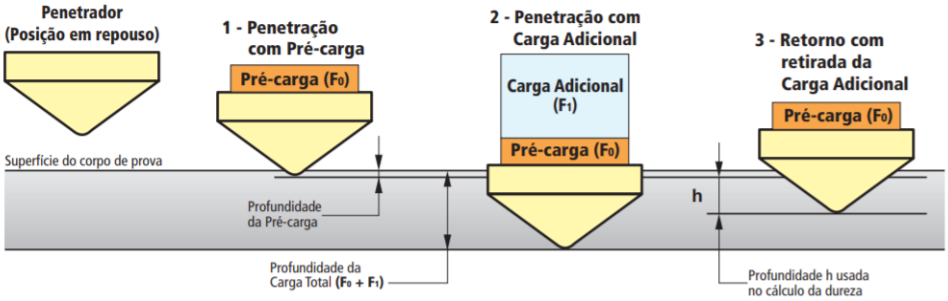


Figura 16 - Etapas de execução ensaio de Dureza Rockwell
Fonte: Mitutoyo, 2019.

Na medição foram feitas 12 endentações, conforme representado na Figura 17, abordando os critérios representados abaixo:

1. Quatro endentações dispostas a 10 mm de distância da borda lateral do corpo de prova, (perfil 1), separados entre si por ângulo de 90°;
2. Quatro endentações dispostas a 20 mm de distância da borda lateral do copo de prova (perfil 2), separados entre si de um ângulo de 90°;
3. Quatro endentações dispostas a 30 mm de distância da borda lateral do corpo de prova (perfil 3), separados entre si de um ângulo de 90°.

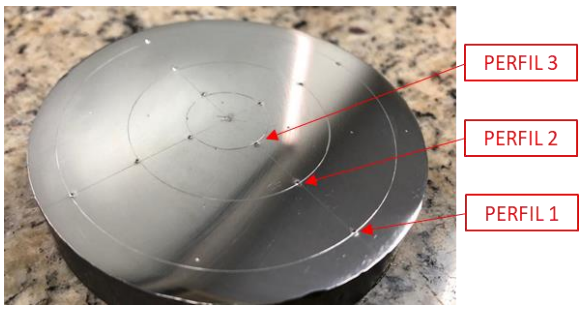


Figura 17 - Representação transversal do corpo de prova utilizado nos ensaios de Dureza Rockwell C e endentações
Fonte: Autor

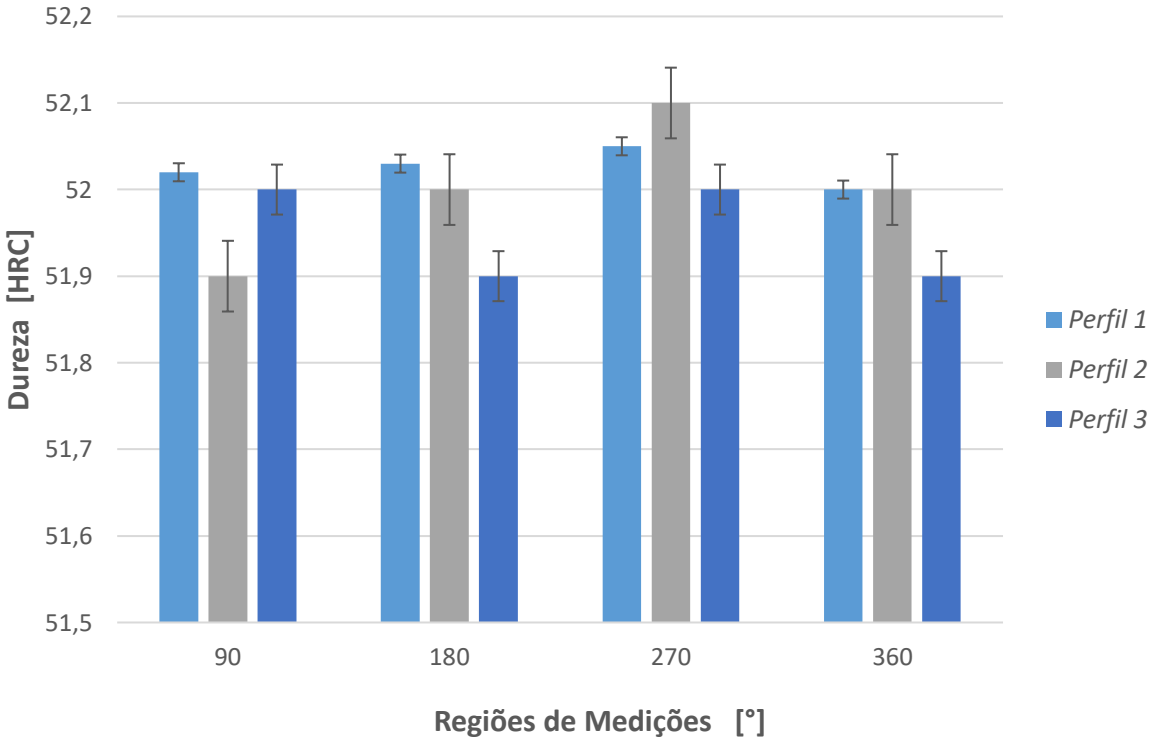


Figura 18 - Dureza HRC do aço SAE 8640 nas quatro regiões de medição distanciadas entre si 90°
Fonte: Autor.

Conforme os resultados apresentados na Figura 18, é possível observar que no perfil 1 apresentou valores da dureza do material ligeiramente maiores, comparando com demais regiões de medições. Isso pode ser relacionado ao processo de fabricação do material, onde as diferentes velocidades de resfriamento após a laminação e conforme o grau de exposição da barra, proporcionaram um aumento da dureza na região da extremidade do material.

Em geral, a dureza média encontrada nas medições foi de aproximadamente 52 HRC, dentro dos padrões estabelecidos pelo fabricante, entre 52~57HRC.

3.1.2. Análise Micrográfica

A análise microscópica do aço SAE 8640 ocorreu mediante a preparação da amostra do material estudado em cinco etapas: embutimento, lixamento, polimento, ataque químico, e na sequência a análise microscópica. Inicialmente foi coletado uma amostra do material, submetendo-a ao embutimento com baquelite e após o embutimento, o lixamento e polimento da amostra. O lixamento e polimento ocorreu na máquina Politriz, de velocidade variável da marca Teclago, modelo PVV, com as lixas granulometria 80, 100, 180, 240, 320, 400, 1000, 1200, respectivamente, e o polimento com pano apropriado e alumina 1 µm. Para a amostra embutida foi utilizado a prensa de embutimento PRE-30Mi, obtendo uma amostra com dimensões de 16x14 mm.

O ataque químico para revelação de microestrutura foi feita com Nital à 5 % para tornar visível os constituintes especiais da estrutura, sendo utilizado o método de imersão da superfície lixada e polida . A análise micrográfica da amostra foi verificada com o auxílio de um Microscópio Metalográfico Trinocular com ampliação de 100X. Os resultados obtidos estão representados na Figura 19:

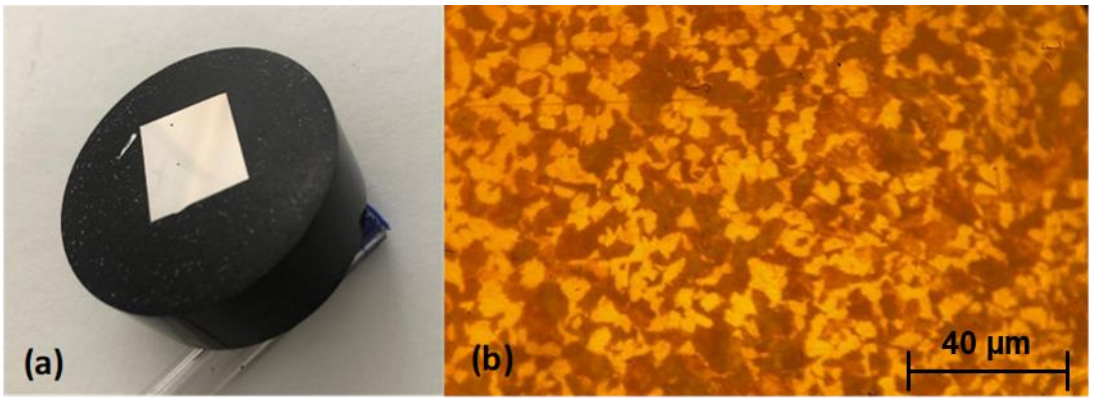


Figura 19 - (a) Amostra do corpo de prova embutido em baquelite - Aço 8640, (b) Amostra base (grãos de ferrita α - mais claros e perlita – mais escuros), ampliação de 100x.
Fonte: Autor

Como também apresentado por Freitas, *et al.* (2016a), é possível observar a prevalência de grãos de ferrita, sendo essa, uma característica notável do aço SAE 8640, onde o constituinte está formado por uma solução sólida de inserção de carbono em ferro alfa. É o constituinte mais tenaz, comprovando as características levantadas no tópico 3.1. A ferrita apresenta-se nos aços como constituinte e misturada com a cementita para formar parte da perlita. Se o aço é muito pobre em carbono, sua estrutura está formada quase que totalmente por grãos de ferrita, cujos limites podem ser revelados facilmente com o microscópio.

3.2. Máquinas e Equipamentos

3.2.1. Torno CNC

Os ensaios de torneamento nas condições a Seco, MQL e MQL + Grafite, foram realizados em um Torno CNC ROMI CENTUR 30D, com rotação máxima de 4000 rpm, potência 12,9 Kw, como mostra a Figura 20. Foi utilizado linguagem MACH 9, para a programação do torneamento do corpo de prova, com o Software CNC 2D. Para a programação, foram utilizadas as variáveis: Velocidade de Corte, Avanço e Profundidade de Corte, nas condições já mencionadas de Lubri-refrigeração. Os valores específicos utilizados estão apresentados na Tabela 13.

Figura 20 - Torno CNC ROMI CENTUR 30D
Fonte: Autor

3.2.2. Ferramenta de Corte

A ferramenta para o torneamento foi de metal duro, classe P para aços, fabricado pela Sandvik, especificação TNMG 16 04 08-PM 4325. A geometria da ferramenta de corte utilizada, tais como espessura (S) comprimento efetivo da aresta de corte (LE), raio de canto (RE) e diâmetro inscrito (C), estão apresentadas na Figura 21. Suas dimensões e parâmetros de corte recomendado pela fabricante apresentadas na Tabela 10. Para o inserto, foi utilizado o suporte DT JNR 2525M 16, também fabricado pela Sandvik, representado na Figura 22, e suas informações técnicas estão apresentadas na Tabela 11.

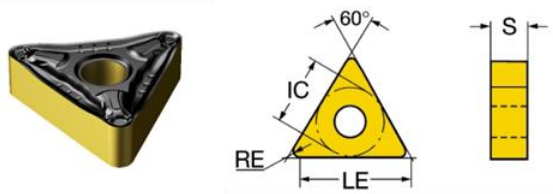


Figura 21 - Geometria da Ferramenta de corte
Fonte: (SANDVIK, 2019)

T	**N**	**M**	**G**	**16**	**04**	**08**	**P**	**M**	**4325**	
Geometria - **Triangular**	Ângulo de folga – **0°**	Tolerância de Fabricação – **Retificada**	Tipo de fixação –	Comprimento da Aresta de corte (LE) – **16mm**	Espessura da pastilha (S) –	Raio de ponta (RE) – **0,794mm**	Classe – **Aço**	Médio Carbono	Classe Ferramenta 43 **Aço**	25 **Metal duro**

Tabela 10 - Parâmetros da Ferramenta de corte recomendado pelo fabricante
Fonte: (SANDVIK, 2019)

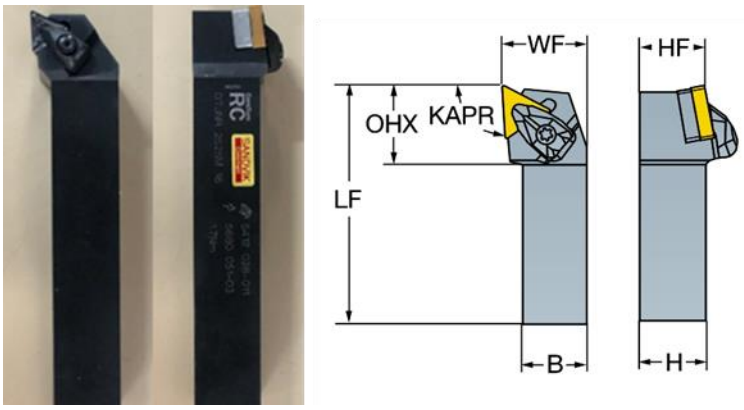


Figura 22 - Suporte de Ferramenta de corte
Fonte: Adaptado de (SANDVIK, 2019)

HF	OHX	LF	B	H	WF	KAPR
Altura funcional – **25mm**	Balanço máximo – **27,6mm**	Comprimento Funcional – **150mm**	Largura da haste – **25mm**	Altura da Haste – **25mm**	Largura Funcional – **32mm**	Ângulo da aresta de corte da ferramenta – **107,5 dag**

Tabela 11 - Informações Técnica do Suporte da Ferramenta de corte
Fonte: (SANDVIK, 2019)

As faixas dos parâmetros de corte recomendados pelo fabricante da ferramenta utilizada neste trabalho são: V_c = 285 m/min a 440 m/min, *f* = 0,15 a 0,5 mm/rot, e *ap* 0,5 a 5 mm.

Para todos os ensaios os parâmetros de corte utilizados foram selecionados com base nas recomendações do fabricante da ferramenta. Todas as variáveis foram ensaiadas abordando as condições de lubri-refrigeração a Seco, MQL e MQL + grafite.

Para o ensaio de determinação de desgaste da ferramenta de corte, conforme recomendado pela norma ISO 3685 (1993), foram considerados os parâmetros: Velocidade de corte, percurso de corte e tempo total de trabalho. Foi selecionado os parâmetros de corte que propiciaram um desgaste da ferramenta nos testes de análise da superfície, sendo *Vc* 360m/min, *f* = 0,06 mm/rot e *ap* = 0,5 mm, sendo 4 passes de desbaste no tempo de corte de 2 minutos em cada um, conforme representado na Tabela 13.

3.2.3. Sistema de Lubrificação MQL

Foram utilizados 3 tipos de lubri-refrigeração (seco, com fluido de corte e fluido de corte + grafite). Para ambos os sistemas MQL foi utilizado fluido de corte sintético (Quimatic® Super Fluido 3) armazenado em um recipiente aberto e aplicado por meio de dois bicos nebulizadores, modelo Nebulizador V Tapmatic. O conjunto de MQL é composto pelos itens representados na Figura 23.

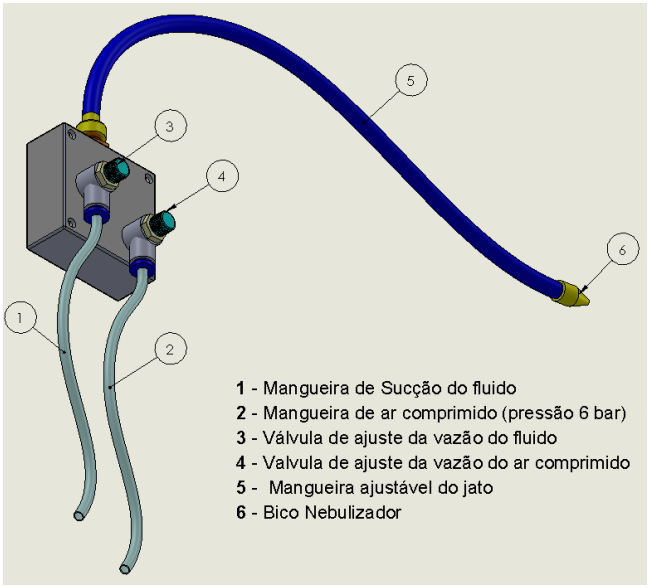
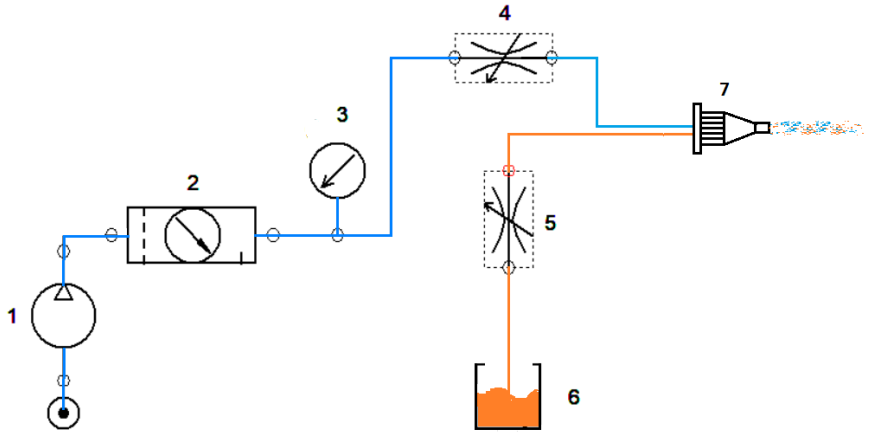


Figura 23 - Conjunto MQL
Fonte: Autor

O funcionamento do MQL ocorre a partir da sucção do fluido de corte pela mangueira (1) pelo efeito de Venturi, devido à baixa pressão gerada nesta mangueira em consequência do ar comprimido em que a mangueira (2) é alimentada, que em conjunto é transportado por uma mangueira flexível (5) até bico o nebulizador (6). A taxa de vazão do fluido de corte foi de 4 ml/min e controlada pelas válvulas reguladoras (3 e 4) e o spray de fluido de corte pulverizado, pelo bico nebulizador (6) posicionado aproximadamente 40mm da ponta de corte da ferramenta e com uma pressão de 6 bar.

Os valores utilizados foram baseados em outros ensaios executados por outros pesquisadores utilizando o MQL, conforme apresentado no Capítulo II, Tabela 7 e nos pré-testes executados. Os ajustes da vazão e pressão do MQL foram realizados antes da execução dos ensaios em uma bancada e constatou-se que a pressão utilizada, além de proporcionar o jato de spray do fluido, também evitou o entupimento dos bicos podendo observar que valores baixos de pressão proporcionou o entupimento do bico.

Esquematicamente, a Figura 24 apresenta o conjunto de alimentação do fluido e ar comprimido do MQL utilizado:



1 – Compressor de ar
2 – Lubrefil
3 – Manômetro
4 – Válvula de ajuste de vazão do ar
5 – Válvula de ajuste da pressão do ar
6 – Reservatório de fluido
7 – Bico Nebulizador (spray)

Figura 24 - Conjunto MQL
Fonte: Autor

A solução utilizada para o sistema MQL + lubrificante Sólido continha a proporção de 10% em peso de Grafite e granulometria média de 20µm armazenado no recipiente (6), conforme mostra a Figura 24. Durante a utilização do grafite, para garantir a sua homogeneização na nevoa, foi necessário a constante agitação da solução, evitando a sua decantação no reservatório. Como também apresentado por Moura (2017), as partículas menores tendem a se depositar no fundo do tanque, fazendo com que ocorra a falta de lubrificante sólido durante a usinagem. Este problema foi observado após 5 min de usinagem, sendo necessário agitar a solução ao início de cada teste.

Para melhor ação do sistema MQL, o nebulizador foi direcionado de forma que os jatos de pressão com lubrificante líquido e sólido alcançassem a interface de corte, entre a ponta da ferramenta e peça no momento de torneamento, proporcionando melhor eficiência da refrigeração e melhor facilidade de remoção do cavaco, ou seja, na superfície de saída e no flanco da ferramenta de corte.

Como mostra a Figura 25, o direcionamento dos bicos estão a 90° e 45° da ponta de corte em relação ao sentido de avanço da ferramenta. Foi determinado esse posicionamento através de consultas em pesquisas como apresentado na Tabela 7 e por testes preliminares que obtiveram melhores resultados quanto ao direcionamento do MQL nessas condições.

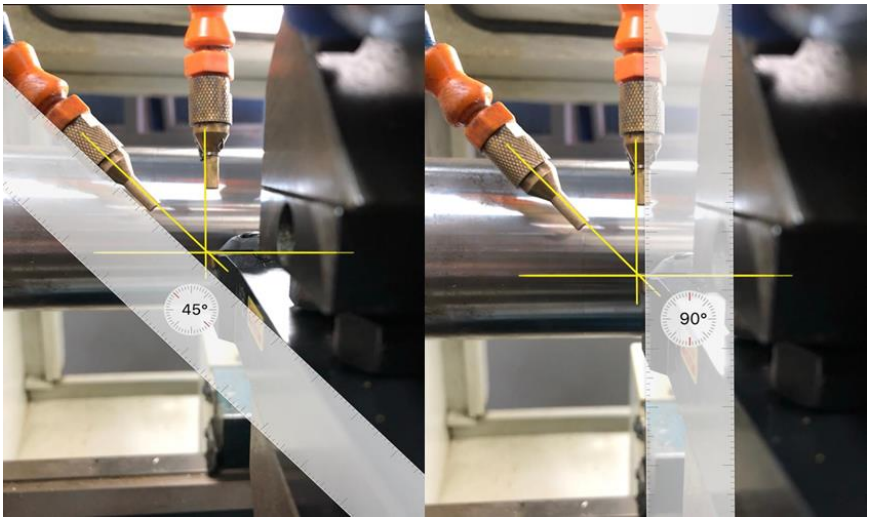


Figura 25 - Posicionamento dos Bicos Nebulizadores ângulo de 45° e 90°
Fonte: Autor

Foi possível identificar que, o mal posicionamento do bico nebulizador pode gerar inúmeros problemas no processo de torneamento, entre eles se destaca o acúmulo de cavacos sobre a ferramenta. Este acumulo pode impedir que o fluxo MQL chegue até a interface cavaco-ferramenta-peça, conhecido como fenômeno “Guarda-Chuvas”, devido ao embaraço do cavaco na peça, impossibilitando sua ação no processo, conforme evidenciado na Figura 26.

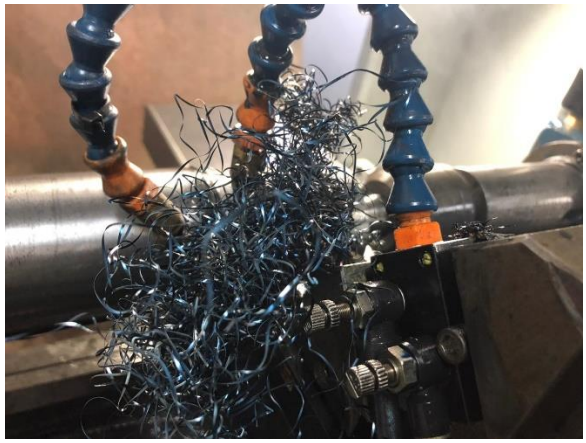


Figura 26 - Efeito guarda-chuvas durante o torneamento do aço SAE 8640
Fonte: Autor

3.2.4. Rugosímetro

Para realizar as medições de superfície do corpo de prova, foi utilizado o Rugosímetro portátil Mitutoyo, modelo Surftest SJ 201. Os parâmetros analisados foram R_a (desvio aritmético médio de perfil), e R_t (altura do perfil), de acordo com a Norma ABNT ISO 4287 (2002).

Após a execução dos ensaios de torneamento nas condições de lubri-refrigeração abordado na Tabela 13, foram executadas as medições de rugosidade. O comprimento de torneamento para cada parâmetro de usinagem foi de 100 mm. Conforme a Norma ABNT NBR ISO 4287 (2002), o Rugosímetro foi configurado com *cut-off* igual a 0,8 mm. As leituras para cada condição foram executadas em 6 pontos distanciados um do outro, especificamente a 60º em todo o diâmetro da peça.

A medição da Rugosidade ocorreu logo após o torneamento em cada uma das condições de usinagem na sequência apresentada anteriormente, sendo necessário abordar o processo de torneamento, executar a limpeza da superfície usinada, instalar o rugosímetro e executar a leitura. A medição da rugosidade foi realizada na peça montada na máquina-ferramenta.

Com o objetivo de evitar quaisquer influências nos valores encontrados na Rugosidade da superfície usinada, para cada uma das condições de usinagem foi utilizada uma ferramenta de corte nova.

3.3. Ensaios de Usinagem

Para melhor organização dos ensaios, eles foram divididos em partes de execução, a sequência de torneamento foram a Seco, MQL e MQL + Grafite. No planejamento dos ensaios foram consideradas as condições dos parâmetros que seriam avaliados em cada teste, sendo na condição de usinagem a Seco, MQL e MQL + Grafite com as três variáveis de entrada como a Velocidade de corte, Profundidade de Corte e Avanço, obtendo como variável de resposta de interesse a Rugosidade da superfície da peça, o desgaste da ferramenta, e a formação do cavaco, como serão abordados em seguida.

Para representar de forma geral, a Tabela 12 aborda todos os equipamentos, máquinas e ferramentas utilizadas nos ensaios, então a Tabela 13 mostra os parâmetros de usinagem utilizados nos ensaios.

Máquina Ferramenta	
Característica	Torno CNC ROMI Centur 30D, 4000 rpm
Material da peça	Aço SAE 8640
Dureza	52 HRC
Corpo de Prova	Ø 75 X 220 mm
Ferramenta de Corte	TNMG 16 04 08-PM 4325
Revestimento	CVD TICN + AL2O3 + TIN
Raio de Ponta	0,80 mm
Suporte da Ferramenta	DT JNR 2525M 16
Fluido de corte	Óleo integral, sintético, Quimatic® Super Fluido 3
Lubrificante Sólido	10 % em peso de lubrificante sólido com Super Fluid 3
Grafite	GR (20 µm) 99 % pureza
Sistema MQL	Nebulizador V Tapmatic
Pressão	6 bar
Vazão	4 ml/min
Rugosímetro	Mitutoyo - Surftest SJ 201
Microscópio	Microscópio Metalografico Trinocular Objetivas de 20X, 40X e 100X
	Microscópio Digital Usb Zoom 1000x Hd Câmera 2.0 Mp

Tabela 12 - Equipamentos, máquinas e Ferramentas utilizadas nos ensaios
Fonte: Autor

Parâmetros de Corte	**Ensaio de Análise de Superfície**
Velocidade de corte (V_c)	150, 220, 290, 360 m/min
Avanço (f)	0,01 e 0,06 mm/rot
Profundidade de corte (a_p)	0,5 mm
Lubri-refrigeração	Seco, MQL, MQL + Lubrificante Sólido
	Ensaio Desgaste da Ferramenta
Velocidade de corte (V_c)	360 m/min
Avanço (f)	0,06 mm/rot
Profundidade de corte (a_p)	0,5 mm
Lubri-refrigeração	Seco, MQL, MQL + Lubrificante Sólido
Tempo de Corte	2 min.
Lubrificante Sólido	10 % em peso de lubrificante sólido com Super Fluid 3
Grafite	GR (20 µm) 99 % pureza

Tabela 13 - Parâmetros experimentais
Fonte: Autor

As velocidades de corte e taxas de avanço foram selecionadas com base nas recomendações do fabricante da ferramenta para o material da peça usada. Estas condições são típicas para operações de acabamento utilizadas na indústria. Conforme apresentado nas Tabela 14 e Tabela 15, para o planejamento dos ensaios, eles foram classificados abordando as três condições de Lubri-refrigeração.

Ensaio	Lubri-refrigeração	*Vc* (m/min)	*f* (mm/rot)	Variável Avaliada
1	Seco	360	0,01	
2	Seco	290	0,01	
3	Seco	220	0,01	
4	Seco	150	0,01	
5	Seco	360	0,06	
6	Seco	290	0,06	
7	Seco	220	0,06	
8	Seco	150	0,06	
9	MQL	360	0,01	
10	MQL	290	0,01	
11	MQL	220	0,01	Rugosidade da Superfície,
12	MQL	150	0,01	Características do Cavaco
13	MQL	360	0,06	(forma, tipo, coloração,
14	MQL	290	0,06	grau de recalque)
15	MQL	220	0,06	
16	MQL	150	0,06	
17	MQL + Grafite	360	0,01	
18	MQL + Grafite	290	0,01	
19	MQL + Grafite	220	0,01	
20	MQL + Grafite	150	0,01	
21	MQL + Grafite	360	0,06	
22	MQL + Grafite	290	0,06	
23	MQL + Grafite	220	0,06	
24	MQL + Grafite	150	0,06	

Tabela 14 - Planejamento dos experimentos para medição de rugosidade
Fonte: Autor

Ensaio	Condição	Diâmetro (mm)	Variável Resposta
1	Seco	66,5	
2	Seco	66,0	
3	Seco	65,5	
4	Seco	65,0	
5	MQL	64,5	
6	MQL	64,0	Desgaste da Ferramenta
7	MQL	63,5	de Corte (µm)
8	MQL	63,0	
9	MQL + Grafite	62,5	
10	MQL + Grafite	62,0	
11	MQL + Grafite	61,5	
12	MQL + Grafite	61,0	

Tabela 15 - Planejamento dos experimentos para desgaste da Ferramenta de corte
Fonte: Autor

Para execução do torneamento no Torno CNC, inicialmente foi feito uma programação utilizando o programa CNC 2D, com linguagem MACH 9 para simular o processo de torneamento do aço SAE 8640. A Figura 27 apresenta o layout da peça na área de programação com suas respectivas referencias dimensionais:

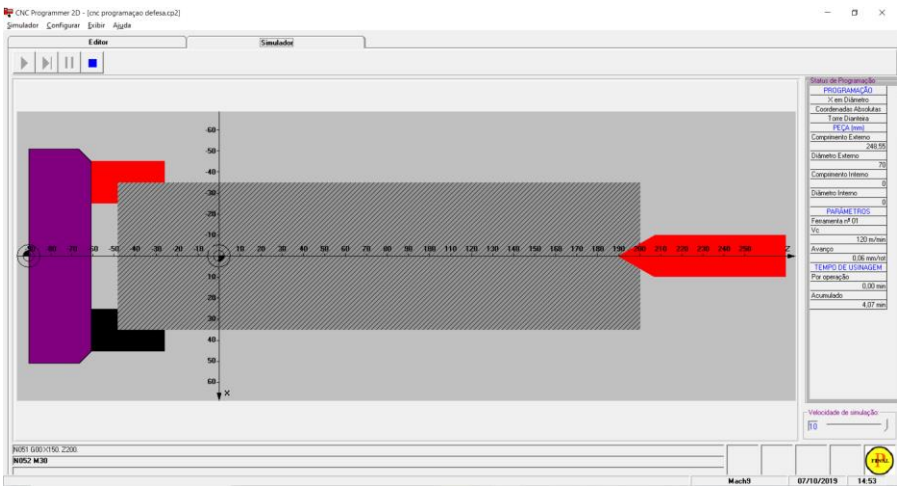


Figura 27 - Área de simulação do torneamento - Software CNC2D
Fonte: Autor

3.3.1. Análise de desgaste da ferramenta de corte

Após os testes iniciais, as ferramentas de corte foram monitoradas através da microscopia para análise dos tipos de desgaste e medição do desgaste de flanco. Para a análise, foi utilizado um microscópio Modelo Digital Usb Zoom 1000x, Hd, Câmera 2.0 Mp e uma mesa de iluminação, conforme representado na Figura 28.

Figura 28 - Digital Usb Zoom 1000x Hd Câmera 2.0 Mp e mesa de iluminação
Fonte: Autor

Como critério para análise do desgaste da ferramenta de corte foi estabelecido o tempo de usinagem de 8 minutos em cada uma das condições de usinagem: Seco – MQL – MQL + Lubrificante Sólido, sendo dividido em 4 passes de desbastes para cada uma das condições de lubri-refrigeração.

Durante a medição do desgaste do flanco, a superfície de folga da ferramenta de corte foi posicionada perpendicularmente ao eixo do microscópio para medição correta do desgaste, conforme mostra a Figura 29, visando uma análise da ferramenta em três posições, denominadas como: (a) vista superior (b) vista frontal, (c) vista lateral e todas como referência a ponta de corte da ferramenta.

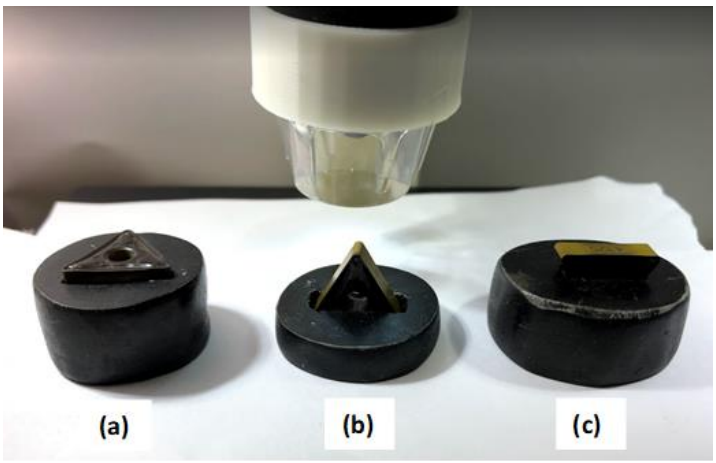


Figura 29 - Posições de avaliação do desgaste da ferramenta de corte
Fonte: Autor

Devido ao desgaste de nariz ter prevalecido nos ensaios de desgastes de ferramenta nas condições de usinagem propostas, foi adotado a posição vista frontal (b) - conforme representado na Figura 29 - para melhor compreensão dos resultados encontrados.

3.3.2. Características do Cavaco

A caracterização dos cavacos constitui no registro da forma, tipo e colocação através de fotografia e também análise do grau de recalque e de medição da espessura do cavaco.

Os cavacos utilizados nesta etapa foram obtidos nos testes de análise da superfície usinada, considerando todos os parâmetros apresentados na Tabela 14. Para a classificação da forma, tipo e colocação, foi utilizado máquina fotográfica digital Sony Dsc-W830, com 20.1 megapixels, régua de aço com faixa nominal de 300 mm e resolução de 1 mm.

Na medição da espessura dos cavacos, foi utilizado um Micrômetro digital Mitutoyo, com resolução de 0,001 mm. Foram efetuadas cinco medições em cada cavaco, de cada condição estudada. O cálculo do grau de recalque foi realizado através da equação 3.1:

$$Rc = \frac{\mathrm{h}'}{f.sen\,\mathrm{Xr}}$$

Eq. (3.1)

Onde o h’ representa a espessura do cavaco medida, f representa o avanço e Xr o ângulo de posição inicial.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados dos experimentos realizados para analisar a rugosidade da superfície e desgaste da ferramenta de corte. Considerando as variações da velocidade de corte e o avanço em todas as condições de lubri-refrigeração estudadas – Seco, MQL e MQL + Lubrificante Sólido, obteve-se as variáveis de resposta: acabamento da superfície usinada, desgaste da ferramenta de corte e as características dos cavacos.

4.1. Rugosidade

Após a definição e execução dos testes propostos na Tabela 14 e medidos os valores de rugosidade média (Ra) e Rugosidade total (Rt) em função da velocidade de corte e avanço nas três condições de Lubri-refrigeração (Seco, MQL e MQL + Grafite), estão apresentados na Tabela A (Apêndice A) e para facilitar a visualização, interpretação e análise dos resultados, os valores de Ra e Rt são apresentados respectivamente nas Figuras 30 e 31.

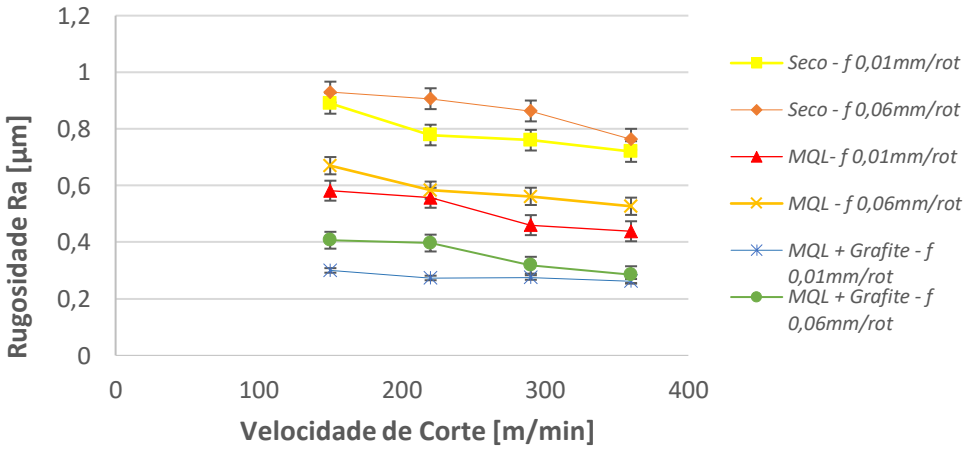


Figura 30 - Parâmetro de Rugosidade Ra em Função da Velocidade de corte nas condições de lubri-refrigeração (Seco, MQL, MQL + Grafite), nas condições de corte de (f = 0,01 e 0,06 mm/rot e ap 0,5mm)
Fonte: Autor

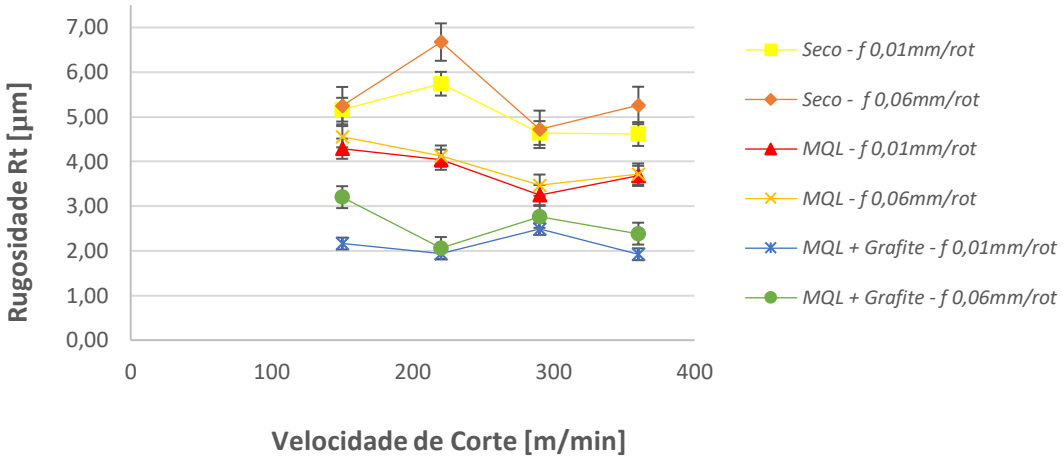


Figura 31 - Parâmetro de Rugosidade Rt em Função da Velocidade de corte nas condições de lubri-refrigeração (Seco, MQL, MQL + Grafite), nas condições de corte de (f = 0,01 e 0,06 mm/rot e ap 0,5 mm)
Fonte: Autor

A partir dos resultados apresentados na Figura 30, é possível observar que para todos os parâmetros de usinagem houve uma tendência de linearidade da rugosidade Ra sobre a variação da Velocidade de corte, Avanço e tipo de lubri-refrigeração.

A condição à seco apresenta os maiores valores de Rugosidade Ra e Rt.

Nos resultados apresentados foi possível observar que o aumento da velocidade de corte causa a redução dos valores da rugosidade tanto Ra quanto Rt.

Entre as condições de MQL, a adição de grafite proporcionou os menores valores de Rugosidade Ra e Rt.

Neste sentido, vale observar que o desempenho de corte no torneamento na condição MQL foi melhor comparando com a usinagem a seco, pois a condição MQL possivelmente ofereceu os benefícios na redução da temperatura de corte**,** como resultados semelhantes apresentados pelos autores levantados na Tabela 7.

Esse resultado também foi apresentado por Hadad e Sadeghi (2013), no processo de torneamento do aço AISI 8640, constando que na condição MQL houve uma redução de 30% na Rugosidade da superfície usinada, onde a função de lubrificação foi assegurada pelo óleo e a função de resfriamento fornecida principalmente pelo ar comprimido, conforme apresentado pelo autor.

Como também observado por Dhar, Ahmed e Islam (2007) na usinagem do aço SAE 8640, no estudo abordando a condição de usinagem a Seco e MQL, constatou-se que o jato de alta pressão de óleo do MQL, quando aplicado na interface cavaco-ferramenta, influenciou na redução da temperatura de corte, que por sua vez reduziu o desgaste da ferramenta proporcionando melhores resultados da rugosidade média *Ra,* comparando com as demais condições estudadas pelos autores.

Observa-se que ao acrescentar o grafite, a rugosidade diminui, considerando que ao utilizar o mesmo volume de fluido, a temperatura não foi um fator decisivo nesta redução (de MQL para MQL+ grafite). Por outro lado, é uma evidência que, de fato, o MQL tem uma ação importante como lubrificante, tanto que o grafite reduziu a rugosidade Ra em tantos 59%.

Os valores de rugosidade Ra ficaram entre 0,26 a 0,91μm e rugosidade Rt 1,92 a 6,67μm, sendo os menores valores obtidos na condição MQL + Grafite e maiores na condição de usinagem a seco. Os valores observados apresentam diferença significativa com a adição do grafite, sendo favoráveis para indústria visto que o aço SAE 8640 é utilizado em processos que necessitam de valores baixos da Ra como rolamentos, engrenagens e eixos.

Para verificar se a redução da rugosidade na condição MQL com adição do grafite foi relevante, é importante identificar em quais classes de rugosidade do sistema “N” presentes na norma NBR: 8404:1984 representado na Tabela 16, se encontram os valores de Ra obtidos.

Classes de rugosidade	**N1**	**N2**	**N3**	**N4**	**N5**	**N6**	**N7**	**N8**	**N9**	**N10**	**N11**	**N12**
Rugosidade Ra [μm]	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50
Processo de Usinagem			**Retificação / Torneamento**									

Tabela 16 - Classes de Rugosidade
Fonte: NBR 8404 (1984)

Analisando os valores da rugosidade média Ra obtidos nesse trabalho (Seco – Ra = 0,72 μm, MQL - Ra 0,44 μm e MQL + Grafite – Ra = 0,26 μm) com as classes da Tabela 16, percebe-se que os valores de rugosidade estão dentro das classes N6, N5 e N4, respectivamente. Na condição utilizando o grafite como lubrificante sólido, os resultados estão contidos dentro da melhor classe esperada para a 360 m/min de Velocidade de corte.

A rugosidade Ra e rugosidade Rt obtida na condição MQL + Grafite apresentaram menores valores comparando nas condições MQL e Seco, podendo ser explicado pela ação da mistura do grafite, agindo com suas propriedades lubrificantes inerentes, amenizando o atrito na zona de cisalhamento juntamente com a ação refrigerante do fluido com o ar comprimido, comprovando sua atuação como lubrificante sólido. Devido suas propriedades e fracas forças de ligação *(Van der Waals)* entre as lamelas, permite facilmente ocupar as ranhuras e irregularidades superficiais da peça, formando um filme lubrificante na superfície e minimizando o atrito e o desgaste prematuro (WYPYCH, 2014).

4.2. Desgaste da ferramenta de corte

O desgaste da ferramenta de corte foi avaliado em termos de tempo de usinagem, de acordo com os critérios apresentado na Tabela 15. O desgaste que prevaleceu nas condições analisadas foi o desgaste de flanco.

Na Figura 32 são apresentadas as curvas com a evolução do desgaste da ferramenta de corte em função do tempo de usinagem para todas as condições de lubri-refrigeração aplicada para Vc de 360 m/min, f de 0,06 mm/rot e ap de 0,5mm.

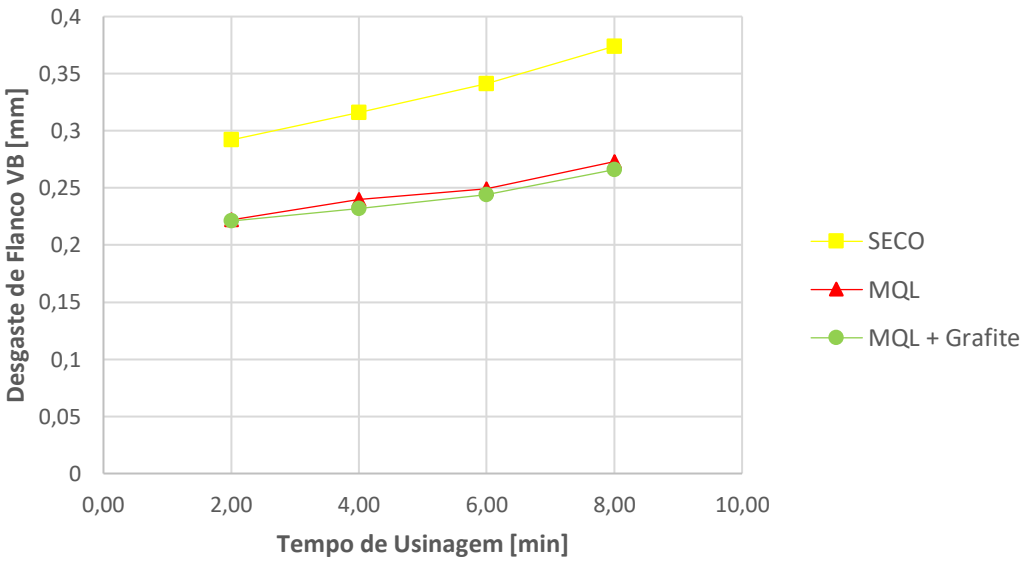


Figura 32 - Evolução do desgaste de Flanco (Vb) ao longo da vida da ferramenta de corte com Vc de 360 m/min, f de 0,06 mm/rot e ap de 0,5 mm
Fonte: O autor

A Figura 33 apresenta a evolução da rugosidade Ra ao longo da vida da ferramenta de corte para as três condições de lubri-refrigeração para uma Vc de 360 m/min, f de 0,06 mm/rot e ap de 0,5 mm.

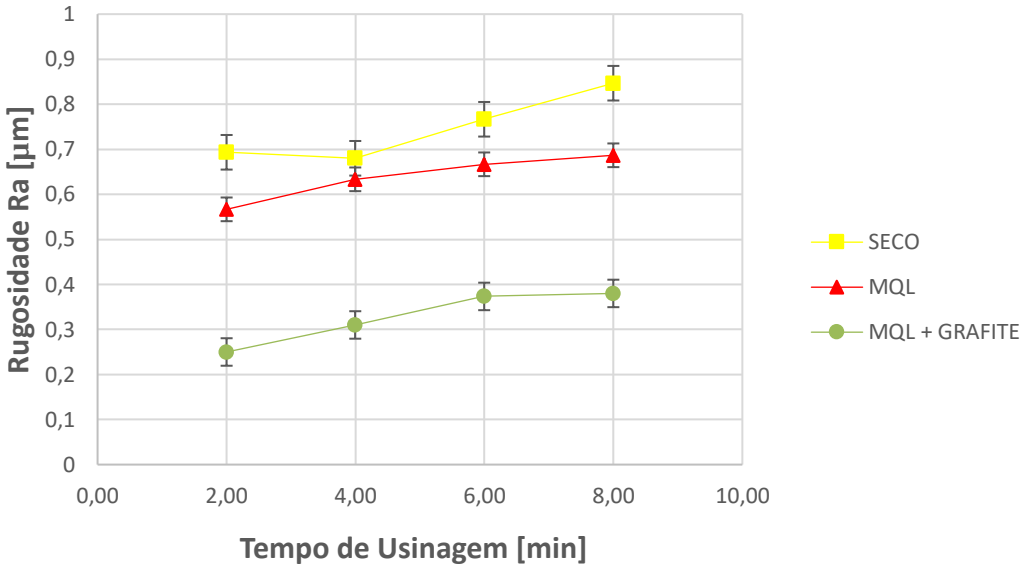


Figura 33 - Evolução da rugosidade Ra ao longo da vida da ferramenta de corte com Vc de de 360 m/min, f de 0,06 mm/rot e ap de 0,5 mm
Fonte: Autor.

Normalmente o desgaste da ferramenta de corte é caracterizado em três estágios. O primeiro estágio há um aumento acelerado do desgaste da ferramenta de corte, natural ao sistema tribológico envolvido. No segundo estágio, a taxa de desgaste é basicamente constante ao logo do tempo e no terceiro estágio ocorre uma aceleração acentuada na taxa de desgaste podendo promover, em um curto espaço de tempo, o colapso da ferramenta Machado *et al.* (2015). Dessa forma, a Figura 33, destaca o segundo estágio ocorrido na ferramenta de corte, não alcançando o 3° estagio, devido os parâmetros estabelecidos para o desenvolvimento dessa análise.

Observa-se na Tabela 17, o método MQL e MQL + Grafite apresentaram comportamentos semelhantes na evolução do desgaste do flanco. Entre esses métodos houve aproximadamente uma redução de 11% do desgaste devido a ação do grafite como lubrificante sólido.

Para facilitar a interpretação dos resultados, na Tabela 21 são apresentadas as fotografias ilustrativas da evolução do desgaste do flanco para as condições de lubri-refrigeração estudadas.

Nos testes de análise de Rugosidade do aço SAE 8640, os resultados mostraram que o grafite proporcionou redução nos valores de Ra e Rt, porém nos testes de análise de desgaste da ferramenta de corte, nota-se que aplicando óleo puro no método MQL e com a adição de grafite não houve uma redução significativa no desgaste da ferramenta, como observado nos testes de análise da rugosidade.

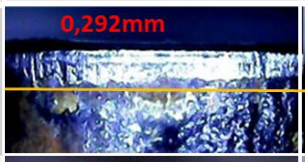
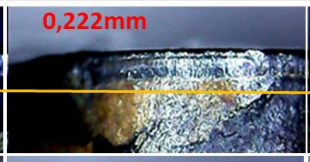
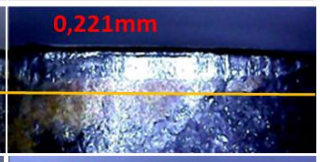
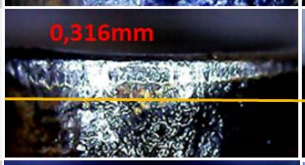
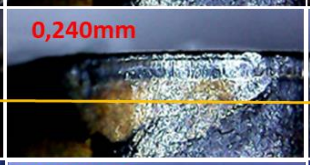
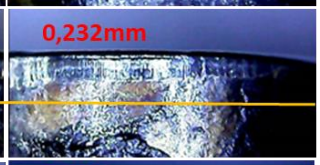
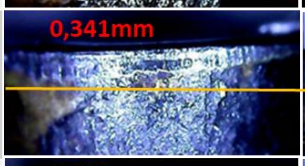
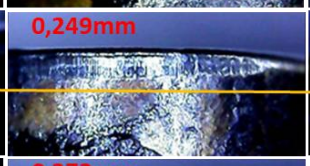
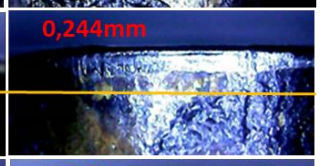
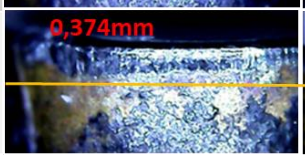
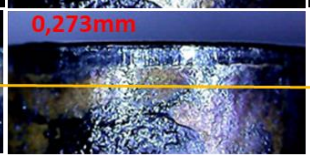
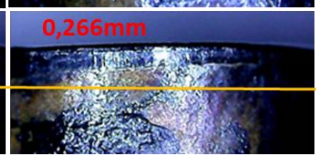
Tempo de corte (min)	SECO	MQL	MQL + GRAFITE
2 min			
4 min			
6 min			
8 min			

Tabela 17 - Monitoramento da evolução do desgaste da ferramenta de corte nas três condições de lubri-refrigeração (SECO, MQL, MQL + Grafite)
Fonte: O autor.

Observa-se nos resultados apresentados na Tabela 17, que nas condições a seco e MQL + Grafite houve um desgaste da ferramenta de corte de 0,85 μm para primeira condição observada e 0,38 μm na condição MQL + grafite. Uma redução média de 47% no tempo total de usinagem determinado no experimento.

A justificativa para esse desempenho, utilizando o grafite como lubrificante sólido no torneamento do aço SAE 8640, possibilitou a formação de uma película na peça, que possivelmente reduziu o atrito entre a interface ferramenta-peça reduzindo o desgaste da ferramenta de corte, como também encontrado por Hadad e Sadeghi (2013), Paul e Varadarajan (2013), Rahim *et al.* (2015), Ojolo, Damisa e Ikekilo (2011).

4.3. Características do cavaco

Devido a importância do cavaco nos processos de usinagem, os mesmos foram recolhidos e identificados após cada teste. Nas Tabelas 18 e 19 estão apresentados fotografias dos cavacos característico para cada condição de usinagem em função da velocidade de corte e tipo de lubrificante, respectivamente para os avanços de 0,01 e 0,06 mm/rot.

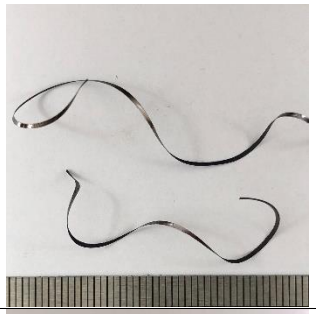
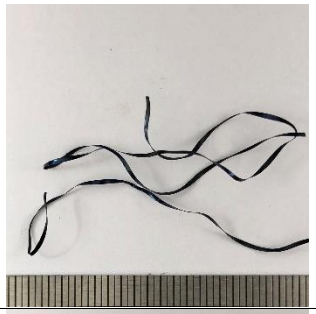
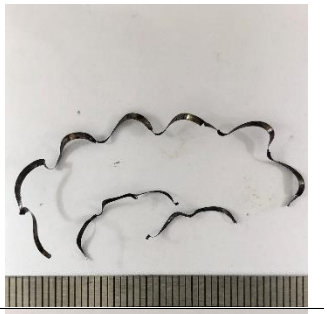
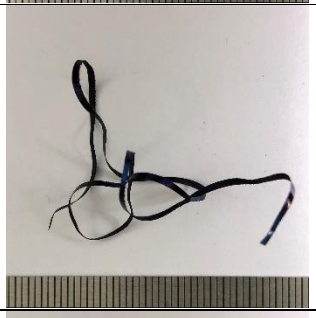
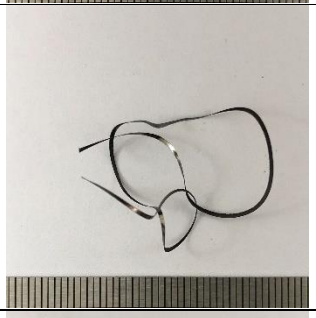
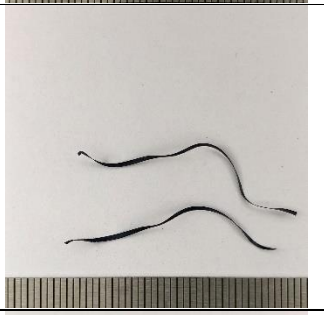
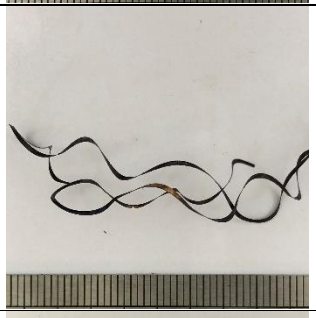
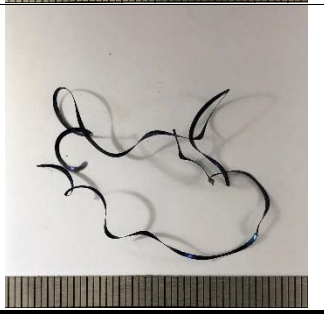
Vc (m/min)	Seco	MQL	MQL + Grafite
360			
290			
220			
150			

Tabela 18 - Influência da Velocidade de corte e do tipo de lubri-refrigeração para o avanço de 0,01 mm/rot sobre a formação do cacavo
Fonte: Autor

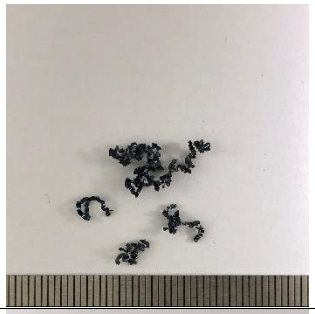
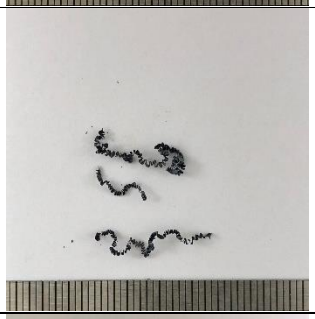
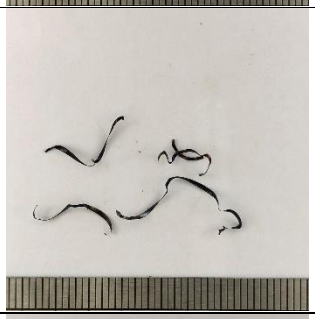
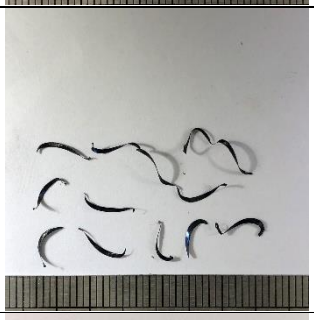
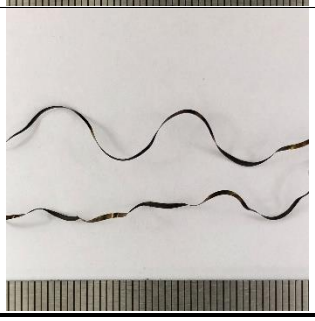
Vc (m/min)	Seco	MQL	MQL + Grafite
360			
290			
220			
150			

Tabela 19 - Influência da Velocidade de corte e do tipo de lubri-refrigeração para o avanço de 0,06 mm/rot sob a formação do cavaco
Fonte: Autor

De maneira geral, o tipo de cavaco prevalecido para todas as condições de lubri-refrigeração foi o contínuo. Em algumas condições estudadas, a forma dos cavacos em arco solto, possivelmente ocorreu devido à quebra periódica quando, durante a sua formação, encontram a superfície da peça a ser usinada e a superfície de folga principal, como também observado por Costa (2014), ocorrendo também pela ação do jato de pressão proporcionado pelo MQL.

Observa-se nas Tabelas 18 e 19, que em relação ao avanço, o comportamento do cavaco está de acordo com o esperado, ou seja, um aumento do avanço provoca a formação de cavacos mais curtos (MACHADO e DA SILVA, 2004). Com o aumento da velocidade de corte, o cavaco tende a se formar em fita, tubular e espiral. Isto ocorre porque em velocidades de cortes maiores, o calor gerado também é maior, facilitando a usinagem devido a redução da resistência ao cisalhamento da peça.

A classificação da forma dos cavacos foi realizada segundo a norma ISO 3685 (1993) esta apresentado nas Tabelas 20 e 21.

Vc (m/min)	Seco	MQL	MQL + Grafite
360	Fita emaranhado	Fita emaranhado	Fita longo
290	Fita emaranhado	Fita longo	Fita longo
220	Fita longo	Fita emaranhado	Fita longo
150	Tubular emaranhado	Fita curto	Fita emaranhado

Tabela 20 - Classificação da forma do cavaco segundo a Norma ISO 3685 (1993), do aço SAE 8640, no avanço de 0,01 mm/rot
Fonte: Autor

Vc (m/min)	Seco	MQL	MQL + Grafite
360	Tubular longo	Arco solto	Arco solto
290	Tubular longo	Fita longo	Arco solto
220	Arco solto	Fita emaranhado	Arco solto
150	Fita emaranhado	Fita longo	Arco solto

Tabela 21 - Classificação da forma do cavaco segundo Norma ISO 3685 (1993), do aço SAE 8640 no avanço de 0,06 mm/rot
Fonte: Autor

Constata-se que os cavacos são liberados em uma condição praticamente seca nas condições MQL e MQL+ Lubrificante sólido, que podem contribuir para a sua reciclagem, isso faz com que a quantidade mínima de lubrificação seja uma alternativa interessante, porque combina a funcionalidade de resfriamento com um consumo extremamente baixo de fluidos, reduzindo custos de reciclagem e impactos ambientais.

Esse resultado de obtenção de cavacos praticamente secos, corroboram com os resultados de melhor rugosidade da superfície da peça, utilizando o MQL + grafite e também contribui para uma alternativa, a fim de restringir o uso de grandes quantidades de fluido de corte no processo de usinagem.

Como apresentado na literatura, um forte indicativo das temperaturas nos cavacos pode ser observado através da sua coloração que normalmente é cinza, marrom ou azul, promovido poucos segundos após serem produzidos pela formação de uma fina camada de óxido (MACHADO e DA SILVA, 2004). A temperatura do cavaco, entretanto, não terá praticamente nenhuma influência na temperatura da ferramenta, porque o tempo em que uma pequena porção (lamela) passa sobre a superfície de saída da ferramenta, é muito pequeno para conduzir o calor.

Howard (1977) apresenta que a cor cinza é predominante a uma temperatura de aproximadamente 200 ºC, a coloração marrom entre 200 ºC a 570 ºC e a cor azulada em temperaturas acima de 570 ºC.

Através da análise da colocação dos cavacos obtidos no processo de torneamento do aço SAE 8640 em cada ensaio nas três condições de lubri-refrigeração, observa-se a permanência da coloração azul praticamente em todos os cavacos da condição de usinagem a seco e a grande parte dos cavacos obtidos nas condições MQL e MQL + grafite na colocação azul como apresenta a Figura 34a coloração marrom como apresenta a Figura 34b.

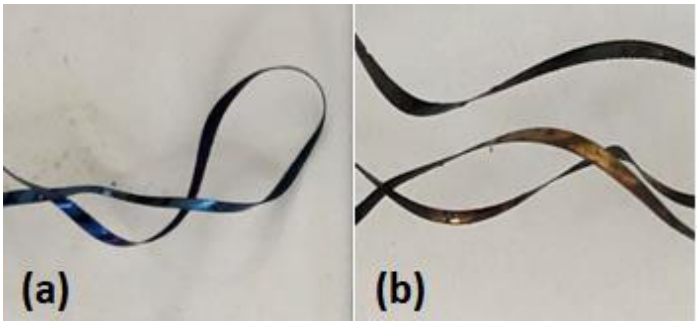


Figura 34 - Coloração dos cavacos obtidos nos testes de Rugosidade: (a) azul (b) marrom
Fonte: Autor

Isso se justifica na condição seca, por não ocorrer nenhuma refrigeração devido ausência do fluido de corte, e nas condições MQL e MQL + grafite, a pouca eficiência da refrigeração no processo de torneamento.

4.3.1. Grau de recalque dos cavacos

Os valores de grau de recalque em função da velocidade de corte e tipo de lubri-refrigeração são apresentados na Tabela 22. Verifica-se através dos ensaios realizados que a espessura do cavaco h’ é maior que a espessura de corte do material a ser removido h (MACHADO e DA SILVA, 2004).

Vc (m/min)	Seco		MQL		MQL + Grafite	
	0,01 mm/rot	0,06 mm/rot	0,01 mm/rot	0,06 mm/rot	0,01 mm/rot	0,06 mm/rot
360	1,32	1,36	1,27	1,36	1,11	1,18
290	1,38	1,89	1,36	1,35	1,24	1,58
220	1,94	1,94	1,31	1,41	1,28	1,13
150	1,46	1,96	1,35	1,35	1,10	1,32

Tabela 22 - Variação do grau de recalque nas três condições de Lubri-refrigeração no avanço de 0,01 mm/rot e 0,06 mm/rot
Fonte: Dados da desta pesquisa (2019)

Na condição de usinagem a seco, houve maiores valores de grau de recalque, onde possivelmente ocorreu o encruamento do cavaco e proporcionou, consequentemente, maior dificuldade de usinagem. Isto pode ser explicado pela alta temperatura na região da aresta de corte, devido a altas velocidades e ausência de um fluido que lubrificasse e refrigerasse a zona de corte. Em temperaturas maiores o material deforma mais, o que deve aumentar o grau de recalque (MOURA, 2017).

Observa-se que em toda a faixa de velocidade de corte, na condição MQL + Grafite, obtém-se menores valores de grau de recalque, comprovando a ação do grafite como lubrificante sólido, conforme já observado nos tópicos anteriores, alcançando os melhores resultados de rugosidade devido a sua ação de lubrificante no processo de usinagem. De acordo com as características físicas do grafite, acredita-se que as partículas dispersas conseguem penetrar entre a superfície da ferramenta e da peça, gerando um grande efeito de lubrificação, o qual influenciou em menores valores do grau de recalque nessa condição de torneamento.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesse capítulo serão apresentadas as considerações principais obtidas nesta pesquisa. Tais conclusões serão abordadas de forma genérica, uma vez que as discussões mais detalhadas foram abordadas no capítulo IV. Ainda neste capítulo, serão apresentadas sugestões para desenvolvimentos de trabalhos futuros, com objetivo de maior investigação no torneamento do aço SAE 8640, utilizando o grafite como lubrificante sólido.

5.1. Conclusões

Com os resultados obtidos na análise dos experimentos realizados através do torneamento do aço SAE 8640 nas condições de usinagem Seco, MQL e MQL+ grafite neste trabalho, pode-se concluir que:

- O grafite como lubrificante sólido de forma geral, contribuiu para menores valores de Rugosidade Ra e redução do desgaste da ferramenta de corte durante a usinagem do aço SAE 8640.
- O acabamento da superfície usinada do aço SAE 8640 obteve um resultado melhor diante da utilização do grafite como lubrificante sólido, comparando com a condição a seco e a com apenas MQL.
- O aumento da velocidade de corte tende a reduzir os valores da rugosidade.
- Com aumento do avanço os valores da Rugosidade Ra e Rt aumentam significantemente.
- A condição a seco teve maiores valores de rugosidade e a condição MQL + Grafite, menores valores de rugosidade.
- Não houve variações significativas no desgaste da ferramenta nas três condições avaliadas (Seco, MQL, MQL + Grafite), onde o desgaste de flanco foi predominante;
- Em todas as condições de lubri-refrigeração (Seco – MQL – MQL + Grafite), as colorações dos cavacos acinzentados indicaram a temperatura do cavaco mais brandas, cavacos amarelados indicaram temperaturas intermediárias e cavacos azulados indicaram maiores temperaturas. Na condição a Seco houve a

predominância da colocação azul, devido ausência de refrigeração durante o processo de torneamento.

- Em todas as condições de lubri-refrigeração, o aumento do avanço produziu cavacos mais curtos e de maior grau de recalque.
- O grau de recalque foi menor utilizando o grafite como lubrificante sólido, sendo uma maneira de visualizar o efeito lubrificante, facilitando o corte no processo de formação do cavaco.

5.2. Sugestões de trabalhos futuros

- Avaliar o comportamento da rugosidade Ra, Rt, grau de recalque e desgaste da ferramenta de corte no torneamento do aço SAE 8640, utilizando diferentes granulometria de grafite como lubrificante sólido, para analisar a influência o comportamento dos resultados conforme diferentes granulometrias.
- Avaliar Força de usinagem no processo de torneamento do Aço SAE 8640 utilizando as condições de lubri-refrigeração (Seco, MQL, MQL + Grafite).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 4287. Rugosidade: Metódo do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. 2002.

ACAYABA, G.M.A., ESCALONA, P.M., 2015, Prediction of surface roughness in low speed turning of AISI316 austenitic stainless steel, CIRP **Journal of Manufacturing Science and Technology**, Vol. 11, p. 62-67.

ALBERDI, R; SANCHEZ, J. A; POMBO, I; ORTEGA, N; IZQUIERDO, B; PLAZA, S; BARRENETXEA, D. Strategies for optim aluse of fluids ingrinding. **International Journal of Machine Tools & Manufacture 51**, 2011, 491-499. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.02.007>. Acesso em: 30 out. 2018.

ALMEIDA, C. M. **Avaliação do desgaste da ferramenta de metal duro revestida com TiN no fresamento do aço ABNT4140 Laminado a quente e Temperado/Revenido.** 2010, 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontífica Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em < http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/EngMecanica_AlmeidaCM_1.pdf> Acesso em: 26 mar. 2019.

AMORIN, H. J. **Estudo da Relação entre Velocidade de Corte, Desgaste de Ferramenta, Rugosidade e Forças de Usinagem em Torneamento com ferramenta de Metal duro**, 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002. Disponível em: https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3791/000343470.pdf?sequence=1>. Acesso em: 15 Jan. 2019.

BANDYOPADHYAY, B.P.; ENDAPALLY, K.R. Experimental evaluation of the effect of minimum quantity lubrication in turning AISI-4140 steel. **International Conference on Computers & Industrial Engineering**, IEEE, 2009, p. 1905-1910.

BOUBEKRI, N.; SHAIKH, V.; PHILLIP, R.; FOSTER. A technology enabler for green machining: minimum quantity lubrication (MQL). **Journal of Manufacturing Technology Management,** Vol. 21, 2010, Issue: 5, 556-566. Disponível em:< https://doi.org/10.1108/17410381011046968>. Acesso em: 24 Ago. 2018.

CALISTER, D. JR; RETHWISCH, D. G; Materials Science and engineering: an introduction / 8 ed. Includes bibliographical references and index. ISBN 978-0-470-41997-7.

CARVALHO, A.R.T. **Estudo da Influência da Agitação e da Severidade de Têmpera do Meio de Resfriamento na Derterminação de Velocidades Críticas de Têmpera.** 2004, 78 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, São Luís, 2004. Disponível em: < http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/264702/1/Carvalho_AntonioRogerioTorres_M.pdf>. Acesso 12 nov. 2018.

COSTA, I. S. **Usinabilidade do aço de corte fácil baixo carbono ao chumbo ABNT 12 L14**. 2014. 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: < https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14976>. Acesso em: 04 abr. 2018.

DAMBHARE, S.; DESHMUKH, S.; BORADE, A.; DIGALWAR, A.; PHATE, M. **Sustainability Issues in Turning Process:** A Study in Indian Machining Industry. ScienceDirect 26, 2015, 379-384. Editor: Elsevier. Disponível em: < https://ac.els-cdn.com/S2212827114009056/1-s2.0-S2212827114009056-main.pdf?_tid=d491f26f-b736-4189-9e77-b31364f60ab&acdnat=1540817720_be639d8443bffbadd1266951877d6f58>. Acesso em: 24 ago. 2018.

DE PAULA, T. R; BENINI, L. Influência da Velocidade do processo de torneamento nos resultados de rugosidade do aço ABNT 1020. JCEC/REC² Journa, 3, 2017, 013-015. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/14009/196-1248-1-PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso: jun. 2019.

DEVERAS, A. M. **Estudo da rugosidade superficial no torneamento do aço AISI 8640 com ferramenta alisadora e convencional**, 2017, 1-15. Editora: Revista Ténico-Científica do CREAR-PR. Disponível em: < http://creaprw16.crea-pr.org.br/revista/sistema/index.php/revista/article/view/266/147> Acesso em: 12 jan. 2019.

DHAR, N.R.; AHMED, M.T.; ISLAM, S. An experimental investigation on effect of minimum quantity lubrication in machining AISI 1040 steel. **International Journal of Machine Tools & Manufacture 47**, 2007, 748-753. Disponível em:< https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695506002288?via%3Dihub>. Acesso em: 08 abr. 2018.

DILBAG, S; RAO, P. V. Performance improvement of hard turning with solid lubricants, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 38, 2008, 529-535. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-007-1079-8>. Acesso em: 20 out. 2018.

DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos Materiais.** 8. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2001. 272 p.

EBBRELL, N. H; WOOLLWY, Y.D; ALLANSON, W.B; ROWE, W.B. The effects of cutting fluid application methods on the grinding process. **International Journal of Machine Tools & Manufacture 40** 2000, 209-223. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00060-7>. Acesso em: 10 mai. 2018.

EKER, B; EKICI,B; KURT, M; BAKIR, B. Sustainable machining of the magnesium alloy materials in the CNC lathe machine and optimization of the cutting conditions, **MECHANIKA**, 20 (3), 2014, 310-316. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/276048116>. Acesso em 30 set. 2019.

ERDEMIR, A. In: BRUHAN, B. (Ed.) **Modern Tribology Handbook:** CRC Press, V.II, 2001. p.787-825.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 12ª Edição, 2006, 751p.

FREITAS, B. M; et *al.* **Beneficiamento do aço SAE 8640 sob tratamentos térmicos**. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 2016, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2016a. Disponível em: < http://www.confea.org.br/media/contecc2016/mecanica/beneficiamento%20do%20a%C3%A7o%20sae%208640%20sob%20tratamentos%20t%C3%A9rmicos.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2018.

FREITAS, T. C; FREITAS, S; BRANDÃO, L. C; COELHO, W. Monitoramento da Rugosidade no torneamento do aço SAE 52100 utilizando superfície resposta. In: 9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2016b, Joinville. **Anais...** Joinville. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/319995868_MONITORAMENTO_DA_RUGOSIDADE_NO_TORNEAMENTO_DO_ACO_SAE_52100_UTILIZANDO_SUPERFICIE_DE_RESPOSTA>. Acesso em: 18 mar. 2019.

FURNES, R; STOLL, A; NORDSTROM, G; KLOSINKI, R. Minimum quantity lubrication (mql) machining For complex powertrain componentes. In: International Conference on Manufacturing Science and Engineering ASME, 2006, Ypsilanti. **Anais...** Ypsilanti, 2006. Disponível em:< http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleID=1601985 >. Acesso em: 10 mai. 2018.

GAMA, R. P. **Estudo da formação do cavaco no torneamento de superligas de níquel.** Dissertação - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014. 120p.

GDD METALS. **GDD 8640**, 2020. Disponível em: <https://ggdmetals.com.br/wp-content/uploads/2015/07/A%C3%87O-8640.pdf> Acesso: mar. 2020.

GEIER, M.; MELLO, M. S.; SOUZA, A, J. Comparação entre ferramenta alisadora e ferramenta convencional no torneamento de acabamento para aços de baixo carbono e baixa liga. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2011, Caxias do Sul. **Anais...** Caxias do Sul, 2011. Disponível em: <http://www.abcm.org.br/anais/cobef/2011/media/trabalhos/COF11-0128.pdf> Acesso em: 18 mar. 2018.

GONÇALVES, B. B.; YAGINUMA, G. F.; YAMAMOTO, M. K. **Óleos de usinagem: Tipos, Classificação e Desempenho.** Departamento de Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia Mecânica – Campus de Bauru. Universidade Estadual Paulista. Outubro de 2010. 13p.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of Modern Manufacturing, Materials, processes, and systems.** New Jersey: Ed. John Wiley & Sons, 2002. 192p.

HADAD, M; SADEGHI, B**. Minimum quantity lubrication-MQL turning of AISI 4140 steel alloy. Journal of Cleaner Production, 2013, 332-343. Editor: Elsevier**. Disponível em: < https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652613003181>. Acesso em: 16 jan. 2019.

HOWARD, J.J. **Tools for Cutting Nickel Alloys**, Proc. Conf. Tools and Dies for Industry, Metals Society. London: England, 1977, p. 105-121.

ISO 3685. Tool-life testing with single-point turning tools, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1993.

ISO 513. Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges - Designation of the main groups and groups of application.
2013.

ITOIGAWA, F.; CHIBLDS, T.; BAKAMURA, T.; BELLUCO, W. **Effects and mechnisms in minimal quantity lubrication machining of na aluminum alloy**. Wear 260, 2006, p, 339-344. Editor: Elsevier. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164805003777>. Acesso em: 10 fev. 2018.

KLOCKE, F. **Fertigungverfahren**: Drehen, Frasen und Bohren. Berlim: Heidelberg, 1997.

KUMAR, S.; SINGH, D.; KALSI, N. S. Applications of Solid Lubricants during Hard Turning- A Review, **International Journal of Advanced Research Trends in Engineering and Technology,** 4, 2017. Disponível em: < https://ijartet.com/2751/v4i10/journal> Acesso em: 26 out. 2018.

LAWAL, S. A.; CHOUDHURY, I.A.; NUKMAN, Y. **A critical assessment of lubrication techniques in machining processes: a case for minimum quantity lubrication using vegetable oil-based lubricant**, Journal of Cleaner Production 41, 2013, 210–221. Disponível em: < https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652612005483>. Acesso em: 10 ago. 2018.

LIMA, D. R. S. **Desenvolvimento de tecnologia de forjamento de aço AISI 8640 destinado à produção de brocas de perfuração**. Porto Alegre, 2007. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS.

LUIS, N. E. **Usinabilidade do aço de corte-facil de baixo carbono ao chumbo ABNT 12L14 com diferentes níveis de elementos químicos residuais** (Cromo, Níquel e Cobre). 2007. 219 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14670?locale=pt_BR>. Acesso em: 20 ago. 2019.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**, 3ª Edição. São Paulo: Edgard Bucher Ltda, 2015.

MACHADO, A. R; DA SILVA, M. B. **Usinagem dos Metais**. Laboratório de Ensino e pesquisa em Usinagem. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Versão 8. Abril de 2004. 262 p.

MARQUES, A. **Torneamento de inconel 718 com aplicação de lubrificantes sólidos.** 2015. 227 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015. Disponível em: < http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFU_af545a649b98a7b4f46ebd4443d0e916>. Acesso em 27 nov. 2018.

MISHRA, S. K; GHOSH, S; ARAVIDAN, S.. **Machining performance evaluation of Ti6Al4V alloy with laser textured tools under MQL and nano-MQL environments.** 2020, 174 - 189. Disponível em: < https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1526612518312441?via%3Dihub>. Acesso em: 09 Fevereiro 2020.

MOURA, R. R. **Fresamento de aço para matrizes VP20ISOF com ferramentas reafiadas.** 2012. 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012. Disponível em: < https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14906/1/d.pdf> Acesso em: 10 ago. 2018.

"_____". **Usinagem da liga Ti6Al4V com aplicação de lubrificantes sólidos no torneamento**. 2017. 131 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade

Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/18968>. Acesso em: 04 abr. 2018.

"_____", DA SILVA, M. B. Desempenho do grafite como lubrificante sólido no torneamento da liga Ti-6AL-4V. In: **POSMEC 2014 – Simpósio do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Mecânica**, 2014, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Ricardo_Moura11/publication/283344073_DESEMPENHO_DO_GRAFITE_COMO_LUBRIFICANTE_SOLIDO_NO_TORNEAMENTO_DA_LIGA_TI-6AL-4V/links/5634c44a08ae75884113a8cf/DESEMPENHO-DO-GRAFITE-COMO-LUBRIFICANTE-SOLIDO-NO-TORNEAMENTO-DA-LIGA-TI-6AL-4V.pdf> Acesso em: 12 mar. 2019.

NOVAREZA, O; SULISTIYARINI, D. H; WIRADMOKO, R. Factors Affecting Optmal Surface Roughness of AISI 4140 Steel in turning operation using Taguchi Experiment, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 306, 2018. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/306/1/012099> Acesso: mar. 2020.

OJOLO, S. J.; DAMISA, O.; IKEKOLO, O. Investigation into the effects of solid lubricant on the surface characteristics of some metals during orthogonal machining, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, **Journal of Engineering, Design and Technology**, 2, 2011, 130-142. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1108/17260531111151023> Acesso em 25 out. 2018.

OLIVEIRA JUNIOR, M. **Lubrificação sólida e meio fluido**. 2013. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14940 >. Acesso em: 06 abr. 2018.

PAUL, P. S; VARADARAJAN, A. Performance evaluation of hard turning of AISI 4340 steel with minimal fluid application in the presence of semi-solid lubricants, **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology,** 2013. Disponível em:http://pij.sagepub.com/content/227/7/738. Acesso em: 26 out. 2018.

PAULA, L. J. L; VIEIRA, M. Estudo do Desenvolvimento de Sistema de Refrigeração MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante. In: 14° Congresso de Iniciação científica UNIMEP. Piracibaca, 2015. **Anais...** Piracicaba, 2006. Disponível em: < http://www.unimep.br/phpg/mostraacademica/anais/5mostra/1/498.pdf> Acesso: 28 Junho 2019.

RAHIM, E. A.; IBRAHI, M. R.; RAHIM, A. A.; AZIZ, S.; MOHID, Z. **Experimental Investigation of Minimum Quantity Lubrication (MQL) as a Sustainable Cooling Technique.** ScienceDirect 26, 2015, 351-354. Editor: Elsevier. Disponível em: < https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.029>. Acesso em: 24 ago. 2018.

RAO, D. N.; KRISHNA, P. V. **The influence of solid lubricant particle size on machining parameters in turning, International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 2008, 107–111. Disponível em: < http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695510001057>. Acesso em: 13 nov. 2017.

REDDY, N. S. K.; NOUARI, M.; BANERJEE, S. Investigation to Study the Applicability of Solid Lubricant in Turning AISI 1040 steel, **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, 129, 2007, 520-527. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/216166325_Investigation_to_Study_the_Applicability_of_Solid_Lubricant_in_Turning_AISI_1040_steel>. Acesso em: 20 out. 2018.

REDDY, N. S. K.; NOUARI, M.; YANG, M. Development of electrostatic solid lubrication system for improvement in machining process performance. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 50, 2010, 789-797. Disponível em: < https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.05.007>. Acesso em: 25 out. 2018.

ROCHA, V. S; VIEIRA, L. E. R; CASTANHEIRA, G. O; CAMARGO, P. S; OLIVEIRA, D. S; OLIVEIRA; J. H; VIANA, R. Torneamento do aço SAE 4340 com diferentes sistemas de lubrirefrigeração. In: **X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, 2018, Salvador. **Anais...** Salvador. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/326431519> Acesso em: 12 mar. 2019.

SANTOS JR., M. C. **Emprego de ferramentas Estatísticas para Avaliação da Usinabilidade de Ligas de Alumínio**. 2012, 230p. Tese (Doutorado Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia (2012). Disponível < https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14711> Acesso em: 24 out. 2019.

SAIKAEW, C; PAENGCHIT, P; WISITSORAAT. Machining performances of TiN+AlCrN coated WC and Al2O3+TiC inserts for turning of AISI 4140 steel under dry condition.. **Journal of Manufacturing Processes**, 50, 2020, 412-420. Acesso em: 10 Janeiro. 2020.

SANDVIK, Coromant – **Desgastes e arestas de corte/2019/**. Disponível em:<https://www. .com/pt-pt/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx>. Acesso em: 04 abr. 2019

SCANDIFFIO, I. **Uma contribuição ao estudo do corte a seco e ao corte com minima quantidade de lubrificante em torneamento de aço.** 2000, 78 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000. Disponível em: < http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/265639/1/Scandiffio_Innocenzo_M.pdf >. Acesso em: 29 out. 2018.

SILVEIRA, F; ZUCHETTO, A; RUPPENTHAL, J. E; MACHADO, F. M. Tratamento térmico de têmpera em aço SAE ABNT 8640: Análise das propriedades mecânicas. V. 2. 2018, HOLLOS. Disponível em: < http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/5614> Acesso: Mai. 2019.

SIN PAR GROUP. **Tecnologia MQL para usinagem a seco**. Disponível em: <https://www.sinpar.com.ar/novedades/noticias/426-tecnologia-mql-para-mecanizado-en-seco>. Acesso em: 27 jun. 2019.

SMITH, G.T. **Advanced Machining - The Handbook of Cutting Technology**, IFS Publications, 1989, ISBN 1-85423-022-6.

SOUZA, A. J. Verificação das forças geradas no torneamento a seco, com fluido em abundância e em quantidade reduzida do aço AISI 420C utilizando ferramenta wiper. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2016, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/307508089> Acesso em: 08 abr. 2018.

STOETERAU, R. L. Universidade Federal de Santa Catarina. **Laboratório de Mecânica de Precisão**. Departamento de Engenharia Mecânica. Aula 03 – Cavacos, 2007. Disponível em: <http://www.lmp.ufsc.br/disciplinas/Stoterau/Aula-03-U-2007-1-cavacos.pdf> Acesso em: 24 de out. de 2019.

TAI, B. L.; STEPHERNSON, D. A.; FURNESS, R.; SHIH, A. J. **Minimum Quantity Lubrication (MQL) in Automotive Powertrain.** ScienceDirect 14, 2014, 523-528. Editor: Elsevier. Disponível em: <https://ac.els-cdn.com/S2212827114001875/1-s2.0-S2212827114001875-main.pdf?_tid=08d3bc49-772e-46e6-9695-85e4b57f7d1&acdnat=1540817292_058f2aa8d7aaaf4b53db4158ae334945>. Acesso em: 24 ago. 2018.

TAWAKOLI, T.; HADAD, M.J.; SADEGHI, M.H. **Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication – MQL grinding process**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 50, 2010. p. 521–531.

TIWARE, A; MAKHESANA, M. A; MAWANDIYA, B. K; PATEL, K.M. **Experimental investigations on the applicability of solid lubricants in processing of AISI 4140 steel**. Materials Today: Proceedings, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.603> Acesso, Março 2020.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4th ed. Butterworth-Heinemann: Boston - MA, 2000.

WYPYCH, F. **Dissulfeto de molibdênio, um material multifuncional e surpreendente: doze anos depois.** Química Nova, 37 (2014) 1220-1226. Disponível em: < http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/v37n7a18.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2018.

YILDIZ, Y.; NALBANT, M. A. **A review of cryogenic cooling in machining processes**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 48, 2008, 947–964. Disponível em: < https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S08995508000242?via3Dihub>. Acesso em: 13 ago. 2018.

ZAILANI, Z.A.; HAMIDON, R.; HUSSIN, M.S.; HAMZAS, M.F.M.A.; HADI, H. **The influence Of Solid Lubricant In Machining Parameter of Milling Operation, International Journal of Engineering Science and Technology**, Vol. 3, 2011. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/268416756_THE_INFLUENCE_OF_SOLID_LUBRICANT_IN_MACHINING_PARAMETER_OF_MILLING_OPERATION/download>. Acesso em: 27 nov. 2018.

APÊNDICE A

A Tabela A1 apresenta, respectivamente, os resultados das medições da Rugosidade Ra e Rt utilizadas nos cálculos dos valores médios apresentados no Capítulo V.

Condição	Vc (m/min)	f (mm/rot)	Ensaio	Ângulo de Medição											
				0/360°		60°		120°		180°		240°		300°	
				Ra	Rt	Ra	Rt	Ra	Rt	Ra	Rt	Ra	Rt	Ra	Rt
Seco	360	0,01	1	0,85	5,05	0,78	4,95	0,81	4,75	0,75	4,94	0,56	4,06	0,57	3,94
	290		2	0,75	4,63	0,86	4,88	0,68	4,49	0,84	4,71	0,75	4,63	0,68	4,49
	220		3	0,77	5,52	0,68	4,98	0,77	6	0,85	6,87	0,8	4,9	0,8	6,18
	150		4	0,91	5,13	0,95	5,17	0,95	4,99	0,91	5,13	0,95	5,48	0,91	5,08
	360	0,06	5	0,78	5,26	0,76	5,17	0,74	5,41	0,78	5,26	0,76	5,17	0,76	5,26
	290		6	0,87	4,61	0,86	4,67	0,91	5,23	0,86	4,55	0,84	4,63	0,84	4,63
	220		7	0,97	7,35	0,9	7,13	0,85	5,54	0,97	7,35	0,9	7,13	0,85	5,54
	150		8	0,93	5,24	0,93	5,48	0,9	5,11	0,84	5,26	0,9	5,28	0,85	5,13
MQL	360	0,01	9	0,48	4,7	0,53	4,35	0,48	4,7	0,25	1,85	0,6	4,35	0,29	2,12
	290		10	0,46	3,32	0,42	2,8	0,44	3,28	0,46	3,32	0,51	3,49	0,47	3,28
	220		11	0,65	4,03	0,53	4,03	0,52	3,56	0,53	4,09	0,51	3,96	0,6	4,5
	150		12	0,61	4,78	0,59	4,09	0,62	4,45	0,54	4,1	0,55	3,85	0,58	4,45
	360	0,06	13	0,51	3,49	0,62	4,94	0,55	3,62	0,5	3,46	0,48	3,56	0,5	3,24
	290		14	0,89	4,36	0,6	4,35	0,74	4,7	0,25	1,85	0,6	4,35	0,29	2,12
	220		15	0,6	4,5	0,56	4,73	0,58	3,83	0,65	4,73	0,56	3,88	0,55	3,67
	150		16	0,7	4,06	0,72	4,5	0,7	4,73	0,66	4,59	0,57	4,48	0,67	4,97
MQL + Graf	360	0,01	17	0,25	1,85	0,29	2,12	0,25	1,85	0,25	1,85	0,24	1,75	0,29	2,12
	290		18	0,27	2,34	0,28	2,97	0,27	2,68	0,27	2,24	0,29	2,42	0,27	2,29
	220		19	0,27	1,87	0,31	2,14	0,27	1,87	0,26	1,87	0,24	1,77	0,29	2,12
	150		20	0,33	2,21	0,3	2,18	0,28	2,04	0,31	2,27	0,28	2,1	0,3	2,18
	360	0,06	21	0,33	2,65	0,3	2,41	0,27	2,2	0,25	2,15	0,31	2,87	0,25	2,03
	290		22	0,33	2,98	0,36	3,4	0,35	2,67	0,29	2,57	0,29	2,79	0,29	2,17
	220		23	0,4	2,74	0,38	0,47	0,37	2,44	0,41	0,51	0,38	2,86	0,44	3,36
	150		24	0,41	3,24	0,44	3,41	0,28	2,6	0,47	3,47	0,44	3,18	0,4	3,31

Fonte: Dados da desta pesquisa (2019)