

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS



Dissertação de Mestrado

Daniel Brandão de Angelis

INFLUÊNCIA DA DIREÇÃO DE USINAGEM NA EVOLUÇÃO DO DESGASTE NA FERRAMENTA DE CORTE NO FRESAMENTO FRONTAL DO AÇO SAE 1045 A SECO E COM APLICAÇÃO DE MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE

Belo Horizonte, Fevereiro de 2019



Influência da direção de usinagem na evolução do desgaste na ferramenta de corte no fresamento frontal do aço SAE 1045 a seco e com aplicação de mínima quantidade de lubrificante

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Ciência e Desenvolvimento de Materiais Linha de Pesquisa: Seleção, processamento e caracterização

Orientador: Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos Coorientador: Prof. Dr. Luís Henrique Andrade Maia

Belo Horizonte, Fevereiro de 2019

A582i	 Angelis, Daniel Brandão de. Influência da direção de usinagem na evolução do desgaste na ferramenta de corte no fresamento frontal do aço SAE 1045 a seco e com aplicação de mínima quantidade de lubrificante / Daniel Brandão de Angelis. – 2019. 127 f. : il. Orientador: Sandro Cardoso Santos Coorientador: Luís Henrique Andrade Maia Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2019. Bibliografia. 1. Fresagem. 2. Fluidos de corte. 3. Desgaste. 4. Vibrações. 5. Rugosidade superficial. I. Santos, Sandro Cardoso. II. Maia, Luís Henrique Andrade. III. Título.
	CDD: 671.35
	Eicha alabarada pala Pibliotaga, Campus I., CEEET MC

Ficha elaborada pela Biblioteca - Campus I – CEFET-MG Bibliotecário: Wagner Oliveira Braga CRB6 - 3261

Dedico este trabalho aos meus pais, Luiz e Wania, e aos meus irmãos por estarem sempre ao meu lado.

"Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas. Muito conhecimento, que se sintam humildes."

(Leonardo da Vinci)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela força para conseguir vencer mais essa etapa.

Aos meus pais pelos princípios e ensinamentos passados, irmãos e namorada pelo suporte nos momentos mais complicados.

Ao orientador, Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos, pela oportunidade e auxílio no desenvolvimento do trabalho.

Ao coorientador, Prof. Dr. Luís Henrique Andrade Maia, pela possibilidade de parceria com a PUC-MG e também pelo envolvimento, paciência e boa vontade em ajudar no trabalho sempre que solicitado.

Aos professores Leonardo Roberto da Silva e Wagner Sade, membros da banca de qualificação, que deram importantes sugestões para a continuidade do trabalho.

Ao Laboratório de Usinagem da PUC-MG, em especial o técnico de laboratórios Ítalo Bruno dos Santos pela paciência, envolvimento e essencial auxílio durante os experimentos.

Ao Laboratório de Microscopia Óptica e ao Laboratório de Microscopia Avançada da PUC-MG, em especial à técnica de laboratórios Edilene Braga Carvalho.

Ao Laboratório de Análises Instrumentais da PUC-MG, em especial a técnica responsável Thaís Munique Sales e os monitores Ana Luíza Giori e Daniel Elvis por todo o suporte necessário.

Ao CEFET-MG pela aquisição dos materiais necessários para a realização do trabalho.

Aos funcionários da Sandvik Coromant, Aldeci Santos e Plínio Pires, responsáveis pela doação e envio das ferramentas de corte utilizadas no trabalho.

Aos funcionários da Blaser Swisslube do Brasil Itda, Marcelo Kuroda e Gisele Turtera, responsáveis pela doação e envio dos fluidos de corte utilizados no trabalho.

Aos amigos Pedro Xavier e Guilherme Duca por todo suporte oferecido.

Aos amigos Arthur Izumi, Darlan Vale e Conrado da Mata, companheiros de estudo e discussões enriquecedoras nessa jornada.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG, em especial a secretária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Caroline Fernandes, pelo auxilio nas questões administrativas.

A CAPES pelo apoio financeiro.

A todos os professores do mestrado que contribuíram para o enriquecimento da minha formação através da transmissão de conhecimento.

A todos que, de alguma maneira, estiveram presentes nessa caminhada e contribuíram para a conclusão do trabalho, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

O fresamento é caracterizado pela alta taxa de remoção de material e pelo corte interrompido. Essa intermitência faz com que a ferramenta de corte seja submetida a variações cíclicas de temperatura e tensão, o que desfavorece a aplicação de fluido de corte pelo método tradicional no processo. Diante disso, neste trabalho foi avaliada a influência da direção de usinagem na evolução do desgaste da ferramenta de corte no fresamento frontal do aço SAE 1045 a seco e com aplicação de fluido de corte por meio da técnica de mínima quantidade de lubrificante. As direções de usinagem adotadas foram a longitudinal, ao longo do comprimento do corpo de prova, e a transversal, ao longo da largura do mesmo. Foram utilizadas barras de seção quadrada do aço SAE 1045 laminado com dimensões de 100mm x 400mm, além de ferramentas de corte de metal duro. Os ensaios foram conduzidos a seco e com aplicação do MQL com dois fluidos diferentes. Em cada condição de teste os corpos de prova foram usinados na direção longitudinal e transversal, o que resultou em um total de seis condições de ensaio. Simultaneamente aos ensaios de fresamento, foram coletados os sinais de vibrações mecânicas do sistema A evolução do desgaste nas ferramentas de corte foi analisada com o microscópio óptico. A cada parada para análise das ferramentas foi avaliado o acabamento superficial nos corpos de prova. Ao fim dos ensaios em cada condição as ferramentas foram analisadas pela microscopia eletrônica de varredura antes e após serem submetidas a uma decapagem química, o que possibilitou a identificação das formas e dos mecanismos de desgaste atuantes. As principais formas de desgaste encontradas foram desgaste de flanco e de cratera, enquanto que os principais mecanismos foram desgaste por abrasão e por difusão. De um modo geral, observou-se que a aplicação do MQL foi benéfica para a vida das ferramentas chegando a proporcionar até 16% de vida útil a mais. Já o acabamento superficial da peça nem sempre foi melhor com a aplicação do MQL. Os sinais de vibrações mecânicas coletados mostraram relação com a evolução do desgaste nas ferramentas.

Palavras chave: fresamento frontal, ferramentas de corte, desgaste, MQL, rugosidade, vibrações

ABSTRACT

Milling is characterized by high rate of material removal and interrupted cutting. This intermittence causes the cutting tool to be subjected to cyclical variations of temperature and tension, which disadvantage the application of cutting fluid by the traditional method in the process. In this work the influence of the machining direction was evaluated on the wear evolution of the cutting tool in the face milling of the SAE 1045 steel in dry condition and with the application of cutting fluid through the technique of minimum quantity of lubricant. The machining directions adopted were longitudinal, along the length of the workpiece, and transversal, along the width of the workpiece. Square section bars of SAE 1045 laminated steel with dimensions of 100mm x 400mm were used, also carbide cutting tools. The tests were conducted by dry and with MQL application with two diferente cutting fluids. In each test condition the worfpieces were machined in the longitudinal and transversal directions, resulting in a total of six test conditions. Simultaneously with the millhing tests, the mechanical vibration signals of the system were collected. The wear evolution in the cutting tools was analyzed with the optical microscope. At each stop for analysis of the tools, the roughness of the surface was evaluated in the workpieces. At the end of the tests in each condition, the tools were analyzed by scanning eléctron microscopy before and after being subjected to a chemical stripping, which allowed the identificatiion of the forms and the mechanisms of wear. The main forms of wear were flank wear and crater wear, while the main mechanisms were abrasive wear and diffusion. In general it was observed that the application of the MQL was beneficial to the life tools, providing up to 16% more useful life. The surface finish of the piece was not always better with the MQL application. The signs of mechanical vibrations collected were related with the evolution of tool wear.

Keywords: face milling, cutting tools, wear, MQL, roughness, vibrations

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fases ativa e inativa das ferramentas no fresamento24
Figura 2 – Tipos básicos de operações de fresolvimento damento: (a) Fresamento
tangencial; (b) fresamento frontal25
Figura 3 – Fresamento frontal25
Figura 4 – Fresamento tangencial discordante25
Figura 5 – Fresamento tangencial concordante26
Figura 6 – Penetração de trabalho (a _e), profundidade de corte (a _p) e penetração de
avanço (a _f): (a) fresamento tangencial; (b) fresamento frontal27
Figura 7 – Representação da velocidade de corte (Vc), velocidade de avanço (Vf),
velocidade efetiva (Ve), ângulo da direção de avanço (ወ) e o ângulo da direção
efetiva de corte (η) no fresamento tangencial discordante
Figura 8 – Relação dos materiais para ferramentas com propriedades
Figura 9 – Lascamento da ferramenta de corte35
Figura 10 – Aresta postiça de corte
Figura 11 – Mecanismos de desgaste em função da temperatura
Figura 12 – Desgaste de cratera
Figura 13 – Desgaste de entalhe
Figura 14 – Desgaste de flanco
Figura 15 – Principais regiões de desgaste de uma ferramenta de corte
Figura 16 – Rugosidade média (Ra)43
Figura 17 – Esquema do gráfico <i>boxplot</i> 48
Figura 18 – Fluxograma do trabalho49
Figura 19 – Corpos de prova50
Figura 20 – Ferramenta de corte utilizada51
Figura 21 – Fresa utilizada no trabalho51
Figura 22 – Fluidos de corte utilizados nos ensaios52
Figura 23 – (a) Centro de Usinagem Discovery 560 – ROMI; (b) Painel de controle
Siemens
Figura 24 – Rugosímetro utilizado na pesquisa54
Figura 25 – Esquema do equipamento de MQL.
Figura 26 – (a) Montagem do microscópio óptico; (b) Câmera Zeiss ERc 5s55

Figura 27 – Montagem do MEV56
Figura 28 – (a) Acelerômetro triaxial instalado no eixo da fresa; (b) Amplificador de
sinais56
Figura 29 – Esquema com as direções de usinagem (a) Longitudinal; (b)
Transversal
Figura 30 – Marcações para posicionamento das ferramentas58
Figura 31 – Esquema da medição da rugosidade: (a) Longitudinal; (b) Transversal.60
Figura 32 – Pistola de ar comprimido60
Figura 33 – Marcações para posicionamento das ferramentas61
Figura 34 – Posicionamento dos acelerômetros no sistema.
Figura 35 – Teste de batimento64
Figura 36 – Evolução do desgaste de flanco nas ferramentas em função do número
de passes acumulados para a condição a seco na direção longitudinal65
Figura 37 – Microscopia óptica da ferramenta 3 na condição a seco e direção
longitudinal: (a) Aresta de corte; (b) superfície de saída66
Figura 38 – MEV da ferramenta 3 na condição a seco e direção longitudinal: (a)
Superfície de saída; (b) Superfície de saída após decapagem química; (c) Espectro
A
Figura 39 - MEV da ferramenta 3 na condição a seco e direção longitudinal: (a)
Aresta de corte; (b) Aresta de corte após decapagem química; (c) Espectro B68
Figura 40 – Evolução do desgaste de flanco nas ferramentas em função do número
de passes acumulados para a condição a seco na direção transversal
Figura 41 – Microscopia óptica das ferramentas 2 e 3 na condição a seco e direção
transversal: (a) Aresta de corte da ferramenta 2; (b) Superfície de saída da
ferramenta 2; (c) Aresta de corte da ferramenta 3; (d) Superfície de saída da
ferramenta 3
Figura 42 – MEV da ferramenta 2 na condição a seco e direção transversal: (a)
Superfície de saída; (b) Superfície de saída após decapagem química; (c) Espectro
B; (d) Aresta de corte; (e) Espectro C71
Figura 43 – MEV da ferramenta 2 na condição a seco e direção transversal: (a)
Aresta de corte; (b) Aresta de corte após decapagem química; (c) Espectro A72

Figura 44 – MEV da ferramenta 3 na condição a seco e direção transversal: (a) Superfície de saída; (b) Superfície de saída após decapagem química; (c) Espectro Figura 45 – MEV da ferramenta 3 na condição a seco e direção transversal: (a) Aresta de corte; (b) Aresta de corte após decapagem química; (c) Espectro B......74 Figura 46 – Evolução do desgaste de flanco nas ferramentas em função do número de passes acumulados para a condição MQL com fluido Vascomill MKS 22 na Figura 47 – Microscopia óptica das ferramentas 2 e 3 na condição MQL com fluido Vascomill MKS 22 e direção longitudinal: (a) Aresta de corte da ferramenta 2; (b) Superfície de saída da ferramenta 2; (c) Aresta de corte da ferramenta 3; (d) Superfície de saída da ferramenta 3......76 Figura 48 – MEV da ferramenta 2 na condição MQL com fluido Vascomill MKS 22 na direção longitudinal: (a) Superfície de saída; (b) Superfície de saída após decapagem química; (c) Espectro A.77 Figura 49 – MEV da ferramenta 2 na condição MQL com fluido Vascomill MKS 22 na direção longitudinal: (a) Aresta de corte; (b) Aresta de corte após decapagem química; (c) Espectro B; (d) Espectro C.78 Figura 50 – MEV da ferramenta 3 na condição MQL com fluido Vascomill MKS 22 na direção longitudinal: (a) Superfície de saída; (b) Superfície de saída após Figura 51 – MEV da ferramenta 3 na condição MQL com fluido Vascomill MKS 22 na direção longitudinal: (a) Aresta de corte; (b) Aresta de corte após decapagem química; (c) Espectro A.80 Figura 52 – Evolução do desgaste de flanco nas ferramentas em função do número de passes acumulados para a condição MQL com fluido Vascomill MKS 22 na Figura 53 – Microscopia óptica das ferramentas 2 e 3 na condição MQL com fluido Vascomill MKS 22 e direção transversal: (a) Aresta de corte da ferramenta 3; (b) Superfície de saída da ferramenta 3; (c) Superfície de saída da ferramenta 2.......82 Figura 54 – MEV da ferramenta 2 na condição MQL com fluido Vascomill MKS 22 na direção transversal: (a) Superfície de saída; (b) Superfície de saída após decapagem química; (c) Espectro A.83

Figura 55 – MEV da ferramenta 3 na condição MQL com fluido Vascomill MKS 22 na direção transversal: (a) Superfície de saída; (b) Superfície de saída após decapagem química; (c) Espectro A.84 Figura 56 – MEV da ferramenta 3 na condição MQL com fluido Vascomill MKS 22 na direção transversal: (a) Aresta de corte; (b) Aresta de corte após decapagem química; (c) Espectro A.85 Figura 57 – Evolução do desgaste de flanco nas ferramentas em função do número de passes acumulados para a condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 na Figura 58 – Microscopia óptica das ferramentas 2 e 3 na condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 e direção longitudinal: (a) Aresta de corte da ferramenta 2; (b) Superfície de saída da ferramenta 2; (c) Aresta de corte da ferramenta 3; (d) Figura 59 – MEV da ferramenta 2 na condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 na direção longitudinal: (a) Superfície de saída; (b) Superfície de saída após Figura 60 – MEV da ferramenta 2 na condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 na direção longitudinal: (a) Aresta de corte; (b) Aresta de corte após decapagem Figura 61 – MEV da ferramenta 3 na condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 na direção longitudinal: (a) Superfície de saída; (b) Superfície de saída após decapagem química; (c) Espectro A; (d) Espectro B.90 Figura 62 – Evolução do desgaste de flanco nas ferramentas em função do número de passes acumulados para a condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 na direção transversal......91 Figura 63 – Microscopia óptica das ferramentas 2 e 3 na condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 e direção transversal: (a) Aresta de corte da ferramenta 3; (b) Superfície de saída da ferramenta 3; (c) Superfície de saída da ferramenta 2.........92 Figura 64 – MEV da ferramenta 2 na condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 na direção transversal: (a) Superfície de saída; (b) Superfície de saída após

Figura 65 – MEV da ferramenta 3 na condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 na direção transversal: (a) Superfície de saída; (b) Superfície de saída após Figura 66 – MEV da ferramenta 3 na condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 na direção transversal: (a) Aresta de corte; (b) Aresta de corte após decapagem química; (c) Espectro B.95 Figura 67 – Volume de material removido em cada condição......96 Figura 68 – Comparação entre as direções na condição a seco: (a) Ra; (b) Rq; (c) Figura 69 – Comparação entre as direções na condição MQL-Vascomill MKS 22: (a) Figura 70 – Comparação entre as direções na condição MQL-Vascomill MMS FA 2: (a) Ra; (b) Rq; (c) Rt......100 Figura 71 – Comparação entre as condições na direção longitudinal: (a) Ra; (b) Rq; Figura 72 – Comparação entre as condições na direção transversal: (a) Ra; (b) Rq; Figura 73 – Comparação entre todas as condições: (a) Ra; (b) Rq; (c) Rt.105 Figura 74 – Boxplot comparativo: (a) Ra; (b) Rq; (c) Rt.....106 Figura 75 – Comparação entre o desgaste e a rugosidade para a condição a seco na direção transversal: (a) Ra; (b) Rq; (c) Rt.....108 Figura 76 – Comparação entre o desgaste e a rugosidade para a condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 na direção transversal: (a) Ra; (b) Rq; (c) Rt.109 Figura 77 – Espectro de frequência do acelerômetro 1, no eixo Y, para a condição a seco na direção transversal: (a) Entrada – Passe 1; (b) Saída – Passe 1; (c) Entrada Figura 78 – Espectro de frequência do acelerômetro 2, no eixo Y, para a condição a seco na direção transversal: (a) Entrada – Passe 1; (b) Saída – Passe 1; (c) Entrada Figura 79 – Vibrações mecânicas e desgaste, na condição a seco e direção transversal, em função do número de passes.....115 Figura 80 – Vibrações mecânicas e desgaste, na condição MQL com o fluido Vascomill MMS FA 2 e direção longitudinal, em função do número de passes.116 Figura 81 – Vibrações mecânicas e parâmetros de rugosidade na condição a seco na direção transversal, em função do número de passes: (a) Ra; (b) Rq; (c) Rt. 117 Figura 82 – Vibrações mecânicas e parâmetros de rugosidade na condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 na direção longitudinal, em função do número de passes: (a) Ra; (b) Rq; (c) Rt. 118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos metais duros segundo a norma ISO 513	33
Tabela 2 – Composição química em porcentagem de peso do aço SAE	1045
utilizado	50
Tabela 3 – Especificações da ferramenta de corte utilizada	51
Tabela 4 – Especificações da fresa utilizada no trabalho	52
Tabela 5 – Especificações dos fluidos de corte	53
Tabela 6 – Passes dados a cada operação	58
Tabela 7 – Parâmetros de corte fixados	59

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- AISI Instituto americano de ferro e aço (American Iron and Steel Institute)
- APC Aresta postiça de corte
- BUE Aresta postiça de corte (Build up edge)
- CBN Nitreto cúbico de boro
- CNC Comando Numérico Computadorizado
- CVD Deposição química de vapor (Chemical vapor deposition)
- EDS Espectometria por energia dispersiva (Energy Dispersion Spectroscopy)
- FFT Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transformer)
- HSC Corte a alta velocidade (High speed cutting)
- HSM Usinagem a alta velocidade (High speed machining)
- HSS Aço rápido (High Speed Steel)
- ISO Organização Internacional para Padronização (International Organization for Standardization)
- MEV Microscopia eletrônica de varredura
- MQL Mínima quantidade de lubrificante (Minimal Quantity Lubrication)
- PVD Deposição física de vapor (Physical vapor deposition)
- RMS Raiz média quadrática (Root mean square)
- SAE Sociedade dos engenheiros automotivos (Society of Automotive Engineer)

LISTA DE SÍMBOLOS

- ϕ Ângulo da direção de avanço
- η Ângulo da direção de corte
- $\phi_0 \hat{A}$ ngulo de contato peça-fresa
- ae Penetração de trabalho
- a_p Profundidade de corte
- a_f Penetração de avanço
- d Diâmetro da fresa
- f Avanço
- fz Avanço por dente
- Im Comprimento de medição
- n Número de rotações por minuto
- Ra Rugosidade média
- Rq Raiz quadrática média
- Rt Rugosidade total
- v_c Velocidade de corte
- ve Velocidade efetiva de corte
- v_f Velocidade de avanço

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
2 OBJETIVOS	21
2.1 Objetivos específicos	21
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1 Processo de usinagem	22
3.2 Fresamento	23
3.2.1 Tipos de fresamento	24
3.2.2 Parâmetros que influenciam o processo de fresamento	26
3.3 Materiais para ferramentas de corte	
3.3.1 Ferramentas de metal duro	31
3.3.2 Revestimentos para ferramentas de corte	33
3.4 Avarias e desgaste das ferramentas de corte	34
3.4.1 Mecanismos de desgaste	
3.4.2 Formas de desgaste	
3.5 Fluidos de corte	40
3.5.1 Mínima quantidade de lubrificante	41
3.6 Acabamento superficial	42
3.6.1 Parâmetros de quantificação da rugosidade	42
3.6.2 Parâmetros de corte que influenciam a rugosidade	44
3.7 Vibrações mecânicas	44
3.7.1 Métodos de monitoramento	46
3.8 Métodos estatísticos	46
3.8.1 Planejamento de experimentos	47
3.8.2 Boxplot	47
4 METODOLOGIA	49
4.1 Descrição do trabalho	49
4.2 Materiais	50
4.3 Equipamentos	53
4.4 Procedimento experimental	57
4.4.1 Ensaios de fresamento	57
4.4.2 Parâmetros de corte aplicados	59
4.4.3 Avaliação do acabamento superficial	60

4.4.4 Microscopia óptica	61
4.4.5 Microscopia eletrônica de varredura	61
4.4.6 Decapagem química	62
4.4.7 Aquisição de dados de vibrações mecânicas	62
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
5.1 Desgaste nas ferramentas de corte	65
5.1.1 Fresamento a seco	65
5.1.2 Fresamento com MQL com o fluido vascomill MKS 22	74
5.1.3 Fresamento com MQL com o fluido vascomill MMS FA 2	85
5.1.4 Comparação dos resultados	95
5.2 Acabamento superficial	97
5.2.1 A seco	97
5.2.2 MQL – Vascomill MKS 22	98
5.2.3 MQL – Vascomill MMS FA 2	100
5.2.4 Direção longitudinal	101
5.2.5 Direção transversal	103
5.2.6 Todas as condições	104
5.2.7 Acabamento superficial X desgaste	107
5.3 Análise dos sinais de vibrações	110
5.3.1 Espectro de frequências	110
5.3.2 RMS x desgaste	114
5.3.3 RMS x acabamento superficial	116
6 CONCLUSÕES	120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
APÊNDICE	125

1 INTRODUÇÃO

O segmento dos processos de fabricação é alvo constante de estudos científicos que visam sempre uma maior eficiência dos processos, fruto do dinamismo do mercado cada vez mais competitivo, globalizado e exigente. As empresas buscam incessantemente a redução dos custos de produção aliado à melhoria na qualidade do produto final. Diante desse contexto, um melhor entendimento dos fenômenos que ocorrem em cada processo é de fundamental importância para que seja possível o aprimoramento e otimização de cada processo fabricação.

A eficiência do processo usinagem depende, em grande parte, da eficácia das condições tribológicas proporcionadas pela interação específica material-ferramenta de corte. Algumas variáveis como velocidade de corte, avanço por dente e profundidade de corte são geralmente selecionadas em primeiro lugar. A escolha correta da ferramenta de corte e ambiente de corte, bem como a técnica adequada para usinar qualquer material é um fator decisivo para se obter taxas de produção mais altas e/ou menor custo de fabricação (Da Silva, 2011).

O fresamento é um dos processos de fabricação por usinagem mais difundidos na indústria graças à sua versatilidade e às elevadas taxas de remoção de material que possibilita por ser realizado com múltiplas arestas de corte. Exemplos de aplicabilidade estão na fabricação de engrenagens, fresamento da superfície de blocos de motor e peças maciças de um modo geral. Segundo Sandivik Coromant (2010) o fresamento é o método de usinagem mais flexível podendo usinar quase qualquer formato e, no entanto, o lado negativo desta flexibilidade é que muitas variáveis são incorporadas ao processo, tornando-o um desafio no que diz respeito à sua otimização.

O fresamento possui a peculiaridade do corte intermitente, ou seja, a ferramenta de corte não fica em contato com a peça o tempo todo e essa característica o torna um dos processos de fabricação por usinagem mais críticos. Essa característica dificulta a aplicação de fluido de corte pelo método tradicional, pois os choques térmicos na ferramenta de corte se tornam mais intensos e sua vida útil é, na maioria das vezes, encurtada. O corte a seco não é uma condição ideal de trabalho, pois gera temperaturas mais elevadas além de altos níveis de esforços mecânicos. Uma alternativa desenvolvida para a aplicação de fluido de corte é a

técnica de mínima quantidade de lubrificante – MQL. Esse método foi desenvolvido a partir do pensamento cada vez mais sustentável da sociedade como um todo e consiste na aplicação de fluido de corte em quantidades mínimas a certa pressão.

Existe ainda a influência das dimensões e da geometria da peça, fatores que podem afetar o perfil e o número de entradas e saídas da peça. Segundo Cavichiolli (2017) evitar que a ferramenta fique constantemente entrando e saindo da peça é de extrema importância para estabilizar as forças de corte e, consequentemente, alcançar maior vida útil para a ferramenta.

A qualidade da superfície ao fim do processo não pode ser desprezada. A crescente demanda por baixas tolerâncias e melhor qualidade superficial faz com que a indústria manufatureira busque continuamente reduzir as asperezas das superfícies. Nos processos de usinagem, a qualidade superficial desejada é atingida para produzir peças que forneçam a função requerida.

Diante disso, estudos que objetivam o aprimoramento do processo de fresamento tornam-se necessários. Conhecer a influência da direção de usinagem bem como a utilização de fluido de corte aplicado por meio da técnica do MQL pode representar uma melhoria significativa no processo no que diz respeito à vida útil da ferramenta de corte e acabamento superficial.

A demanda por baixas tolerâncias e melhor qualidade superficial faz com que a indústria manufatureira busque continuamente reduzir as asperezas das superfícies. Nos processos de usinagem, a qualidade superficial desejada é atingida para produzir peças que forneçam a função requerida.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é estudar a influência da direção de usinagem no desempenho das ferramentas de corte de metal duro, tendo como parâmetros a evolução do desgaste e a vida útil das ferramentas no fresamento frontal do aço SAE 1045 a seco e com aplicação de mínima quantidade de lubrificante.

2.1 Objetivos específicos

- Investigar e caracterizar as diferentes formas e mecanismos de desgaste que ocorrem nas ferramentas de corte com o auxílio da microscopia óptica e da microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Estudar a influência que o número de entradas e saídas da ferramenta de corte no corpo de prova exerce na evolução do desgaste e na vida útil das ferramentas de corte;
- Avaliar e comparar, com a utilização de um rugosímetro, o acabamento superficial dos corpos de prova para cada uma das condições experimentadas;
- Avaliar e comparar o desempenho dos dois fluidos utilizados no MQL, em termos de vida da ferramenta de corte e acabamento superficial, em comparação com o fresamento a seco;
- Monitorar as vibrações mecânicas do sistema para estudar a influência dos sinais vibracionais dos choques mecânicos gerados nas entradas e saídas das ferramentas de corte sobre o seu desgaste durante o fresamento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi dividida em tópicos que abordam assuntos relacionados com a pesquisa e que serão importantes para o esclarecimento do assunto estudado. São eles: Processo de usinagem; Fresamento; Materiais para ferramentas de corte; Avarias e desgaste das ferramentas de corte; Fluidos de corte; Acabamento superficial; Vibrações mecânicas.

3.1 Processo de usinagem

Segundo Ferraresi (1977, p. 25) "entende-se como operações de usinagem aquelas que, ao conferir forma à peça, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzem cavaco." Ainda de acordo com Ferraresi (1977, p.25) "o cavaco é definido como a porção de material da peça, retirada no corte pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular."

"A usinagem é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos algo em torno de 10% de toda a produção de metais e empregando dezenas de milhões de pessoas." (TRENT, 1985 *apud* MACHADO *et al*, 2009, p.3).

Segundo Chiaverini (1986) o processo de usinagem possibilita alcançar, entre outros:

- Acabamento de superfícies de peças fabricadas por outros processos de fabricação, de modo a obter-se um melhor aspecto superficial e dimensões mais precisas;
- Fabricação de peças em série a um custo mais baixo;
- Fabricação de peças, praticamente de qualquer forma, a partir de um bloco de material metálico.

As principais operações de usinagem podem ser classificadas como convencionais e não-convencionais. As operações de usinagem convencionais a remoção do cavaco é possibilitada por cisalhamento com a utilização de ferramentas de corte e as principais operações são o torneamento, aplainamento, furação, mandrilamento, serramento, brochamento, roscamento, retificação e fresamento. As não convencionais empregam outras modalidades de energia para a

remoção de material como o ultra-som, laser, plasma, fluxo abrasivo, reações químicas, feixe de elétrons, etc. (SANTOS; SALES, 2007)

3.2 Fresamento

De acordo com Ferraresi (1977) o fresamento é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas multicortantes, denominadas fresas, sendo que, para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam segundo uma trajetória qualquer. Segundo Stemmer (1995) geralmente a peça efetua o movimento de avanço, de baixa velocidade, enquanto a ferramenta, girando à velocidade relativamente alta, realiza o movimento de corte, mantendo o eixo de giro numa posição fixa.

Stemmer (1995) destaca que as vantagens do processo residem na variedade de formas que podem ser produzidas, na qualidade dos acabamentos superficiais, nas elevadas taxas de remoção de cavaco, na alta produtividade e na disponibilidade de ampla variedade de ferramentas, que podem ser construídas ou associadas para produzir superfícies de elevada complexidade. O fato da fresa se apresentar em diferentes configurações confere a esta operação um caráter de versatilidade em termos de geometrias possíveis de serem geradas. Grande parte das superfícies não planas e de revolução de peças mecânicas são geradas somente por fresamento (DINIZ et al, 2010).

Além de todas as aplicações convencionais, o fresamento é uma alternativa para outras operações de usinagem como furos, roscas, cavidades e superfícies que costumavam ser torneadas, furadas ou rosqueadas com macho (SANDVIK COROMANT, 2010). Esse processo difere dos demais processos de usinagem pelos seguintes fatores: interrupções no corte que ocorrem assim que o dente de corte da fresa engajado deixa a peça de trabalho; o tamanho relativamente pequeno dos cavacos produzidos e a variação de espessura desses (ASM HANDBOOK, 1989).

Para Silva (2010) destaca importantes características que o fresamento deve possuir para uma aplicabilidade satisfatória e produção de peças com a qualidade desejada. Dentre elas destaca-se a elevada rigidez que o sistema deve possuir para suportar os choques mecânicos inerentes ao processo, devido à característica de fase ativa e fase inativa percorrida por cada aresta. Na Figura 1 é possível observar essas duas fases no fresamento tangencial discordante.



Figura 1 – Fases ativa e inativa das ferramentas no fresamento

Fonte: Lima, 2011, apud Bustamante, 2017.

Lopes (2013) destaca a tendência do fresamento para usinagens com menores profundidades de corte e maiores velocidades de corte e de avanço, conhecida como *high speed machining* (HSM) ou *high speed cutting* (HSC). De acordo com Cui *et al* (2012) com o desenvolvimento de máquinas-ferramenta cada vez mais rígidas e ferramentas de corte avançadas, a técnica HSM vem sendo amplamente utilizada na fabricação de componentes em seu estado endurecido.

3.2.1 Tipos de fresamento

A operação de fresamento possui variações quanto ao modo de ser aplicada, cada uma apresentando vantagens e desvantagens. De acordo com Diniz *et al* (2010) pela disposição dos dentes ativos da fresa, a operação é classificada da seguinte maneira:

- Fresamento tangencial: os dentes ativos estão na superfície cilíndrica da ferramenta e o eixo da mesma é paralelo à superfície que está sendo fresada. As fresas são chamadas de cilíndricas ou tangenciais.
- Fresamento frontal: os dentes ativos estão na superfície frontal da ferramenta e o eixo da mesma é perpendicular à superfície gerada. As fresas são chamadas de frontais ou de topo.

Na Figura 2 é possível observar os tipos de operações de fresamento.

Figura 2 – Tipos básicos de operações de fresolvimento damento: (a) Fresamento tangencial; (b) fresamento frontal.



Fonte: Kalpakijan e Schmid, 2006 (adaptado).

Segundo a Sandvik Coromant (2010) o fresamento frontal é a operação mais comum no fresamento e pode ser realizada usando diferentes tipos de ferramentas. É utilizado para usinar superfícies planas por meio da fresa que possui dentes cortantes em sua superfície frontal e são posicionados perpendicularmente em relação a superfície trabalhada (ASM HANDBOOK, 1989). A Figura 3 mostra um exemplo da operação de fresamento frontal.

Figura 3 – Fresamento frontal



Fonte: Sandvik Coromant, 2018 (adaptada)

O fresamento ainda pode ser classificado de outras duas formas: discordante ou concordante. No fresamento discordante o sentido do movimento de avanço da peça é contrário ao movimento de rotação da fresa. A Figura 4 mostra um exemplo desse tipo de operação.

Figura 4 – Fresamento tangencial discordante



Fonte: Sandvik Coromant, 2010 (Adaptada)

No fresamento concordante o sentido do movimento de avanço da peça é o mesmo do movimento de rotação da fresa. A Figura 5 mostra um exemplo desse tipo de operação.



Figura 5 – Fresamento tangencial concordante

Fonte: Sandvik Coromant, 2010 (Adaptada)

Asm Handbook (1989) quando compara o fresamento frontal com o fresamento tangencial cita que o corte no frontal é mais estreito e mais profundo na direção radial, portanto, remove uma quantidade de material com menor uso de potência. Além disso, o fresamento frontal apresenta outras vantagens em relação ao tangencial:

- Maior rigidez do sistema máquina/ferramenta já que a fresa é anexada diretamente no eixo da árvore da máquina.
- Usinagem de maiores áreas com menor esforço do eixo de rotação.
- Redução no tempo de troca das ferramentas de corte.
- Menor custo para a reutilização das ferramentas de corte se a fresa for sólida ou então custo zero no caso das ferramentas serem no estilo pastilha.
- Melhor acabamento da superfície.
- Melhor desempenho na remoção de maiores quantidade de material.
- Permite tolerâncias mais precisas.

3.2.2 Parâmetros que influenciam o processo de fresamento

Devido à peculiaridade de ocorrer de modo intermitente e ao grande número de variáveis que podem influenciar o processo, o fresamento representa um desafio tecnológico no que diz respeito à sua otimização. Baseados em Machado et al (2009) e Diniz et al (2010) são citados alguns dos parâmetros que exercem influência no fresamento:

- Penetração de trabalho ou largura de corte (ae) é a penetração da ferramenta em relação à peça, medida no plano de trabalho e em uma direção perpendicular à direção de avanço. À medida que ae cresce, aumenta o ângulo de contato fresa-peça (φ₀) em cada volta da ferramenta e, assim, aumenta a temperatura da ferramenta. Portanto, seu aumento tende a causar uma forte queda da vida da ferramenta.
- Profundidade de corte ou largura de usinagem (a_p) é a profundidade ou largura de penetração da ferramenta na peça, medida em uma direção perpendicular ao plano de trabalho.
- Penetração de avanço (a_f) é a grandeza de penetração da ferramenta medida no plano de trabalho e na direção do avanço.

Na Figura 6 é possível observar as grandezas citadas para o fresamento tangencial e frontal.





Fonte: Sandvik Coromant, 2010 (adaptado).

 Velocidade de corte (v_c) – é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido de corte. É calculada pela Equação 1:

$$v_{c} = \frac{\pi \times d \times n}{1000}$$
(1)

Onde:

v_c = velocidade de corte (m/min);

d = diâmetro da fresa (mm);

n = número de rotações por minutos (rpm).

 Velocidade de avanço (v_f) – é a velocidade instantânea de ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido de avanço. É calculada pela Equação 2:

$$\mathbf{v}_{\mathbf{f}} = \mathbf{f} \times \mathbf{n} \tag{2}$$

Onde:

v_f = velocidade de avanço (mm/min);

f = avanço (mm/rev);

n = número de rotações por minuto (rpm).

 Velocidade efetiva de corte (v_e) – é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido efetivo de corte. É calculada vetorialmente pela Equação 3:

$$\vec{v_e} = \vec{v_c} + \vec{v_f}$$

Onde:

 v_e = velocidade efetiva de corte (m/min).

- Ângulo da direção de avanço (φ) formado entre a direção de avanço e a direção de corte.
- Ângulo da direção efetiva de corte (η) formado entre a direção efetiva de corte e a direção de corte.

Na Figura 7 estão representados as velocidades e os ângulos da direção de avanço e na direção efetiva de corte.

(3)

Figura 7 – Representação da velocidade de corte (Vc), velocidade de avanço (V_f), velocidade efetiva (Ve), ângulo da direção de avanço (ω) e o ângulo da direção efetiva de corte (η) no fresamento tangencial discordante.



Fonte: Sandvik Coromant, 2010 (adaptado).

- Avanço (fn) é o percurso de avanço em cada volta da fresa (mm/rev). No caso de ferramentas que possuem mais de um dente, como a fresa, distingue-se ainda o avanço por dente (f_z) que por sua vez é ainda decomposto no avanço de corte (f_c) e no avanço efetivo de corte (f_e).
- Avanço por dente (f_z) representa o percurso de avanço de cada dente medido na direção de avanço da ferramenta (correspondente à geração de duas superfícies consecutivas em usinagem). É válida a relação expressa pela Equação 4:

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_{\mathbf{Z}} \times \mathbf{Z} \tag{4}$$

Onde:

f_z = avanço por dente (mm/dente);

z = número de dentes.

 Avanço de corte (f_c) – representa a distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem medida na direção perpendicular à direção de corte no plano de trabalho. É representada pela Equação 5:

$$\mathbf{f}_{c} = \mathbf{f}_{z} \times \operatorname{sen} \boldsymbol{\varphi} \tag{5}$$

Onde:

 \mathbf{f}_{c} = avanço de corte (mm/dente).

3.3 Materiais para ferramentas de corte

A pressão das mudanças e avanços tecnológicos e da competição econômica impuseram requisitos de elevada severidade para as ferramentas de corte. Para atender a esses requisitos novos materiais tem sido desenvolvidos e testados ao longo dos anos (TRENT e WRIGHT, 2000).

A seleção do material e da classe da ferramenta de corte é um fator importante a ser considerado ao planejar uma operação de usinagem bem sucedida (SANDVIK COROMANT, 2018). De acordo com Diniz *et al* (2010) para a seleção adequada do material da ferramenta de corte é necessário levar em conta uma série de fatores como: material a ser usinado, processo de usinagem, condição da máquina operatriz, forma e dimensões da ferramenta, custo do material da ferramenta, condições de usinagem, condições da operação, etc.

A usinagem em operações de corte interrompido como o fresamento requer materiais que componham ferramentas com suficiente tenacidade para suportar os choques e impactos inerentes ao processo (MACHADO *et al*, 2009). Diniz *et al* (2010) destaca que, independente do material da ferramenta de corte, é desejável que ela apresente as seguintes propriedades:

- Dureza a quente: em determinadas operações a temperatura da ferramenta pode ultrapassar 1000°C. Dessa forma torna-se necessário a utilização de materiais que possam atingir tais temperaturas com dureza suficiente para suportar as tensões do corte;
- Resistencia ao desgaste: destaca-se principalmente resistência ao desgaste por abrasão, ou seja, resistência ao atrito;
- Tenacidade: uma ferramenta tenaz resiste bem aos choques mecânicos e térmicos gerados no processo;
- Estabilidade química: necessário para evitar o desgaste por difusão, principalmente em altas velocidades de corte.

Os principais materiais utilizados para ferramentas de corte são: aços rápidos (HSS) com ou sem revestimento, metal duro com ou sem revestimento, material cerâmico, nitreto de boro cúbico (CBN), diamante, etc. Dentre esses grupos citados os mais utilizados nas operações de usinagem são o aço rápido e o metal duro. Na Figura 8 é possível observar uma relação entre os materiais para ferramentas de corte e algumas propriedades.



Figura 8 – Relação dos materiais para ferramentas com propriedades.

Fonte: Santos e Sales, 2007.

3.3.1 Ferramentas de metal duro

De acordo com Freire (1977), o metal duro é definido como um produto da metalurgia do pó, designado usualmente como carboneto de tungstênio (WC) sinterizado. Segundo Machado *et al* (2009) o metal duro representou um grande impulso na área de materiais para ferramentas de corte pois as velocidades de corte puderam ser aumentadas consideravelmente (de 35m/min para 250m/min a 300m/min).

Ferraresi (1977) afirma que o metal duro é composto basicamente por dois constituintes:

- Carboneto(s): trata-se do carboneto de tungstênio, só ou associado com outros carbonetos como o de titânio, tântalo e nióbio. São os constituintes que, no produto final, conferem a dureza à temperatura ambiente e sua retenção à elevadas temperaturas e resistência ao desgaste;
- Elemento aglomerante: trata-se de um metal do grupo do ferro, usualmente cobalto, cuja função é aglomerar as partículas duras dos carbonetos sendo, consequentemente, o responsável pela tenacidade do material.

De acordo com Machado *et al* (2009), o metal duro, originalmente desenvolvido na Alemanha, continha WC e Co e se mostrou muito eficiente na usinagem de ferros fundidos cinzentos, mas com baixa resistência ao desgaste na superfície de saída usinando aços. Para solucionar esse problema adicionou-se TiC, TaC e/ou NbC, verificando-se como resultado significativa redução no problema de craterização durante a usinagem dos aços. Machado *et al* (2009) afirmam que os motivos para essa redução do desgaste na superfície de saída são:

- Os carbonetos adicionados possuem maiores durezas que o WC e, portanto, apresentam maior resistência ao desgaste abrasivo.
- A solubilidade dos carbonetos adicionados é muito menor que o WC, o que inibe a difusão, um dos mecanismos de desgaste mais relevantes a altas temperaturas, característica da superfície de saída.
- A estabilidade química dos carbonetos adicionados é maior que a do WC, o que implica em maiores dificuldades de dissolução e de difusão desses elementos.

A norma ISO 513 (2004) apresenta a classificação de grupos de ferramentas. A letra de designação da classe é acompanhada de um número que representa a tenacidade e a resistência ao desgaste da ferramenta. Quanto maior é o número maior é a tenacidade e menor é a resistência ao desgaste. É possível observar a classificação na Tabela 1.

Principais classes			Classes de aplicação			
Letra de identificação	Cor de identificação	Materiais a serem usinados	Metais duros		а	b
Ρ	Azul	Aços: Todos os tipos de aços e aços fundidos, exceto aços inoxidáveis com estrutura austenítica	P01 P10 P20 P30 P40 P50	P05 P15 P25 P35 P45	Î	Ţ
м	Amarelo	Aço Inoxidável: aço inoxidável austenítico e aço duplex (austenítico/ferrítico) e aço fundido	M01 M10 M20 M30 M40	M05 M15 M25 M35		Ļ
к	Vermelho	Ferro fundido: Ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafita esferoidal, ferro fundido maleável	K01 K10 K20 K30 K40	K05 K15 K25 K35	1	ļ
N	Verde	Metais não ferrosos: Alumínio e outros metais não ferrosos, materiais não metálicos	N01 N10 N20 N30	N05 N15 N25		Ļ
S	Marrom	Superligas e titânio: Ligas especiais resistentes ao calor à base de ferro, níquel e	S01 S10 S20 S30	S05 S15 S25		
H	Cinza	Materiais duros: Aços endurecidos, ferros fundidos endurecidos,ferros to da recistência ao docras	H01 H10 H20 H30	H05 H15 H25	forramont	

Tabela 1 – Classificação dos metais duros segundo a norma ISO 513.

b - Aumento do avanço, aumento da tenacidade do material da ferramenta.

Fonte: ISO 513, 2004 (adaptado).

3.3.2 Revestimentos para ferramentas de corte

Com a finalidade de melhorar o desempenho das ferramentas de corte nas operações de usinagem foram desenvolvidos os revestimentos para as mesmas. De acordo com Diniz et al (2010), a principal finalidade dos revestimentos é aumentar a resistência ao desgaste da ferramenta na região que entra em contato com a peça e com o cavaco, sendo que o núcleo da pastilha permanece com a tenacidade característica do metal duro mais simples (WC + Co). Dessa forma é possível, em muitos casos, aumentar consideravelmente a vida da ferramenta e reduzir os esforços de corte. Segundo a Sandvik Coromant (2018) as ferramentas de metal duro revestido representam de 80% a 90% das pastilhas utilizadas atualmente. A utilização de revestimentos nas ferramentas foi possível em função do aprimoramento das técnicas de aplicação dos mesmos. Essa aplicação pode ser realizada de duas maneiras: deposição química de vapor (CVD) ou deposição física de vapor (PVD). De acordo com a Sandvik Coromant (2018), tem-se:

- CVD: são gerados por reações à temperaturas entre 700°C e 1050°C.
 Possuem elevada resistência ao desgaste e excelente adesão ao metal duro.
 Os principais revestimentos são TiC, TiCN, Al₂O₃ e TiN.
- PVD: são gerados em temperaturas relativamente baixas, entre 400°C e 600°C. O processo envolve a evaporação de um metal que reage, por exemplo, com o nitrogênio, para formar uma camada dura na superfície da ferramenta de corte. Agregam resistência ao desgaste e são recomendadas para arestas de corte tenazes e afiadas, bem como para materiais com tendência a abrasão. Os principais revestimentos são TiCN, TiN e TiAIN.

As ferramentas de corte utilizadas neste trabalho são de metal duro revestidas com TiAIN. Diniz et al (2010) destaca que as principais características desses revestimentos são:

- Maior resistência à oxidação, o que possibilita o uso de temperaturas mais elevadas – quando oxida forma uma camada de Al₂O₃ que é quimicamente inerte e, consequentemente, muito resistente à difusão e à oxidação;
- Baixa condutividade térmica, o que protege a aresta de corte e aumenta a remoção de calor através do cavaco;
- Elevada dureza a frio e a quente;
- Alta estabilidade química, o que reduz o desgaste de cratera;
- Baixo coeficiente de atrito.

3.4 Avarias e desgaste das ferramentas de corte

Em tribologia o desgaste é definido como a destruição de uma ou ambas as superfícies que compõem um sistema tribológico, geralmente envolvendo perda progressiva de material (HUTCHINGS, 1992, *apud* MACHADO, 2009). No contexto da usinagem, de acordo com Diniz *et al* (2010, p.107) "o desgaste é a perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta devido à ação do corte e as
demais ocorrências são denominadas avarias." As ferramentas de corte se desgastam como resultado de elevadas cargas, atrito e altas temperaturas entre a aresta de corte da ferramenta e a peça de trabalho (GU *et al.*, 1999). Por maior que seja a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas de corte, e por menor que seja a resistência mecânica da peça de trabalho, a ferramenta de corte sofrerá um processo de desgaste que levará à sua substituição. (Machado *et al*, 2009).

A avaria é entendida como um fenômeno que ocorre de maneira repentina e inesperada. A quebra e o lascamento levam a destruição completa ou à perda de uma quantidade considerável de material da aresta de corte. É mais comum em ferramentas de baixa tenacidade e geralmente estão presentes com mais frequência em operações de corte intermitente, como o fresamento. Isto devido ao fato de ocorrer choques térmicos e mecânicos durante o processo (MACHADO *et al.*, 2009).

De acordo com Machado *et al* (2009) as arestas das ferramentas de corte utilizadas nas operações de corte interrompido, como no caso do fresamento, são frequentemente substituídas devido às trincas, lascamentos ou quebras. Nesse tipo de operação, o desenvolvimento do desgaste uniforme é dominante quando a ferramenta de corte possui tenacidade suficiente para resistir aos choques mecânicos e térmicos. Na Figura 9 é possível observar o lascamento de uma ferramenta de corte que é caracterizado pela perda de material da ferramenta.



Figura 9 – Lascamento da ferramenta de corte

Fonte: Sandvik Coromant, 2010 (adaptado).

De acordo com Santo e Sales (2007) o desgaste nas ferramentas de corte pode ser classificado quanto ao mecanismo e quanto à forma, sendo as formas resultado da ação de um ou mais mecanismos de desgaste.

3.4.1 Mecanismos de desgaste

Os principais mecanismos de desgaste são:

- Desgaste abrasivo: desgaste causado por partículas duras ou protuberâncias duras forçadas contra e se movendo ao longo de uma superfície sólida (ASTM G40, 2001, *apud* BUDINSKI, 2007). A habilidade da aresta de corte em resistir ao desgaste abrasivo está relacionada com a sua dureza (GU *et a*l., 1999).
- Desgaste difusivo: envolve a transferência de átomos de um material para o outro e depende da temperatura, do tempo de contato e da solubilidade dos elementos envolvidos na zona de fluxo. Pelo fato de ocorrer em nível atômico as áreas desgastadas por difusão tem aparência lisa (MACHADO *et al.*, 2009). De acordo com Gu *et al* (1999) as propriedades químicas do material da ferramenta e afinidade com o material da peça de trabalho determinará o desenvolvimento desse mecanismo de desgaste.
- Desgaste adesivo: desgaste causado pela ligação localizada entre superfícies sólidas em contato levando à transferência de material entre as duas superfícies (ASTM G40, 2001, *apud* BUDINSKI, 2007). Geralmente ocorre a baixas velocidades de corte, onde o fluxo de material sobre a superfície de saída torna-se irregular. Leva à formação da aresta postiça de corte (APC) e o contato com a ferramenta torna-se menos contínuo (MACHADO, *et al*, 2009). Segundo Silva (2015), a formação da APC, ou em ingês *build up edge* (BUE), é mais comum na usinagem de materiais dúcteis, devido às suas baixas durezas e elevada plasticidade. Na Figura 10 é possível observar a APC.



Figura 10 – Aresta postiça de corte

Fonte: Sandvik Coromant, 2010 (adaptado).

- Oxidação: a causa fundamental desse mecanismo de desgaste é uma reação química entre o material desgastado e o ar atmosférico. Pode ocorrer em uma ampla variedade de situações, tanto em lubrificadas quanto em não lubrificadas (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005). Para Diniz *et al* (2010, p.117) "o desgaste gerado pela oxidação se forma especialmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido ao acesso do ar nessa região."
- Fadiga: este mecanismo de desgaste é causado por deformações sustentadas pelas asperezas e camadas superficiais quando as asperezas das superfícies opostas entram em contato. Os contatos entre as asperezas acompanhados de elevados níveis de tensões localizadas são repetidos um grande número de vezes e as porções de desgaste são geradas por trincas que se propagam por fadiga. O desgaste sob essas condições é determinado pela mecânica de iniciação e crescimento de trincas e consequente fratura (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005).

Na Figura 11 é possível observar um diagrama que mostra a faixa de temperatura que os mecanismos de desgaste ocorrem. É perceptível que em baixas temperaturas são observados apenas os mecanismos de desgaste por adesão e por abrasão, com predominância do primeiro. Para temperaturas elevadas o desgaste adesivo da lugar para os demais mecanismos de desgaste. É possível perceber também que o aumenta da temperatura proporciona níveis mais elevados de desgaste.





Fonte: Vieregge, 1970, apud Machado et al, 2009 (adaptado).

3.4.2 Formas de desgaste

Quanto à forma os principais tipos de desgaste são:

 Desgaste de cratera: ocorre na superfície de saída das ferramentas de corte e em materiais dúcteis como os aços e suas ligas. Segundo a Sandvik Coromant (2018), ocorre devido à difusão à elevadas temperaturas encontradas na superfície de saída. Pode aparecer também devido ao cavaco gerar um desgaste abrasivo na superfície da ferramenta durante o seu deslizamento sobre a mesma (BJURKA, 2011). Na Figura 12 é possível observar o desgaste de cratera.





Fonte: Sandvik Coromant, 2010 (adaptado).

Desgaste de entalhe: aparece nas regiões coincidentes com as laterais do cavaco, porém ainda não existe um consenso na literatura que explique exatamente o mecanismo que provoca o desgaste de entalhe (MACHADO, *et al.*, 2009). Para Bjurka (2011) matérias resistentes a altas temperaturas e com elevado grau de encruamento causam o desgaste de entalhe nas ferramentas de corte. Esse tipo de desgaste muda a forma da ponta da ferramenta e, com isso, influencia no acabamento da superfície usinada (DINIZ *et al*, 2010). É possível observar o desgaste de entalhe na Figura 13.



Figura 13 – Desgaste de entalhe

Fonte: Sandvik Coromant, 2010 (adaptado).

 Desgaste de flanco: segundo Diniz et al (2010) é a forma de desgaste mais comum e ocorre na superfície de folga da ferramenta de corte devido à abrasão causada pelo contato entre a ferramenta e a peça. De acordo com a Sandvik Coromant (2018) pode ser causado por elevadas velocidades de corte, baixo avanço por dente, elevada vibração do equipamento, elevadas forças radiais, etc. Geralmente é o principal fator a limitar a vida das ferramentas de corte. O desgaste de flanco pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 – Desgaste de flanco



Fonte: Sandvik Coromant, 2010 (adaptado).

Na Figura 15 é possível observar as regiões onde ocorrem as três principais formas de desgaste.



Figura 15 – Principais regiões de desgaste de uma ferramenta de corte

Fonte: Trent e Dearnley, 1982 (adaptado)

3.5 Fluidos de corte

Nas operações de usinagem como um todo é gerado uma grande quantidade de calor durante o corte devido à energia que é requerida para deformar o cavaco e também devido à energia em decorrência do atrito entre a ferramenta e a peça e entre o cavaco e a ferramenta. Essa energia envolvida nos processos de usinagem é dissipada, em grande parte, na forma de calor e precisa ser minimizado para que a ferramenta de corte possa alcançar uma maior vida útil.

Segundo a ASTM D4175 (*apud* BUDINSKI, 2007) um lubrificante é definido como qualquer material interposto entre duas superfícies que reduz o atrito ou o desgaste ou ambos entre eles. Em um âmbito tribológico, para Stachowiak e Batchelor (2005) o estudo da lubrificação está relacionado ao aprimoramento ou diagnóstico da eficácia de filmes na prevenção de danos para sólidos em contato.

Em 1894, Frederick Winslow Taylor observou que aplicando grande quantidade de água na região de corte era possível aumentar a velocidade de corte em 33%, sem prejuízo para a vida da ferramenta (RUFFINO, 1977 *apud* MACHADO *et al*, 2009). Dessa forma tornou-se evidente a grande importância da utilização do fluido de corte nos processos de usinagem como um todo.

De acordo com Araújo *et al* (2017), os fluidos de corte, quando aplicados corretamente, reduzem a temperatura de corte melhorando a dissipação de calor (com base em suas propriedades de resfriamento) e minimizando a geração de calor (com base em suas propriedades lubrificantes). Machado *et al* (2009) afirmam que as principais funções dos fluidos de corte são de lubrificação a baixas velocidades de corte, refrigeração a altas velocidades de corte, remoção dos cavacos da zona de corte e proteção da máquina-ferramenta e da peça contra oxidação, com destaque para as duas primeiras citadas.

Para Trent e Wright (2004) um bom fluido de corte não deve apenas melhorar o processo de corte mas também deve satisfazer uma série de outros requisitos:

- Não deve ser tóxico ou ofensivo para o operador;
- Não deve ser um risco de incêndio;
- Não deve corroer o material trabalhado;
- Deve proteger a superfície do material contra corrosão.

3.5.1 Mínima quantidade de lubrificante

Apesar das importantes funções desempenhadas pelo fluido de corte e dos benefícios proporcionados pela sua utilização há também os inconvenientes inevitáveis. Mas deve-se ressaltar, no entanto, que quando utilizados adequadamente os fluidos de corte apresentam pouco risco ao operador. Santos e Sales (2007) destacam alguns desses inconvenientes:

- Contaminação do meio ambiente devido à dificuldade de reciclagem do mesmo.
- Procriação de fungos e bactérias.
- Produção de vapores tóxicos, o que pode levar à doenças respiratórias.
- Doenças de pele como alergias e dermatites.
- Doenças pulmonares, como bronquite e asma.
- Câncer de diversos tipos.
- Riscos de combustão.

Diante desses inconvenientes e do pensamento sustentável que vem crescendo no decorrer dos anos desenvolveu-se uma técnica de aplicação do fluido de corte conhecida como MQL – Mínima Quantidade de lubrificante – ou MQF – Mínima Quantidade de Fluido – para outros autores. Essa técnica consiste em aplicar o fluido de corte com vazões muito baixas juntamente com ar comprimido e tem se mostrado promissora nos processos de usinagem.

Santos (2002) realizou ensaios experimentais avaliando o desempenho de brocas de aço rápido, a seco e MQL e pôde concluir que com a utilização do MQL a vida da broca, determinada em número de furos, chegou a ser até 5 vezes superior quando comparada com o ensaio a seco.

Sales *et al* (2009) investigaram a influência da aplicação técnica MQL com diferentes vazões no processo de fresamento frontal do aço AISI 4140 em comparação com a usinagem a seco. Eles chegaram a conclusão que quanto maior a vazão de fluido de corte maior foi a vida útil da ferramenta de corte.

Lqbal *et al* (2016) compararam o desempenho, tendo como base a vida das ferramentas de corte, do MQL com a condição a seco no fresamento do aço ferramenta AISI D2 endurecido. Variando o avanço por dente e a velocidade de corte, o MQL apresentou desempenho superior em todas as condições testadas.

Araújo *et al* (2017) compararam o desempenho do MQL, sendo aplicado com diferentes tipos de óleos, com a condição a seco no fresamento frontal do aço AISI 1045. Variando-se a velocidade de corte e o avanço por dente, concluíram que o MQL proporcionou maior vida para as ferramentas de corte em todas as condições testadas.

3.6 Acabamento superficial

As irregularidades nas superfícies acabadas são inerentes aos processos de usinagem convencionais, em virtude da maneira como o material é removido durante o corte. Elevadas tensões de cisalhamento, temperaturas, vibrações impostas e geradas pelo equipamento durante o processo, entre outros fatores, contribuem para uma superfície mais rugosa. Por mais que se busque alcançar uma superfície final lisa e plana, vão existir irregularidades.

A condição final de uma superfície usinada é resultado de um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e, em alguns casos, reações químicas (MACHADO *et al*, 2009). Dessa forma, a determinação da qualidade de uma superfície não é um procedimento simples, pois muitos fatores estão envolvidos.

Segundo Machado *et al* (2009), em geral, o acabamento superficial é melhor quando:

- As flexões geradas por esforços de usinagem ou vibrações são pequenas;
- A ponta da ferramenta possui um raio de arredondamento;
- A ferramenta e a peça estão corretamente posicionadas e centradas;
- O material da peça é puro, livre de defeitos como trincas, bolhas e inclusões;
- O eixo principal da máquina-ferramenta está corretamente alinhado e as guias estão sem desgaste;
- A aresta de corte está sem desgaste ou quebra;
- O corte ocorre sem aresta postiça de corte.

3.6.1 Parâmetros de quantificação da rugosidade

Um dos fatores mais importantes para se determinar a qualidade de uma superfície é a rugosidade superficial. Segundo Hassanpour *et al* (2016), a rugosidade superficial tem um efeito significativo na vida à fadiga e outras

43

propriedades da superfície final da peça além de, em muitos casos, ser o único critério para decidir se o produto final é satisfatório ou não.

Um dos parâmetros mais antigos e ainda em uso atualmente, em virtude da sua facilidade de ser obtido pela simplicidade de sua formulação é o Ra. De acordo com Santos e Sales (2007), a rugosidade média (Ra) é a média gerada pelos picos e vales de uma peça qualquer ao longo de seu comprimento trabalhado. O parâmetro Ra pode ser visualizado na Figura 16 e sua formulação matemática é dada pela seguinte fórmula:

$$R_{a} = \frac{1}{l_{m}} \int_{0}^{l_{m}} |y(x)| dx$$
(6)

Onde:

Im = Comprimeto de medição





Fonte: Carter 2015, apud Hubner, 2016 (adaptado)

Outro parâmetro utilizado, semelhante ao Ra em vários aspectos, é o Rq. É definido como a raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas do perfil em relação à linha média em um comprimento de avaliação. Segundo Maia (2009), este parâmetro vale aproximadamente 1,25 vezes o valor de Ra. É calculado a partir da seguinte formulação matemática:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2(x) dx}$$
(7)

Onde:

L = Comprimento de medição

Outro parâmetro utilizado é o Rt. É definido como a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de medição.

3.6.2 Parâmetros de corte que influenciam a rugosidade

Os parâmetros de corte podem exercer influência significativa no acabamento superficial. Silva *et al* (2011) concluíram ao realizar o fresamento do aço AISI 1047 em diferentes condições de lubrificação/resfriamento que o aumento da velocidade de corte foi prejudicial para o acabamento superficial em quase todas as condições testadas com utilização de fluido de corte, incluindo o MQL.

Sales *et al* (2009) ao realizarem ensaios de fresamento frontal do aço AISI 4140, observaram que, tendo como base os parâmetros de acabamento superficial Rq e Rt, o melhor acabamento foi quando o MQL foi aplicado a uma vazão de 200ml/h. Os autores concluíram que isso pode ser atribuído à melhor lubrificação e resfriamento atingido nessas condições, reduzindo assim o atrito com melhor fluxo de cavacos. Além disso, o aumento da vazão de fluido, em geral, proporcionou um melhor acabamento superficial.

Hassanpour *et al* (2016), ao estudarem o fresamento frontal do aço AISI 4340, endurecido por têmpera, com aplicação de MQL, perceberam que o aumento do avanço por dente, da profundidade de corte e da penetração de trabalho provocaram um aumento na rugosidade da superfície, avaliada em termos do parâmetro Ra, sendo o avanço por dente o responsável pelo aumento mais significativo. Foi observado ainda que o aumento da velocidade de corte de 50m/min para 150m/min provocou uma queda relevante no parâmetro Ra.

Stipkovic *et al* (2017), em trabalho sobre o fresamento frontal do aço endurecido AISI 4140, observaram que um aumento da profundidade de corte e do avanço por dente provocaram um pior acabamento superficial.

3.7 Vibrações mecânicas

De acordo com Rao (2008), vibração é definida como qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo e sua teoria trata do estudo de movimentos oscilatórios de corpos e as forças associadas a eles. A análise de vibrações é extremamente necessária em projetos de engenharia, como máquinas, automóveis e aeronaves. Um nível de vibração excessivo em sistemas mecânicos pode comprometer e diminuir a vida útil do equipamento (SILVA, 2009).

As vibrações do sistema máquina-ferramenta desempenham papel importante na queda da produtividade durante a usinagem (ALTINTAS, 2012).

Vibrações excessivas aceleram o desgaste e o lascamento da ferramenta, causam um acabamento superficial ruim e podem danificar o eixo de orientação da máquina (KING, 1985 *apud* ALTINTAS, 2012).

Vibrações são fenômenos inerentes ao processo de fresamento e podem causar diversos inconvenientes como desgaste prematuro das ferramentas de corte, desgaste excessivo, acabamento insatisfatório da peça e alto consumo de energia durante o processo (CHENG, 2009).

De acordo com Cheng (2009), as vibrações podem ser classificadas em três maneiras, como vibrações livres, vibrações forçadas ou vibrações autoexcitadas.

As vibrações livres têm como ocorrência apenas uma força inicial ou um choque e cessam com tempo. Não são prejudiciais ao processo, pois as máquinas ferramentas são construídas com elevada rigidez não permitindo a ocorrência da vibração por longos períodos (CHENG, 2009).

Segundo Stephenson e Agapiou (2006), as vibrações forçadas ocorrem quando uma excitação dinâmica é aplicada. São geralmente oriundas de três fontes:

- Forças alternadas, induzidas por diferenças na dureza da peça, formação de arestas postiças de corte, etc.
- Fontes internas de vibração como desgaste e folgas em elementos de transmissão.
- Fontes externas de vibração transmitidas pelas fundações da máquina.

O último tipo são as vibrações autoexcitadas, que representam trepidações que surgem no processo quando duas ou mais vibrações forçadas entram em fase, aumentando a amplitude das forças envolvidas no fresamento. Este tipo é o menos desejado, pois torna o processo de fresamento instável.

Segundo a Sandvik Coromant (2018), são quatro os fatores que influenciam a vibração mecânica durante o fresamento:

- Ângulo de posição/ataque e forças de corte: o ângulo de posição determina a direção das forças de corte, quanto maior o ângulo, maior a estabilidade do sistema, visto que as forças radiais ficam orientadas na direção de avanço, permitindo a usinagem com menor vibração.
- Diâmetro da fresa em relação à profundidade de corte: menor diâmetro da fresa requer menor valor para a potência de corte, e menor valor para o torque, diminuindo a vibração.

- Passo da fresa: quanto mais ferramentas estão em contato com a peça, maior o risco de vibrações.
- Geometria das ferramentas.

3.7.1 Métodos de monitoramento

Os sinais de vibrações podem ser analisados por diferentes maneiras. Um dos métodos utilizados neste trabalho é o valor RMS, um método quantitativo. Segundo Almeida (2007), *apud* Vitória, (2016), o valor RMS quantifica a energia que está diretamente ligada ao fenômeno estudado, indicando o poder destrutivo da vibração. Pode ser calculado pela seguinte equação:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i^2}$$

(8)

Onde:

x_i é o conjunto de valores do sinal discreto com N pontos dados.

A outra técnica para análise dos sinais empregada neste trabalho é a análise espectral de frequências a partir da Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transformer – FFT), que é um método qualitativo. De acordo com Chen (2008), apud Vitória (2016), a aplicação FFT pode ajudar a distinguir as vibrações de usinagem geradas em diferentes bandas de frequências, o que pode ser causado por desequilíbrios oriundos de quebras ou desgaste de ferramentas e se apresentam como um pico específico de uma determinada frequência distinto dos demais. Com a utilização desse princípio para diagnosticar falhas de ferramentas, é possível que se monitore a condição da ferramenta enquanto se executa a usinagem.

3.8 Métodos estatísticos

As ferramentas estatísticas são de grande importância para auxiliar na condução e na análise dos resultados de trabalhos científicos. Para a realização do trabalho o planejamento de experimentos e o boxplot foram as técnicas utilizadas.

3.8.1 Planejamento de experimentos

De acordo com Montgomery e Runger (2016), *apud* Bustamante (2017), técnicas de planejamento de experimentos com base estatística, são particularmente úteis no mundo da engenharia. Com a utilização de experimentos planejados, torna-se possível determinar qual das variáveis exerce a maior influência no desempenho do processo. Algumas aplicações típicas de experimentos planejados estatisticamente em projetos de engenharia são:

- Avaliação e comparação de configurações básicas de projeto;
- Avaliação de materiais diferentes;
- Seleção de parâmetros de projeto de modo que o produto trabalhe bem sob uma ampla variedade de condições de campo;
- Determinação dos parâmetros-chave do projeto que afetam o desempenho do produto.

A utilização do planejamento de experimentos no projeto pode resultar em produtos que sejam mais fáceis de fabricar, que tenham melhor desempenho no campo e maior confiabilidade. Além disso, os produtos podem ser projetados, desenvolvidos e produzidos em menor tempo.

3.8.2 Boxplot

De acordo com Martins (2005), o boxplot é um tipo de representação gráfica em que se realçam algumas características da amostra. Esse tipo de gráfico destaca informações como dispersão dos dados, simetria e a existência de *outliers* (valores discrepantes, ou seja, que se distinguem dos demais, dando a ideia de não pertencerem ao mesmo conjunto de dados). Ribeiro (2015) destaca que o boxplot é construído a partir de medidas separatrizes e é muito útil para comparar distribuições de dados.

Para Ribeiro (2015) as medidas separatrizes são números que dividem a sequência ordenada de dados em partes que contem a mesma quantidade de elementos da série. Segundo Piana *et al* (2009) as medidas separatrizes delimitam proporções de observações de uma variável ordinal.

A medida separatriz utilizada para a elaboração do boxplot é o quartil. De acordo com Piana *et al* (2009) os quartis, representados por Q_i , onde i = 1, 2 e 3,

são três medidas que dividem um conjunto de dados ordenado em quatro partes iguais. São elas:

- Primeiro quartil (Q₁): 25% dos valores ficam abaixo e 75% ficam acima desta medida.
- Segundo quartil (Q₂): 50% dos valores ficam abaixo e 50% ficam acima desta medida. O segundo quartil de um conjunto de dados corresponde à mediana.
- Terceiro quartil (Q₃): 75% dos valores ficam abaixo e 25% ficam acima desta medida.

A partir da Figura 17 é possível observar um esquema representativo de um gráfico *boxplot*.



Figura 17 – Esquema do gráfico boxplot

Fonte: ABG Consultoria, 2018 (Adaptado)

Os limites superior e inferior apontados na Figura 17 são os limites de determinação de dados *outliers*. Qualquer dado que esteja acima do limite superior ou abaixo do limite inferior é considerado *outlier*. Os limites inferior e superior podem ser calculados a partir das equações:

$$Li = Q_1 - 1,5(Q_3 - Q_1)$$
(9)

$$Ls = Q_3 + 1,5(Q_3 - Q_1)$$
(10)

Onde:

Li e Ls são os limites inferior e superior respectivamente, e, Q₁ e Q₃ são o primeiro e o terceiro quartil respectivamente.

4 METODOLOGIA

O presente capítulo foi dividido em quatro partes para melhor compreensão. São elas: Descrição do trabalho, Materiais, Equipamentos e Procedimento experimental.

4.1 Descrição do trabalho

A pesquisa foi desenvolvida a partir da coleta e análise de dados de desgaste nas ferramentas de corte de metal duro, rugosidade na superfície do corpo de prova e sinais de vibrações do sistema durante o fresamento frontal do aço SAE 1045. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Usinagem da PUC-MG.

As análises de microscopia óptica e MEV foram realizadas no Laboratório de Microscopia Óptica e no Laboratório de Microscopia Avançada da mesma instituição. O desgaste nas ferramentas foi monitorado pela microscopia óptica e, ao fim do processo, pela microscopia eletrônica de varredura.

O acabamento superficial do corpo de prova foi avaliado, a cada parada, com a utilização de um rugosímetro. Os sinais vibracionais foram monitorados nos eixos X, Y e Z a partir da utilização de dois acelerômetros: um instalado próximo às ferramentas de corte e outro instalado em contato com o corpo de prova. Na Figura 18 é possível observar um fluxograma com o resumo da sequência de procedimentos que foram adotados.



Figura 18 – Fluxograma do trabalho

Fonte: Próprio autor

4.2 Materiais

O material dos corpos de prova utilizados para a realização dos experimentos foi o aço SAE 1045 laminado cortado em barras de seção transversal quadrada de dimensões de 100mm x 100mm e 400mm de comprimento. Antes da realização dos ensaios, os corpos de prova foram faceados com o objetivo de retirar a camada de óxido e deixar a superfície o mais regular possível. Na Figura 19 é possível observar os corpos de prova, já faceados, antes dos ensaios.

Figura 19 – Corpos de prova

Fonte: Próprio autor

A composição química do material, cedida pelo fornecedor, pode ser visualizada na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química em porcentagem de peso do aço SAE 1045 utilizado

Elemento	С	Si	Mn	Р	S	AI	Ti
% peso	0,447	0,18	0,65	0,012	0,003	0,041	0,001

Fonte: Takono Ferro e Aço.

As ferramentas de corte utilizadas nos ensaios são ferramentas de metal duro, de especificação 490R 08T308M-PM 1030, revestidas com (TiAl)N, doadas pela Sandvik Coromant. Segundo a Sandvik Coromant (2012) é recomendável trabalhar para essa ferramenta com uma velocidade de corte (Vc) de 275m/min e um avanço por dente (fz) de 0,15mm. As características e especificações das ferramentas podem ser observadas na Figura 20 e na Tabela 3 respectivamente.

Figura 20 – Ferramenta de corte utilizada



Fonte: Sandvik Coromant, 2012 (adaptado).

Tabela 3 – Especificações da ferramenta de corte utilizada.

Ferramenta 490R 08T308M-PM 1030			
Diâmetro do círculo inscrito (IC)	8,5mm		
Comprimento efetivo de corte (LE)	5,6mm		
Comprimento da aresta de corte alisadora (BS)	1,2mm		
Raio de ponta (RE)	0,8mm		
Espessura da ferramenta (S)	3,3mm		
Ângulo de folga principal (AN)	15º		
Comprimento da aresta de corte (L)	8,5mm		
Revestimento da ferramenta	TIAIN PVD		

Fonte: Sandvik Coromant, 2012 (adaptado).

As ferramentas de corte foram montadas em uma fresa da Sandvik Coromant, modelo 490-040Q16-08M, que tem capacidade para quatro insertos e possui um diâmetro de corte de 40mm. As demais características e especificações são apresentadas na Figura 21 e na Tabela 4, respectivamente.

Figura 21 – Fresa utilizada no trabalho



Fonte: Sandvik Coromant, 2012 (adaptado).

Fresa CoroMill 490-040Q16-08M			
Diâmetro de conexão (DCON)	16mm		
Profundidade de corte máxima (APMX)	5,5mm		
Comprimento funcional (LF)	40mm		
Diâmetro da fresa (DC)	40mm		
Ângulo de posição (Xr)	90°		
Número de ferramentas	4		
Rotação máxima	29300rpm		
Torque	1,2N.m		

Tabela 4 – Especificações da fresa utilizada no trabalho.

Fonte:	Sandvik	Coromant	(adaptado).

Os fluidos de corte para aplicação do MQL utilizados no trabalho foram o Vascomill MKS 22, óleo vegetal, e o Vascomill MMS FA 2, óleo à base de álcool graxo, doados pela Blaser Swisslube do Brasil. A partir da Figura 22 e da Tabela 5 é possível observar os fluidos e suas especificações, respectivamente, fornecidas pelo fabricante.





Fonte: Próprio autor.

Fluidos	Vascomill MKS 22	Vascomill MMS FA 2	
	Fluido de corte, para	Fluido isento de óleo mineral	
	utilização em operações de	e cloro, apropriado para	
	MQL, à base de ésteres	atender operações de MQL,	
Descrição	vegetais, não miscível em	à base de álcool graxo, é um	
	água.	lubrificante altamente ativo	
		por causa da estrutura polar	
		das moléculas.	
	Aços liga, aço inox, titânio e	Alumínio e suas ligas,	
	suas ligas, alumínio e suas	produtos ferrosos, aços,	
Materiais	ligas, ferro fundido e metais	titânio e metais não ferrosos.	
	não ferrosos.	Também aplicável a	
		materiais submetidos a	
		tratamento térmico.	
Benefícios	Boas propriedades de	Excelentes propriedades de	
	lubrificação, matéria-prima	lubrificação, boa aderência e	
	renovável, não agride a pele,	conglutinação, não deixa	
	biodegradável, emissões de	mancha ou resíduos na	
	névoa e fumaça reduzidas	peça.	
	no ambiente de trabalho.		
Viscosidade (40°C)	22mm ² /s	32mm²/s	
Densidade (20ºC)	0,90g/cm ³	0,85g/cm ³	
Ponto de fulgor	249°C	202°C	

Tabela 5 – Especificações dos fluidos de corte.

Fonte: Blaser Swisslube do Brasil (adaptado)

4.3 Equipamentos

Os ensaios de fresamento foram conduzidos com a utilização de um centro de usinagem Discovery 560 – ROMI, controlado por software de CNC (Comando Numérico Computadorizado) da Siemens. Na Figura 23 observa-se o centro de usinagem que será utilizado.



Figura 23 – (a) Centro de Usinagem Discovery 560 – ROMI; (b) Painel de controle Siemens.

Fonte: Próprio autor

Para aquisição dos dados de acabamento superficial dos corpos de prova foi utilizado um rugosímetro Taylor Robson, que pode ser observado na Figura 24. Os dados foram tratados com o auxílio do software Taylor Hobson.



Figura 24 – Rugosímetro utilizado na pesquisa.

Fonte: Próprio autor

Para a aplicação do MQL nos ensaios foi utilizado um equipamento Accu-Lube, conforme pode ser visto na Figura 25.



Figura 25 – Esquema do equipamento de MQL.

Fonte: Próprio autor

Para acompanhar a evolução do desgaste nas ferramentas de corte será utilizado um microscópio óptico modelo Zeiss Stereo Discovery V8 com uma lente objetiva com ampliação de 8x e lente ocular de 10x sendo possível ser gerada uma ampliação de 80x. Será acoplada à lente ocular uma câmera Zeiss AxioCam ERc 5s de 5.0 Megapixel. O software para tratamento das imagens será o Zeiss AxioVision. Os equipamentos podem ser observados na Figura 26.



Figura 26 – (a) Montagem do microscópio óptico; (b) Câmera Zeiss ERc 5s.

Fonte: Próprio autor

Para análise final do aspecto das ferramentas de corte, bem como as formas e mecanismos de desgaste nelas presente, será utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo JEOL JSM-IT300, com capacidade de ampliação de 50 mil vezes e aceleração de voltagem de 30kV. Este equipamento pode ser observado na Figura 27.



Figura 27 – Montagem do MEV.

Fonte - Próprio autor

Para monitorar as vibrações mecânicas do sistema foram utilizados dois acelerômetros triaxiais PCB Piezotronics modelo 356B11 e um amplificador QuantumX MX1601B e o software utilizado para tratamento dos dados foi Catman AP 3.1. Esses equipamentos são mostrados na Figura 28.



Figura 28 – (a) Acelerômetro triaxial instalado no eixo da fresa; (b) Amplificador de sinais.

O amplificador QuantumX MX1601B tem capacidade de monitorar dados de dezesseis canais simultaneamente. Porém, como foram utilizados dois acelerômetros triaxiais, foram utilizados apenas seis canais do aparelho.

4.4 Procedimento experimental

Para facilitar o entendimento dos experimentos foi feita uma divisão em seis partes. São elas: Ensaios de fresamento, Parâmetros de corte aplicados, Avaliação do acabamento superficial, Microscopia óptica, Microscopia eletrônica de varredura e Aquisição de dados de vibrações mecânicas.

4.4.1 Ensaios de fresamento

Os ensaios de fresamento foram conduzidos tendo como base duas direções de usinagem: longitudinal, ao longo do comprimento do corpo de prova, e transversal, ao longo da largura do mesmo. Na Figura 29 é mostrada uma representação esquemática com base nas direções estabelecidas.

Figura 29 – Esquema com as direções de usinagem (a) Longitudinal; (b) Transversal.



Fonte - Próprio autor.

Para facilitar as explicações, a palavra passe no presente trabalho faz referência a toda trajetória percorrida pela fresa a cada ciclo. Assim sendo, é importante observar que na trajetória longitudinal há um menor número de entradas

e saídas da ferramenta de corte a cada passe. Na direção longitudinal são três entradas e saídas da fresa a cada passe e na direção transversal são onze entradas e saídas a cada passe.

O critério estabelecido para o fim de vida das ferramentas de corte e, consequentemente, interrupção dos testes foi o de que alguma das ferramentas apresentasse desgaste de flanco $V_{Bmax} = 0,6mm$. Cada ferramenta de corte teve sua posição demarcada na fresa, como pode ser visto na Figura 30.



Figura 30 – Marcações para posicionamento das ferramentas

Fonte – Próprio autor.

A quantidade de passes dados no corpo de prova ocorreu de maneira progressiva. A partir da Tabela 6 é possível visualizar o critério adotado. Na primeira operação foi dado um passe, na segunda também um passe, na terceira dois passes e assim progressivamente até que alguma ferramenta de corte atingisse o desgaste de flanco máximo de 0,6mm.

Tabela 6 – Passes	dados	a cada	operação.
-------------------	-------	--------	-----------

Operação	Número de passes	Passes acumulados
-	-	-
1 ⁰	1	1
2º	1	2
3°	2	4
4°	2	6
5°	4	10
6°	4	14
7 ⁰	6	20
	•	

Fonte – Próprio autor

É importante destacar que embora seja reconhecido que a direção de laminação da peça também exerce influência na evolução do desgaste das ferramentas de corte, este parâmetro não será avaliado no presente trabalho. Para investigar com maior precisão essa influência seria essencial que o número de entradas e saídas das ferramentas no corpo de prova fosse igual nas duas direções, o que não é verificado no trabalho.

4.4.2 Parâmetros de corte aplicados

Para a realização dos experimentos foram fixados a Vc, o fz e o ap. Com isso foi possível calcular os valores do avanço e da rotação. É importante destacar que os valores escolhidos para os parâmetros de corte foram valores acima daqueles recomendados pelo fabricante. Essa escolha ocorreu com a finalidade de garantir a ocorrência de desgaste acentuado com os materiais disponíveis, uma vez que não haveria recursos disponíveis para aquisição de mais materiais. Os parâmetros de corte podem ser observados na Tabela 7.

Velocidade de corte (Vc) m/min	400
Profundidade de corte (ap) mm	0,5
Avanço por dente (fz) mm/dente	0,25
Avanço (f) mm/rev.	1
Rotação (n) r.p.m	3183

Tabela 7 – Parâmetros de corte fixados.

Fonte – Próprio autor

Para cada uma das condições estabelecidas – a seco, MQL com o fluido Vascomill MKS 22 e MQL com o fluido Vascomill MMS FA 2 – foram realizados ensaios na direção longitudinal e na direção transversal, totalizando seis situações de teste. O fluido foi aplicado a uma vazão de 60ml por hora, a uma pressão de 0,6MPa e sendo pulsado 75 vezes por minuto.

4.4.3 Avaliação do acabamento superficial

Para avaliar o acabamento superficial dos corpos de prova foram analisados três parâmetros de rugosidade: Ra, Rq e Rt. O critério adotado foi extrair a medição, a partir do rugosímetro, em três pontos no corpo de prova, conforme pode ser observado na Figura 31, e fazer a média aritmética dos valores coletados para cada parâmetro. Foi ajustado um cut-off de 0,8mm para um comprimento de amostra de 4mm.





Para medir o acabamento superficial nos corpos de prova que foram fresados com aplicação de MQL foi utilizada uma pistola de ar comprimido para remover os resquícios de óleo da superfície nos pontos de coleta dos dados. O ar saía a uma pressão de 0,6MPa. O equipamento pode ser visualizado na Figura 32.



Figura 32 – Pistola de ar comprimido.

Fonte - Próprio autor

4.4.4 Microscopia óptica

Ao término de cada operação de passes as ferramentas de corte eram desmontadas da fresa e conduzidas ao Laboratório de Microscopia Óptica para serem analisadas. Caso alguma ferramenta apresentasse desgaste de flanco de 0,6mm, ou maior, os testes para aquela condição eram encerrados e as ferramentas encaminhadas para o MEV. Se o desgaste de flanco fosse menor que 0,6mm as ferramentas de corte eram novamente montadas na fresa para serem submetidas a uma nova operação de passes. Para garantir que cada ferramenta mantivesse a posição estabelecida na Figura 30, foram feitas marcações também em seu estojo, conforme pode ser visto na Figura 33.



Figura 33 – Marcações para posicionamento das ferramentas

Fonte – Próprio autor.

4.4.5 Microscopia eletrônica de varredura

Após o término dos ensaios de fresamento, as ferramentas de corte foram encaminhadas ao laboratório de microscopia avançada e submetidas a análises em microscópio eletrônico de varredura. O objetivo desta etapa era identificar as formas e os mecanismos de desgaste atuantes nas ferramentas.

As ferramentas foram submetidas a uma limpeza com álcool isopropílico 99,8% e posteriormente foram fixadas no porta-amostras com uma fita de carbono dupla face.

4.4.6 Decapagem química

Para poder avaliar os mecanismos de desgaste atuantes nas ferramentas de corte, é necessário que as mesmas sejam submetidas a um processo de decapagem química com a finalidade de se retirar os materiais depositados. Dessa forma é possível compreender o que proporcionou essas deposições de material nas ferramentas de corte.

O processo de decapagem química foi realizado no Laboratório de Análises Instrumentais da PUC-MG e foi utilizado ácido clorídrico 30% concentrado. As ferramentas foram mergulhadas na solução e permaneceram por 24 horas. Após a decapagem química foram feitas novas imagens no MEV.

4.4.7 Aquisição de dados de vibrações mecânicas

Simultaneamente aos ensaios de fresamento, foram monitorados os sinais de vibrações mecânicas do sistema composto pelas ferramentas de corte e os corpos de prova. Foi instalado um acelerômetro triaxial em cada parte do sistema: um no corpo de prova e outro no eixo guia de fixação da fresa, conforme pode ser visto na Figura 34. O acelerômetro fixado nos corpos de prova foi definido como o acelerômetro 1 e o fixado na guia o 2.

Cada acelerômetro possui um cabo com três conectores: um para cada eixo cartesiano. Esses conectores são acoplados aos canais do amplificador mostrado na Figura 28 (b). Dessa forma, os conectores acoplados aos canais 1, 2 e 3 da Figura 28 (b) correspondem aos sinais emitidos nos eixos X, Y e Z, respectivamente, do acelerômetro 1 e os conectores acoplados aos canais 4, 5 e 6 correspondem aos sinais emitidos nos eixos X, Y e Z.

O amplificador é conectado ao computador e com o auxílio do software Catman AP os sinais foram registrados durante os ensaios de fresamento. Para reduzir a quantidade de dados coletados e facilitar a posterior análise dos mesmos foi definido um intervalo de tempo de cinco segundos de monitoramento e a coleta era realizada sempre na entrada e na saída de cada passe, pois são os instantes críticos, quanto aos choques mecânicos, no fresamento. Posteriormente os dados foram tratados sob um posto de vista qualitativo, por meio de um espectro de frequência gerado a partir de uma FFT, e sob um ponto de vista quantitativo, por meio da RMS. A FFT foi gerada pelo Catman AP e o valor da RMS foi obtido com o auxílio do software Matlab.



Figura 34 – Posicionamento dos acelerômetros no sistema.

Fonte – Próprio autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados em tópicos os resultados obtidos no fresamento frontal do aço SAE 1045 nas condições estabelecidas seguindo os passos descritos detalhadamente na metodologia. Os tópicos são: Desgaste nas ferramentas de corte, Acabamento superficial e Sinais de vibrações mecânicas.

Uma observação merece destaque nesse momento. Com o decorrer dos ensaios percebeu-se que o inserto que estava na posição 3 sempre era o primeiro a atingir o desgaste máximo estabelecido. Para averiguar o que podia estar acontecendo foi realizado um teste de batimento com a fresa, com as ferramentas montadas, para detectar algum possível desvio na posição da ferramenta 3. A Figura 35 mostra a realização do teste. O relógio comparador apontou um desvio de 10µm na posição de número 3 da fresa. Após a detecção desse desvio, o teste de batimento foi repetido antes do início dos ensaios para todas as condições que restavam.





Fonte – Próprio autor.

Utilizar uma fresa desbalanceada não é o ideal, pois há o incremento de mais uma variável ao processo, porém como já haviam sido finalizados os ensaios em algumas condições e devido aos recursos serem limitados, optou-se por continuar os experimentos com a mesma fresa. A avaliação do desgaste passou a ser focada principalmente no inserto que apresentava o desgaste acentuado, o que ocorreu em quase todas as condições no inserto localizado na posição 3.

5.1 Desgaste nas ferramentas de corte

Com a finalidade de simplificar os resultados e discussões os tópicos para o desgaste foram divididos de acordo com as condições empregadas nos ensaios: a seco, MQL com o fluido Vascomill MKS 22 e MQL com fluido Vascomill MMS FA 2.

5.1.1 Fresamento a seco

A primeira condição testada no trabalho foi o fresamento frontal a seco na direção longitudinal ao longo do comprimento do corpo de prova. A Tabela I do apêndice mostra os valores de desgaste de flanco obtidos para as ferramentas de corte em cada operação de passes. A Figura 36 mostra a evolução do desgaste de flanco nas ferramentas de corte em função do número de passes para esta condição.

Figura 36 – Evolução do desgaste de flanco nas ferramentas em função do número de passes acumulados para a condição a seco na direção longitudinal.



Fonte - Próprio autor

A partir da Tabela I e da Figura 36 é possível perceber que a ferramenta de posição 3 foi a primeira a atingir o desgaste máximo estabelecido. Nessa condição foram realizados um total de 50 passes e o desbalanceamento da fresa na posição 3 foi crucial para a evolução mais rápida do desgaste.

Na Figura 37 é possível observar, através das imagens em microscópio óptico, o aspecto final da aresta da superfície de saída da ferramenta 3 ao fim dos testes nessa condição. Pode-se perceber o elevado desgaste de flanco na aresta de corte em (a) e uma cratera formada na superfície de saída em (b).



Figura 37 – Microscopia óptica da ferramenta 3 na condição a seco e direção longitudinal: (a) Aresta de corte; (b) superfície de saída.

Fonte – Próprio autor

As formas e os mecanismos de desgaste atuantes da ferramenta 3 são evidenciados, através de imagens no MEV com EDS na Figura 38. Pela imagem da superfície de saída em (a) é possível perceber, como forma, o desgaste de cratera. Essa forma de desgaste pode ter ocorrido devido à abrasão dos cavacos com a superfície de saída da ferramenta de corte ou devido à difusão de átomos em virtudes das elevadas temperaturas alcançadas na região da superfície de saída. Poderia haver questionamentos sobre a ocorrência de difusão com a utilização de ferramenta de metal duro, pois os carbonetos de tântalo, nióbio ou titânio adicionados à mesma inibem a ocorrência de difusão. No entanto, é importante lembrar que os parâmetros de corte utilizados na pesquisa são consideravelmente maiores do que os recomendados pelos fabricantes. Assim sendo, as temperaturas geradas durante o corte certamente foram superiores àquelas desejadas, e o aumento da temperatura favorece a ocorrência de processos difusionais.

Em (b) é possível observar a mesma vista de (a), porém após a ferramenta passar pela decapagem química, o que facilita a identificação dos mecanismos de desgaste atuantes na mesma. O aspecto liso apresentado na superfície de saída da ferramenta em (b) indica a ocorrência do mecanismo de desgaste por difusão, porém com o fato curioso de a difusão ocorrer em vários planos. Uma possível explicação para isso é ter ocorrido microlascamentos antes da difusão. Também é possível observar em (b) uma trinca gerada possivelmente pelo mecanismo de fadiga, que pode ter sido originado pelos choques mecânicos ou pelos choques térmicos. Ainda em (b) pode-se notar uma evidência de desgaste por adesão, pois

na região indicada havia material depositado, conforme o espectro EDS A mostra em (c), e ela apresenta irregularidades. O elevado percentual de oxigênio no espectro EDS em (c) evidencia a oxidação ocorrida durante o processo.

Figura 38 – MEV da ferramenta 3 na condição a seco e direção longitudinal: (a) Superfície de saída; (b) Superfície de saída após decapagem química; (c) Espectro A.



Fonte – Próprio autor

A partir da Figura 39 é possível observar as formas e os mecanismos de desgaste atuantes na aresta de corte da ferramenta 3. Em (a) é possível perceber o predomínio do desgaste de flanco, que é gerado principalmente pelo mecanismo de abrasão, como forma de desgaste, além da existência de uma trinca e da ocorrência de deposição de material da peça, confirmado pelo espectro EDS B em (c). A partir de (b) é possível notar novamente um aspecto liso na superfície desgastada, o que é uma evidência do mecanismo de difusão e novamente esse mecanismo ocorre em vários planos, o que possivelmente ocorreu pelo fato de ter ocorrido microlascamentos antes. A trinca indicada possivelmente foi gerada pelo mecanismo de fadiga.





Fonte - Próprio autor

A segunda condição testada no trabalho foi o fresamento frontal a seco na direção transversal ao longo da largura do corpo de prova. A Tabela II do apêndice mostra os valores de desgaste de flanco obtidos para as ferramentas em cada operação de passes. A Figura 40 mostra a evolução do desgaste de flanco nas ferramentas de corte em função do número de passes para esta condição. A partir da Figura 40 e da Tabela II é possível perceber que a ferramenta de posição 3 foi a primeira a atingir o desgaste máximo estabelecido, mas a ferramenta 2 também apresentou um desgaste final acentuado. O desbalanceamento da fresa na posição 3 foi crucial para a evolução mais rápida do seu desgaste e provavelmente foi também o fator responsável pelo desgaste elevado na ferramenta de posição 2. Isso pode ser explicado pelo fato da ferramenta de posição 2 ser a mais próxima da ferramenta desbalanceada no sentido de rotação da fresa. Nessa condição foram realizados um total de 52 passes.

1,1 1 0,9 Desgaste de flanco (mm) 0,8 0,7 0,6 Ferramenta 1 0,5 Ferramenta 2 0,4 Ferramenta 3 Ferramenta 4 0,3 0,2 0,1 0 50 0 10 20 30 40 60 Número de passes acumulados

Figura 40 – Evolução do desgaste de flanco nas ferramentas em função do número de passes acumulados para a condição a seco na direção transversal.

Fonte - Próprio autor

Na Figura 41 é possível observar, através das imagens em microscópio óptico, o aspecto final da aresta de corte e da superfície de saída das ferramentas 2 e 3 ao fim dos testes nessa condição. Pode-se perceber o elevado desgaste de flanco em (a) e (c) e uma cratera formada na superfície de saída em (b) e (d).

Figura 41 – Microscopia óptica das ferramentas 2 e 3 na condição a seco e direção transversal: (a) Aresta de corte da ferramenta 2; (b) Superfície de saída da ferramenta 2; (c) Aresta de corte da ferramenta 3; (d) Superfície de saída da ferramenta 3.





Fonte – Próprio autor

As formas e os mecanismos de desgaste atuantes na superfície de saída da ferramenta 2 são evidenciados na Figura 42. A partir de (a) é possível perceber, como forma, o desgaste de cratera e ainda a deposição de material da peça e oxidação nos espectros EDS A e B em (c) e (d), respectivamente. A partir de (b) é possível detectar o mecanismo de abrasão, indicado pelas ranhuras contínuas e sempre na mesma direção da superfície. É possível detectar também uma evidência do mecanismo de adesão, pois no local indicado a superfície apresenta irregularidades e antes da decapagem química havia deposição de material da peça. Além disso, é possível notar a aparência lisa da superfície o que evidencia a ocorrência do mecanismo de difusão e novamente ocorrendo em vários planos, o que indica a ocorrência de microlascamentos antes da difusão.
Figura 42 – MEV da ferramenta 2 na condição a seco e direção transversal: (a) Superfície de saída; (b) Superfície de saída após decapagem química; (c) Espectro B; (d) Aresta de corte; (e) Espectro C.



As formas e os mecanismos de desgaste atuantes na aresta de corte da ferramenta 2 são evidenciados na Figura 43. A partir de (a) é possível observar como forma o desgaste de flanco, além da deposição de material da peça confirmada pelo espectro EDS C em (c). Em (b) o mecanismo de difusão é evidenciado pelo aspecto liso presente na superfície de folga da ferramenta.



Figura 43 – MEV da ferramenta 2 na condição a seco e direção transversal: (a) Aresta de corte; (b) Aresta de corte após decapagem química; (c) Espectro A.

Fonte – Próprio autor

As formas e os mecanismos de desgaste atuantes na superfície de saída da ferramenta 3 são evidenciados na Figura 44. É possível notar em (a) a cratera como forma de desgaste e, além disso, a deposição de material da peça evidenciado pelo espectro EDS A em (c). Em (b) observa-se o mecanismo de abrasão evidenciado pela presença de ranhuras contínuas no local indicado. É possível observar ainda a presença de uma trinca que provavelmente foi originada pelo mecanismo de fadiga. Além disso, nota-se que a superfície de saída possui aspecto liso, o que evidencia a ocorrência de difusão na ferramenta e, novamente, ocorreu em vários planos, indicando a ocorrência de microlascamentos antes da difusão.



Figura 44 – MEV da ferramenta 3 na condição a seco e direção transversal: (a) Superfície de saída; (b) Superfície de saída após decapagem química; (c) Espectro A.

Fonte - Próprio autor

A partir da Figura 45 é possível observar as formas e os mecanismos de desgaste atuantes na aresta de corte da ferramenta 3. Em (a) nota-se a presença do desgaste de flanco como forma de desgaste, além da presença de deposição do material da peça evidenciado pelo espectro EDS B em (c). Em (b) observa-se novamente a predominância do mecanismo de difusão, evidenciado pelo aspecto liso apresentado na superfície da ferramenta de corte e novamente a ocorrência de difusão em vários planos, o que evidencia a ocorrência de microlascamentos anteriormente. Além disso, é possível observar a presença de uma trinca que possivelmente foi originada pelo mecanismo de fadiga.





Fonte – Próprio autor

5.1.2 Fresamento com MQL com o fluido vascomill MKS 22

Nessa condição os ensaios foram conduzidos primeiramente na direção longitudinal. A Tabela III do apêndice mostra os valores de desgaste de flanco obtidos para as ferramentas de corte em cada operação de passes. A Figura 46 mostra a evolução do desgaste de flanco nas ferramentas para esta condição. É possível perceber que a ferramenta de posição 3 foi a primeira a atingir o desgaste máximo estabelecido, mas a ferramenta 2 também apresentou um desgaste final acentuado. O desbalanceamento da fresa na posição 3 foi crucial para a evolução mais rápida do seu desgaste e provavelmente foi também o fator responsável pelo desgaste final elevado na ferramenta de posição 2.



Figura 46 – Evolução do desgaste de flanco nas ferramentas em função do número de passes acumulados para a condição MQL com fluido Vascomill MKS 22 na direção longitudinal.

Fonte - Próprio autor

Na Figura 47 é possível observar, através das imagens em microscópio óptico o aspecto final da aresta de corte e da superfície de saída das ferramentas 2 e 3 ao fim dos testes nessa condição. Pode-se perceber o elevado desgaste de flanco em (a) e (c) e uma cratera formada na superfície de saída em (b) e (d).

Figura 47 – Microscopia óptica das ferramentas 2 e 3 na condição MQL com fluido Vascomill MKS 22 e direção longitudinal: (a) Aresta de corte da ferramenta 2; (b) Superfície de saída da ferramenta 2; (c) Aresta de corte da ferramenta 3; (d) Superfície de saída da ferramenta 3.





Fonte – Próprio autor

As formas e os mecanismos de desgaste atuantes na superfície de saída da ferramenta 2 são evidenciados na Figura 48. Pela imagem em (a) é possível perceber, como forma, o desgaste de cratera, além da deposição de material e formação de óxidos evidenciados pelo espectro EDS A em (c). Em (b) é possível observar como mecanismo de desgaste predominante a difusão, evidenciado pelo aspecto liso presente na superfície da ferramenta de corte, porém dessa vez não há evidências de possíveis microlascamentos anteriores à difusão. É possível notar também evidências de adesão evidenciada placas de material depositado, mesmo após a decapagem química.

Figura 48 – MEV da ferramenta 2 na condição MQL com fluido Vascomill MKS 22 na direção longitudinal: (a) Superfície de saída; (b) Superfície de saída após decapagem química; (c) Espectro A.





Fonte - Próprio autor

As formas e os mecanismos de desgaste atuantes aresta de corte da ferramenta 2 são evidenciados na Figura 49. Nota-se em (a) o desgaste de flanco como forma de desgaste além da deposição de material da peça e oxidação, comprovados pelos espectros B e C no EDS em (c). A partir de (b) é possível observar que o principal mecanismo de desgaste atuante é a difusão novamente em vários planos, o que indica que foi antecedido de microlascamentos. É possível observar ainda uma trinca possivelmente originada pelo mecanismo de fadiga.

Figura 49 – MEV da ferramenta 2 na condição MQL com fluido Vascomill MKS 22 na direção longitudinal: (a) Aresta de corte; (b) Aresta de corte após decapagem química; (c) Espectro B; (d) Espectro C.





As formas e os mecanismos de desgaste atuantes na superfície de saída da ferramenta 3 são evidenciados na Figura 50. Em (a), é possível observar a cratera como forma de desgaste. A partir de (b) nota-se que o único mecanismo de desgaste evidente é a difusão, porém dessa vez ela ocorreu de maneira uniforme, sem indícios de ocorrência de microlascamentos antes. Pelo espectro A no EDS mostrado em (c) observa-se que a maior parte dos elementos são da matriz da ferramenta de corte, mas ainda existem elementos do material da peça.

Figura 50 – MEV da ferramenta 3 na condição MQL com fluido Vascomill MKS 22 na direção longitudinal: (a) Superfície de saída; (b) Superfície de saída após decapagem química; (c) Espectro A.



Fonte – Próprio autor

(C)

As formas e os mecanismos de desgaste atuantes na aresta de corte da ferramenta 3 são evidenciados na Figura 51. Em (a) nota-se a presença do desgaste de flanco como forma de desgaste atuante, além da deposição de material da peça, confirmado pelo espectro A do EDS mostrado em (c). A partir de (b) é possível observar que o mecanismo de desgaste predominante é a difusão e a mesma ocorreu em vários planos da superfície, ou seja, sugere que foi antecedida por microlascamentos.



Figura 51 – MEV da ferramenta 3 na condição MQL com fluido Vascomill MKS 22 na direção longitudinal: (a) Aresta de corte; (b) Aresta de corte após decapagem química; (c) Espectro A.

Fonte – Próprio autor

Após o término dos ensaios na direção longitudinal, para esta condição, foram realizados os ensaios na direção transversal. A Tabela IV do apêndice mostra os valores de desgaste de flanco obtidos para as ferramentas de corte em cada operação de passes. A Figura 52 mostra a evolução do desgaste de flanco nas ferramentas para esta condição. É possível perceber que a ferramenta de posição 3 foi a primeira a atingir o desgaste máximo estabelecido. Nenhuma outra ferramenta apresentou desgaste de flanco acentuado ao término dos ensaios para esta condição. Como mostrado adiante, a ferramenta 2 apresentou uma cratera em sua superfície de saída. O desbalanceamento da fresa na posição 3 foi crucial para a evolução mais rápida do seu desgaste.



Figura 52 – Evolução do desgaste de flanco nas ferramentas em função do número de passes acumulados para a condição MQL com fluido Vascomill MKS 22 na direção transversal.

Fonte - Próprio autor

Na Figura 53 é possível observar, através das imagens em microscópio óptico o aspecto final da aresta de corte e da superfície de saída da ferramenta 3 e a superfície de saída da ferramenta 2 ao fim dos testes nessa condição. Pode-se perceber o elevado desgaste de flanco em (a) e uma cratera formada na superfície de saída em (b) e em (c).

Figura 53 – Microscopia óptica das ferramentas 2 e 3 na condição MQL com fluido Vascomill MKS 22 e direção transversal: (a) Aresta de corte da ferramenta 3; (b) Superfície de saída da ferramenta 3; (c) Superfície de saída da ferramenta 2.





Fonte – Próprio autor

As formas e os mecanismos de desgaste atuantes na superfície de saída da ferramenta 2 são evidenciados na Figura 54. Em (a) é possível observar o desgaste de cratera como forma, além da deposição de material da peça e formação de óxidos confirmados pelo espectro A no EDS em (c). A partir de (b) é possível notar o mecanismo de abrasão evidenciado pelas ranhuras indicadas na borda da ferramenta. É possível perceber ainda o mecanismo de difusão evidenciado pelo aspecto liso da superfície da ferramenta. A difusão novamente ocorreu em vários planos, o que é um indicativo da ocorrência antecedida de microlascamentos.





Fonte – Próprio autor

(C)

As formas e os mecanismos de desgaste atuantes na superfície de saída da ferramenta 3 são evidenciados na Figura 55. Em (a) nota-se como forma o desgaste de cratera, além da deposição de material da peça confirmada pelo espectro A no EDS em (c). A partir de (b) é possível observar o mecanismo de abrasão, evidenciado pela presença de ranhuras contínuas na borda da ferramenta. Outro mecanismo observado é a difusão, evidenciado pelo aspecto liso da superfície da ferramenta e novamente a difusão ocorreu em vários planos, o que indica a ocorrência de microlascamentos antes.

Figura 55 – MEV da ferramenta 3 na condição MQL com fluido Vascomill MKS 22 na direção transversal: (a) Superfície de saída; (b) Superfície de saída após decapagem química; (c) Espectro A.







A partir da Figura 56 é possível observar as formas e mecanismos de desgaste atuantes na aresta de corte da ferramenta 3. Em (a) nota-se a presença do desgaste de flanco como forma de desgaste atuante, além da deposição de material da peça confirmada pelo espectro A no EDS em (c). Ainda em (a) é possível observar um lascamento em uma região da aresta de corte. A partir de (b) é possível observar o mecanismo de desgaste por difusão, evidenciado pelo aspecto liso da superfície da ferramenta e, novamente, a ocorrência em vários planos, o que sugere a ocorrência de microlascamentos anteriormente à difusão.

Figura 56 – MEV da ferramenta 3 na condição MQL com fluido Vascomill MKS 22 na direção transversal: (a) Aresta de corte; (b) Aresta de corte após decapagem química; (c) Espectro A.

Fonte – Próprio autor

5.1.3 Fresamento com MQL com o fluido vascomill MMS FA 2

Nessa condição os ensaios foram conduzidos primeiramente na direção longitudinal. A Tabela V do apêndice mostra os valores de desgaste de flanco obtidos para as ferramentas de corte em cada operação de passes. A Figura 57 mostra a evolução do desgaste de flanco nas ferramentas para esta condição. É possível perceber que a ferramenta de posição 2 foi a primeira a atingir o desgaste máximo estabelecido. A ferramenta de posição 3 também apresentou desgaste acentuado, mas, para essa condição, não foi a primeira a atingir o valor máximo de desgaste de flanco estabelecido. O desbalanceamento da fresa foi crucial para a evolução mais rápida do desgaste nas ferramentas de posição 2 e 3.



Figura 57 – Evolução do desgaste de flanco nas ferramentas em função do número de passes acumulados para a condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 na direção longitudinal.

Fonte - Próprio autor

Na Figura 58 é possível observar, através das imagens em microscópio óptico o aspecto final da aresta de corte e da superfície de saída das ferramentas 2 e 3 ao fim dos testes nessa condição. Pode-se perceber o elevado desgaste de flanco em (a) e (c) e uma cratera formada na superfície de saída em (b) e (d).

Figura 58 – Microscopia óptica das ferramentas 2 e 3 na condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 e direção longitudinal: (a) Aresta de corte da ferramenta 2; (b) Superfície de saída da ferramenta 2; (c) Aresta de corte da ferramenta 3; (d) Superfície de saída da ferramenta 3.





Fonte – Próprio autor

As formas e os mecanismos de desgaste atuantes na superfície de saída da ferramenta 2 podem ser observados na Figura 59. Em (a) é possível observar a cratera como forma de desgaste, além da deposição de material da peça confirmada pelo espectro A no EDS em (c). Em (b) nota-se a ocorrência do mecanismo de desgaste por abrasão evidenciado pelas ranhuras contínuas e paralelas na região indicada na borda. Além disso é possível observar o mecanismo de desgaste por difusão, confirmado pelo aspecto liso apresentado pela superfície da ferramenta de corte. A ocorrência da difusão em vários planos sugere que foi antecedida por microlascamentos.

Figura 59 – MEV da ferramenta 2 na condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 na direção longitudinal: (a) Superfície de saída; (b) Superfície de saída após decapagem química; (c) Espectro A.





Fonte – Próprio autor

Na Figura 60 é possível observar as formas e os mecanismos de desgaste atuantes na aresta de corte da ferramenta 2. A partir de (a) nota-se a presença do desgaste de flanco como forma de desgaste atuante, além da deposição de material da peça confirmada pelo espectro B no EDS em (c). A partir de (b) é possível observar o mecanismo de abrasão ratificado pelas ranhuras paralelas presentes na superfície de folga da ferramenta. Além disso, é possível notar o mecanismo de desgaste por difusão, validado pelo aspecto liso apresentado na superfície desgastada da ferramenta.



Figura 60 – MEV da ferramenta 2 na condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 na direção longitudinal: (a) Aresta de corte; (b) Aresta de corte após decapagem química; (c) Espectro B.

Fonte – Próprio autor

As formas e os mecanismos de desgaste atuantes na ferramenta 3 são mostrados na Figura 61. Em (a) nota-se a cratera como forma de desgaste, além da deposição de material da peça e formação de óxidos, validados pelos espectros A e B no EDS em (c). A partir de (b) é possível observar o mecanismo de abrasão ratificado pelas ranhuras contínuas e paralelas indicadas. O mecanismo de difusão é evidenciado pelo aspecto liso que a superfície da ferramenta apresenta.

Figura 61 – MEV da ferramenta 3 na condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 na direção longitudinal: (a) Superfície de saída; (b) Superfície de saída após decapagem química; (c) Espectro A; (d) Espectro B.





Após o término dos ensaios na direção longitudinal, para esta condição, foram realizados os ensaios na direção transversal. A Tabela VI do apêndice mostra os valores de desgaste de flanco obtidos para as ferramentas de corte em cada operação de passes. A Figura 62 mostra a evolução do desgaste de flanco nas ferramentas para esta condição. É possível perceber que a ferramenta de posição 3 foi a primeira a atingir o desgaste máximo estabelecido. Nenhuma outra ferramenta apresentou desgaste de flanco acentuado ao término dos ensaios para esta condição. Como mostrado adiante, a ferramenta 2 apresentou uma cratera em sua superfície de saída. O desbalanceamento da fresa na posição 3 foi crucial para a evolução mais rápida do seu desgaste.



Figura 62 – Evolução do desgaste de flanco nas ferramentas em função do número de passes acumulados para a condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 na direção transversal.

Fonte - Próprio autor

Na Figura 63 é possível observar, através das imagens em microscópio óptico o aspecto final da aresta de corte e da superfície de saída das ferramentas 2 e 3 ao fim dos testes nessa condição. Pode-se perceber o elevado desgaste de flanco em (a) e (c) e uma cratera formada na superfície de saída em (b) e (d).

Figura 63 – Microscopia óptica das ferramentas 2 e 3 na condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 e direção transversal: (a) Aresta de corte da ferramenta 3; (b) Superfície de saída da ferramenta 3; (c) Superfície de saída da ferramenta 2.





(c)

Fonte – Próprio autor

As formas e os mecanismos de desgaste atuantes na ferramenta 2 são evidenciados na Figura 64. Em (a) é possível observar a cratera como forma de desgaste, além da deposição de material da peça e formação de óxidos validados pelo espectro A no EDS em (c). A partir de (b) nota-se o mecanismo de abrasão presente em vários pontos da superfície, ratificado pela presença de ranhuras paralelas e contínuas. Pode-se observar ainda a presença do mecanismo de difusão, validado pelo aspecto liso apresentado pela superfície desgastada. Novamente a difusão não ocorreu de maneira uniforme, o que sugere a ocorrência de microlascamentos antes.

Figura 64 – MEV da ferramenta 2 na condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 na direção transversal: (a) Superfície de saída; (b) Superfície de saída após decapagem química; (c) Espectro A.





Fonte – Próprio autor

As formas e os mecanismos de desgaste atuantes na superfície de saída da ferramenta 3 são mostrados na Figura 65. Em (a) nota-se a cratera como forma de desgaste, além da deposição de material da peça e formação de óxidos confirmada pelo espectro A no EDS em (c). A partir de (b) é possível notar a abrasão como um mecanismo de desgaste presente ratificado pelas ranhuras contínuas e paralelas apresentadas nas bordas da ferramenta. Observa-se também o mecanismo de difusão evidenciado pelo aspecto superficial da ferramenta e novamente a difusão em vários planos sugere a ocorrência de microlascamentos anteriormente. É possível notar ainda a presença de uma trinca, possivelmente originada pelo mecanismo de fadiga.

Figura 65 – MEV da ferramenta 3 na condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 na direção transversal: (a) Superfície de saída; (b) Superfície de saída após decapagem química; (c) Espectro A.



Fonte – Próprio autor

Na Figura 66 é possível observar as formas e mecanismos de desgaste presentes na aresta de corte da ferramenta 3. Em (a) nota-se a presença do desgaste de flanco como forma de desgaste, além da presença de material da peça confirmado pelo espectro B no EDS em (c). A partir de (b) é possível perceber a ocorrência do mecanismo de difusão, ratificado pelo aspecto superficial liso apresentado na superfície da ferramenta. Novamente a difusão ocorreu em vários planos, o que indica a ocorrência de microlascamentos anteriormente à difusão. É possível observar ainda a presença de uma trinca na aresta de corte que possivelmente foi gerada pelo mecanismo de fadiga.

X00V
W0108mm
Sel. P.C.400
Hay Max
You
Yo

Figura 66 – MEV da ferramenta 3 na condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 na direção transversal: (a) Aresta de corte; (b) Aresta de corte após decapagem química; (c) Espectro B.

Fonte – Próprio autor

(c)

Mn Kα1

.

5.1.4 Comparação dos resultados

Mn Lα1_2

Si Ka1

Após os resultados apresentados, percebe-se que a condição que apresentou maior vida para as ferramentas de corte foi no fresamento com aplicação do MQL com o fluido Vascomill MMS FA 2 na direção longitudinal. Nessa condição foi possível efetuar doze operações de passes e um total de 58 passes ao fim dos ensaios, o que representa um volume total removido de 1160cm³. A condição mais severa foi o fresamento a seco na direção longitudinal, com onze operações de passes realizadas o que resultou em um total de 50, o que equivale a 1000cm³ de material removido. Pode-se afirmar que a melhor condição teve um desempenho 16% melhor que a pior condição. Na Figura 67 é possível visualizar o volume de material removido em cada condição de teste.



Figura 67 – Volume de material removido em cada condição.



Para as condições a seco, considerando a vida útil das ferramentas, observase que o melhor resultado ocorreu para o fresamento na direção transversal. Isso pode ser explicado pelo fato de que em condições não críticas quanto aos choques mecânicos, as entradas e saídas das ferramentas possibilitam pequenos alívios de temperatura para as mesmas. Esses alívios, ao que parece, possibilitaram uma condição de corte menos severa na direção transversal na condição a seco. Além disso, o comprimento usinado a cada entrada e saída também pode ter influenciado, pois a cada entrada e saída na direção longitudinal são usinados 400mm enquanto que na direção transversal são usinados 100mm.

Para as condições em que o MQL foi aplicado, com qualquer um dos fluidos, o desempenho foi pelo menos igual ao melhor desempenho da condição a seco. A refrigeração moderada e a lubrificação proporcionadas pela técnica foram essenciais para esses resultados encontrados.

Nas condições em que o MQL foi aplicado nota-se que os melhores resultados obtidos foram na direção longitudinal. Isso pode ser explicado pelo fato de que nas condições de melhores lubrificação e refrigeração o menor número choques mecânicos proporcionados pelas entradas e saídas da ferramenta na peça foi determinante para o melhor desempenho.

Bustamante (2017), ao estudar a influência das dimensões das peças na evolução do desgaste no fresamento frontal do aço SAE 1045, concluiu que o número de entradas e saídas foi o fator de maior relevância na evolução do desgaste com os demais parâmetros de corte mantidos constantes.

Xavier (2018), ao analisar o desgaste nas ferramentas de corte no fresamento de peças com diferentes geometrias do aço SAE 1045 também concluiu que o número de entradas e saídas da ferramenta de corte foi o fator de maior relevância no desgaste.

5.2 Acabamento superficial

Com a finalidade de facilitar a compreesão os tópicos para o acabamento superficial foram divididos de acordo com as condições empregadas nos ensaios: a seco, MQL com o fluido Vascomill MKS 22 e MQL com fluido Vascomill MMS FA 2.

5.2.1 A seco

A partir da Figura 68 é possível observar a comparação dos parâmetros de rugosidade nas direções longitudinal e transversal. Pode-se perceber que para a condição a seco a direção longitudinal apresentou um melhor acabamento superficial ao fim do processo. Além disso, os três parâmetros de rugosidade analisados apresentaram uma menor variação entre os valores máximo e mínimo e comportamento mais estável para a direção longitudinal.



Figura 68 – Comparação entre as direções na condição a seco: (a) Ra; (b) Rq; (c) Rt.



Fonte – Próprio autor

5.2.2 MQL – Vascomill MKS 22

A partir da Figura 69 é possível observar a comparação dos parâmetros de rugosidade nas direções longitudinal e transversal. Pode-se notar que para a condição de MQL com utilização do fluido Vascomill MKS 22 o melhor acabamento superficial ao fim do processo foi verificado no fresamento ao longo da direção longitudinal. A direção longitudinal apresentou também a maior variação entre os valores máximo e mínimo para os três parâmetros de rugosidade superficial analisados.



Figura 69 – Comparação entre as direções na condição MQL-Vascomill MKS 22: (a) Ra; (b) Rq; (c) Rt.



Fonte – Próprio autor

5.2.3 MQL – Vascomill MMS FA 2

A partir da Figura 70 é possível observar a comparação dos parâmetros de rugosidade nas direções longitudinal e transversal. É perceptível que para esta condição de operação o melhor acabamento superficial ao fim do processo foi verificado na direção transversal, com valores finais próximos aos verificados na direção longitudinal. A direção longitudinal apresentou a maior variação entre os valores máximo e mínimo para os parâmetros analisados.









Fonte – Próprio autor

5.2.4 Direção longitudinal

A partir da Figura 71 é possível observar a comparação dos parâmetros de rugosidade em todas as condições para a direção longitudinal. Pode-se perceber que a condição em que o MQL foi aplicado com o fluido Vascomill MMS FA 2 apresentou os melhores resultados de acabamento superficial. Isso deve-se ao fato de que as propriedades do fluido propiciaram boa lubrificação para esta condição.

A condição a seco apresentou valores mínimos para os parâmetros após 26 passes. Além disso, a condição a seco apresentou um acabamento superficial melhor que a condição do MQL com o fluido Vascomill 22. Sales et al (2009) observou que no fresamento frontal do aço 4140 o MQL aplicado a uma vazão de 50ml/h também apresentou acabamento superficial inferior do que a condição a seco.



0,6

0,4 0,2

Figura 71 – Comparação entre as condições na direção longitudinal: (a) Ra; (b) Rq; (c) Rt.



Fonte – Próprio autor

-Seco

►Vasc. 22 ►Vasc. FA 2

5.2.5 Direção transversal

A partir da Figura 72 é possível observar a comparação dos parâmetros de rugosidade em todas as condições para a direção transversal. É possível perceber que o melhor acabamento superficial na direção transversal aconteceu para a condição de MQL com aplicação do fluido Vascomill MMS FA 2. As duas condições em que o MQL foi empregado apresentaram comportamento mais estável. A condição a seco apresentou o pior acabamento superficial e muitas variações para os valores dos parâmetros.



Figura 72 – Comparação entre as condições na direção transversal: (a) Ra; (b) Rq; (c) Rt.



Fonte – Próprio autor

5.2.6 Todas as condições

A partir da Figura 73 pode-se observar a comparação dos parâmetros de rugosidade em todas as condições testadas. Pode-se perceber que o melhor acabamento superficial não foi alcançado na melhor condição de vida das ferramentas e o pior acabamento superficial não foi alcançado na pior condição de vida. É perceptível que o melhor acabamento superficial final foi encontrado na condição de MQL com o fluido Vascomill MMS FA 2 na direção transversal. Além disso, esta condição de MQL com o comportamento mais estável para os valores dos parâmetros. A condição de MQL com o mesmo fluido na direção longitudinal apresentou valores finais dos parâmetros muito próximos. A condição a seco na direção transversal apresentou o pior acabamento superficial final e também o comportamento mais instável para os parâmetros de rugosidade.



Figura 73 – Comparação entre todas as condições: (a) Ra; (b) Rq; (c) Rt.

Fonte – Próprio autor

Para auxiliar a análise comparativa do acabamento superficial, foi construído o gráfico *boxplot* como mostra a Figura 74. Para todos os parâmetros a condição a

seco na direção transversal apresentou maior dispersão, ou seja, maior a diferença entre os limites superior e inferior. Esta condição apresentou também a maior simetria dos dados, pois a mediana se apresenta praticamente no centro da "caixa". Além disso, esta condição apresentou os maiores valores para os parâmetros de rugosidade, ou seja, o pior acabamento superficial.

Os menores valores dos parâmetros de rugosidade, ou seja, o melhor acabamento superficial, foi verificado na condição de MQL com o fluido Vascomill FA 2 na direção transversal. Nota-se para o parâmetro Ra, visto em (a), a presença de valores discrepantes (outliers) para as condições MQL com fluido Vascomill 22 na direção longitudinal e MQL com fluido Vascomill FA 2 na direção transversal.

Outra observação importante é que a condição a seco na direção longitudinal apresentou um acabamento superficial melhor e uma menor dispersão nos dados do que a condição de MQL com o fluido Vascomill 22 nas duas direções. De acordo com Machado et al (2009), o fluido de corte atuando como refrigerante pode aumentar a resistência ao cisalhamento do material da peça e, consequentemente, a força de usinagem, prejudicando, assim, o acabamento superficial da peça. Pode-se concluir que as propriedades deste fluido não foram satisfatórias para alcançar especialmente uma boa lubrificação nas temperaturas alcançadas durante o processo.






5.2.7 Acabamento superficial X desgaste

Para avaliar a relação existente entre o desgaste nas ferramentas de corte e o acabamento superficial, os dados dessas duas variáveis foram confrontados. Para facilitar a análise foram confrontados com o desgaste apenas os dados das condições que apresentaram pior e melhor acabamento superficial. Os dados foram confrontados apenas com a ferramenta mais desgastada de cada situação. Assim sendo, na Figura 75 é possível observar o desgaste e os parâmetros da rugosidade para a condição a seco na direção transversal. Pode-se observar que no início,

quando o desgaste nas ferramentas começa a se formar e aparece de maneira relativamente acentuada, os valores dos parâmetros da rugosidade sofrem variações mais abruptas. É possível observar também que durante a estabilização da evolução do desgaste a variação nos valores dos parâmetros é menor. Isso pode ser explicado pelo fato de que um nível moderado e estável de desgaste de flanco nas ferramentas de corte ser benéfico para um melhor "assentamento" das ferramentas durante o corte e, consequentemente, para um bom acabamento superficial. Ao fim do processo, o desgaste mais acentuado da ferramenta também se mostrou benéfico para o acabamento superficial.

Figura 75 – Comparação entre o desgaste e a rugosidade para a condição a seco na direção transversal: (a) Ra; (b) Rq; (c) Rt.





Fonte - Próprio autor

A partir da Figura 76 é possível observar o desgaste e os parâmetros da rugosidade para a condição MQL com o fluido Vascomill MMS FA 2 na direção transversal. Pode-se perceber um comportamento similar, mas com oscilações menores para os valores dos parâmetros de rugosidade no início do processo. Isso deve-se provavelmente ao fato de o fluido ser capaz de manter as propriedades de lubrificação, mesmo em temperaturas mais elevadas.

Figura 76 – Comparação entre o desgaste e a rugosidade para a condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 na direção transversal: (a) Ra; (b) Rq; (c) Rt.





Fonte - Próprio autor

5.3 Análise dos sinais de vibrações

Os dados coletados, conforme explicado na metodologia, foram tratados com a utilização de duas técnicas: a FFT para o espectro de frequências e a RMS para a quantificação do sinal vibracional emitido. Uma observação a ser feita é que tendo em vista a grande quantidade de dados gerados e o comportamento similar apresentado em todas as condições, optou-se por realizar a análise dos dados de vibrações apenas para algumas condições de corte.

5.3.1 Espectro de frequências

A partir da Figura 77 pode-se observar o espectro de frequência em função da amplitude RMS do acelerômetro 1, no eixo Y, na entrada e na saída do primeiro e do último passe do processo, para a condição a seco na direção transversal. É possível perceber em (a) e (b) que no início do processo o espectro se mostra mais discreto, especialmente na entrada. Ao final no processo, em (c) e (d), com o sistema mais rígido, já que houve uma considerável perda de massa após 52 passes no corpo de prova, e o desgaste acentuado na ferramenta, as frequências excitadas passam a ser nítidas. Nota-se também que no último passe as amplitudes dos sinais são maiores quando comparados com o primeiro passe, o que permite afirmar para esse caso no último passe, com um desgaste acentuado presente na ferramenta, são geradas vibrações mais intensas.

É importante perceber que as frequências que aparecem os picos são de 53Hz, que é a frequência natural da fresa, e seus harmônicos, ou seja, frequências múltiplas de 53Hz. Outro valor de frequência que aparece com picos nas figuras é o de aproximadamente 212Hz, que corresponde à frequência de trabalho (f_t). De acordo com Orkhan *et al* (2007), *apud* Maia (2009), a frequência de trabalho da fresa pode ser encontrada a partir da equação:

$$ft = \frac{n * Nt}{60} \tag{11}$$

Onde:

n é a rotação do eixo-árvore e Nt é o número de insertos presentes na fresa.







Fonte – Próprio autor

A partir da Figura 78 pode-se observar o espectro de frequência em função da amplitude RMS do acelerômetro 2, no eixo Y, na entrada e na saída do primeiro e do último passe do processo, para a condição a seco na direção transversal. Já no primeiro passe, em (a) e (b), é possível perceber com clareza as frequências excitadas e evidências do desbalanceamento apresentado pela fresa. Isso mostra que, como esperado, o acelerômetro das ferramentas, fixado no eixo-árvore, é mais sensível aos sinais vibracionais. No passe final em (c) é possível perceber a presença de faixas intermediárias de frequências excitadas que foram geradas pelo próprio sistema em virtude do desgaste das ferramentas de corte.







Fonte - Próprio autor

5.3.2 RMS x desgaste

Para confrontar os dados do desgaste com as vibrações mecânicas foram utilizadas as condições a seco na direção transversal e com MQL com utilização do fluido Vascomill MMS FA 2 na direção longitudinal e em cada uma delas foi utilizada apenas a ferramenta de corte mais desgastada. Além disso, foram utilizados os dados de entrada e saída do eixo Y do acelerômetro da ferramenta, que apresentou maior sensibilidade aos sinais.

A partir da Figura 79 é possível observar a relação entre a evolução do desgaste com o valor RMS na condição a seco na direção transversal. Nota-se, para o RMS, um comportamento similar àquele observado para os parâmetros de

rugosidade. Um certo nível de desgaste contribui para o acaba por beneficiar o sistema de modo a provocar um alívio na intensidade nas vibrações. Quando o desgaste evolui de maneira acentuada as vibrações do sistema também acompanham essa evolução tornando-se mais intensas.





Fonte - Próprio autor

A partir da Figura 80 é possível observar a relação entre a evolução do desgaste com o valor RMS na condição de MQL com utilização do fluido Vascomill MMS FA 2 na direção longitudinal. Nota-se um comportamento similar entre as curvas. Os valores do RMS oscilaram no início, até o desgaste alcançar o primeiro pico, e depois se mantiveram estáveis até o próximo pico apresentado pela curva de desgaste. O desgaste acentuado da ferramenta de corte proporcionou vibrações mais intensas durante o corte.



Figura 80 – Vibrações mecânicas e desgaste, na condição MQL com o fluido Vascomill MMS FA 2 e direção longitudinal, em função do número de passes.

Fonte - Próprio autor

5.3.3 RMS x acabamento superficial

Para confrontar os dados do acabamento superficial com as vibrações mecânicas foram utilizadas as condições a seco na direção transversal e com MQL com utilização do fluido Vascomill MMS FA 2 na direção longitudinal e em cada uma delas foi utilizada apenas a ferramenta de corte mais desgastada. Além disso, foram utilizados os dados de entrada e saída do eixo Y do acelerômetro da ferramenta, que apresentou maior sensibilidade aos sinais.

A partir da Figura 81 é possível observar a relação entre os parâmetros de rugosidade com o valor RMS na condição a seco na direção transversal. É possível observar que o comportamento das grandezas nem sempre é similar. Em muitos pontos quando uma grandeza aumenta a outra diminui. Há de se destacar, porém que os períodos de maior oscilação ocorrem no início e no fim, momento em que o desgaste apresenta os picos.



Figura 81 – Vibrações mecânicas e parâmetros de rugosidade na condição a seco na direção transversal, em função do número de passes: (a) Ra; (b) Rq; (c) Rt.

Fonte - Próprio autor

A partir da Figura 82 é possível observar a relação entre os parâmetros de rugosidade com o valor RMS na condição MQL com o fluido Vascomill MMS FA 2 na direção longitudinal. Novamente nota-se que o comportamento das grandezas não apresenta similaridade na maior parte do intervalo. Em muitos pontos quando uma grandeza aumenta a outra diminui, ou vice e versa. Ambas as grandezas apresentaram um comportamento mais estável para esta condição, provavelmente proporcionado pelas melhores condições de lubrificação e refrigeração da superfície.

Figura 82 – Vibrações mecânicas e parâmetros de rugosidade na condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 na direção longitudinal, em função do número de passes: (a) Ra; (b) Rq;



(c) Rt.



Fonte – Próprio autor

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

- As principais formas de desgaste presentes nas ferramentas de corte foram o desgaste de flanco e o desgaste de cratera. Os principais mecanismos atuantes foram a abrasão, a difusão e a fadiga. Em alguns casos houve indícios de adesão e oxidação.
- O MQL mostrou-se uma boa opção para aumentar a vida das ferramentas de corte. Entre a melhor e a mais severa condição de teste houve uma diferença de 16% de material removido.
- Em termos de vida da ferramenta, a melhor condição de teste foi com a aplicação do MQL com o fluido Vascomill FA 2 na direção longitudinal.
- Quando usinados com a aplicação de MQL a direção longitudinal mostrou-se a melhor opção.
- Quando usinados a seco a direção transversal mostrou-se a melhor opção, mesmo com o maior número de entradas e saídas das ferramentas de corte.
- Em termos de acabamento superficial, a melhor condição de teste foi com aplicação de MQL com o fluido Vascomill FA 2 na direção transversal.
- Em algumas condições com aplicação do MQL o acabamento superficial final apresentado foi pior do que o apresentado a seco.
- O acabamento superficial não depende apenas do desgaste apresentado nas ferramentas de corte.
- O valor RMS indicou picos ascendentes com aumento acentuado do desgaste.
- O acelerômetro posicionado próximo às ferramentas mostrou-se mais sensível aos sinais vibracionais.
- Análise espectral FFT mostrou-se sensível para a detecção de frequências causadas por desequilíbrios ou desgaste das ferramentas apresentados durante o corte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTINTAS, Y. **Manufacturing automation.** 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 365p.

ARAÚJO, A. S. J.; SALES, W. F.; SILVA, R. B.; COSTA, E. S.; MACHADO, A. R. Lubri-cooling and tribological behavior of vegetable oils during milling of AISI 1045 steel focusing on sustainable manufacturing. **Journal of Cleaner Production.** v.152, p.635-647, 2017.

ASM HANDBOOK. Volume 16: Machining. 9. ed. Novelty: Asm International, 1989. 1089 p.

BJURKA, E. **Analyze of insert geometries, wear types and insert life in milling.** 2011. 67f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Mecânica Aplicada. Chalmers University of Technology, Goteborg, 2011.

BUDINSKI, K. G. Guide to friction, wear, and erosion testing. West Conshohocken: ASTM International, 2007. 132p.

BUSTAMANTE, G. D. Influência das dimensões da peça na evolução do desgaste de ferramentas de corte no processo de fresamento. 2017. 92f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

CAVICHIOLLI, F. O início e o fim. **O mundo da usinagem.** Santo Amaro, v. 115, n. 2, p. 10-12, fev. 2017.

CHENG, K. Machining Dynamics – Fundamentals, Applications and Practices. Londres: Springer, 2009. 328p.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica:** processos de fabricação e tratamento. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, v.2, 1986. 315p.

CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos. 6. ed. São Paulo: ABM, 1988. 576p.

CUI, X.; ZHAO, J.; TIAN, X. Cutting forces, chip formation and tool wear in highspeed face milling of AISI H13 steel with CBN. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.** v. 64, p. 1737-1749, abr. 2012

DA SILVA, R. B.; VIEIRA, J. M.; CARDOSO, R. N.; CARVALHO, H. C.; COSTA, E. S.; MACHADO, A. R.; De ÁVILA, R. F. Tool wear analysis in milling of medium carbon steel coated cemented carbide inserts using different machining lubrication/cooling systems. **Wear**, v. 271, p. 2459-2565, 2011.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** 7. ed. São Paulo: Artliber, 2010. 268p.

FERRARESI, D. Fundamentos da usinagem dos metais. São Paulo: Blucher, 1977. 751p.

FREIRE, J. M. **Tecnologia do corte.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1977. 380p.

GU, J.; BARBER, G.; TUNG, S.; GU, R. Tool life and wear mechanism of uncoated and coated milling inserts. **Wear**, v. 225 – 229, p. 273-284, 1999.

HASSANPOUR, H.; SALDEGHI, M. H.; RASTI, A.; SHAJARI, S. Investigation of surface roughness, microhardness and white layer thickness in hard milling of AISI 4340 using minimum quantity lubrication. **Journal of Cleaner Production.** v. 120, p.124-134, 2016.

HUBNER, H. B. Estimação da rugosidade gerada no processo de fresamento frontal via redes neurais artificiais. 2016. 125f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **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. Geneva, 2004.

KALPAKIJAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing, Engineering & Technology**. 5. ed. Upper Saddle River: Pearson Educatioin, 2006. 1040p.

LOPES, C. P. Análise do desgaste de ferramentas no fresamento de engrenagens cônicas de grandes dimensões fundidas em aço ABNT 4140. 2013. 77f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei, 2013.

LQBAL, A.; GHAMDI, K. A. AI; HUSSAIN, G. Effects of tool life criterion on sustainability of milling. **Journal of Cleaner Production.** v. 139, p.1105-1117, 2016.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R.T.; SILVA, M. B. da. **Teoria da** usinagem dos materiais. São Paulo: Blucher, 2009. 371p.

MAIA, L. H. A. Influência das condições de corte do fresamento do aço baixa liga ABNT 4140 nos sinais vibracionais e de emissão acústica. 2009. 199f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

MARTINS, M. E. G. **Introdução à propabilidade e à estatística.** Lisboa: Sociedade Portuguesa de Estatística, 2005. 322p.

PIANA, C. F. B.; MACHADO, A. A.; SELAU, L. P. R. **Estatística básica.** Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, Instituto de Física e Matemática, Departamento de Matemática e Estatística, 2009. 220p.

RAO, S. S. Vibrações mecânicas. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 448p.

RIBEIRO, T. C. S. C. **Probabilidade e estatística.** Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S. A., 2015. 235p.

SANDVIK COROMANT. **Milling:** factors that influence vibration. Disponível em: https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/technologies/silenttools/milling/factors_that_influence_vibration. Acesso em: 10 abr. 2018.

SANDVIK COROMANT. **Materials:** cutting tool materials. Disponível em: <<u>https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx</u>>. Acesso em: 9 set. 2018.

SANDVIK COROMANT. **Milling:** face milling. Disponível em: https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/pages/face-milling.aspx>. Acesso em: 8 ago. 2018.

SANDVIK COROMANT. **Milling:** troubleshooting. Disponível em: <<u>https://www.sandvik.coromant.com/en-</u> gb/knowledge/milling/pages/troubleshooting.aspx>. Acesso em: 13 out. 2018.

SANDVIK COROMANT. Manual técnico de usinagem. Santo Amaro, 2010. 789p.

SALES, W.; BECKER, M.; BARCELLOS, C. S.; LANDRE, J. J; BONNEY, J.; EZUGWU, E. O. Tribological behavior when face milling AISI 4140 steel with minimum quantity fluid application. **Industrial Lubrication and Tribology,** v.61, n.2, p.84-90, 2009.

SANTOS, S. C. Estudo da Influência de Revestimentos e da Aplicação de Fluido de Corte no Desempenho de Brocas de Aço-Rápido e de Metal-duro Integral na Usinagem de Ferro Fundido Cinzento. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2002.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais.** São Paulo: Artiliber, 2007. 246p.

SILVA, R. H. L. da. **Monitoramento do desgaste de ferramentas no fresamento de topo através dos sinais de potência e emissão acústica e redes neurais.** 2010. 114f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

SILVA, S. da. Vibrações Mecânicas. Foz do Iguaçu: Unioeste, 2009. 151 p.

SILVA, S. da C. Análise de desempenho de ferramentas de corte nos processos de desbaste e acabamento por fresamento de aço liga MnSi. 2015. 111 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

STACHOWIAK, G.W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology.** 3. ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. 801p.

STEMMER, Caspar Erich. Ferramentas de corte II. 2. ed. Florianópolis: Ed. Da UFSC, 1995. 326p.

STEPHENSON, D. A., Agapiou J. S., **Metal cutting theory and practice.** 2. ed. Taylor & Francis Group, 2006.

STIPKOVIC, M. A.; BORDINASSI, E. C.; FARIAS, A. de.; DELIJAICOV, S. Surface integrity analysis in machining of hardened AISI 4140 steel. **Materials Research**, v.20, p.387-394, 2017.

TRENT, E. M.; DEARNLEY, P. A. Wear mechanisms of coated carbide tools. **Metals Technology**, v.9, p.60-75, feb. 1982.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting.** 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. 446p.

VITÓRIA, B. C. R. Análise do desgaste de ferramenta no processo de fresamento do aço AISI 4340 através do sinal de vibração. 2016. 95f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

XAVIER, P. H. R. Análise do desgaste de ferramentas de corte no fresamento de peças com diferentes geometrias. 2018. 107f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

APÊNDICE

	Número de					
Operação	passes	Passes acumulados	Desgaste - Ferramentas			
-	-	-	1	2	3	4
1º	1	1	0	0	0	0
2°	1	2	0	0	0	0
3°	2	4	0	0	0	0
4°	2	6	0,06	0,04	0,06	0,03
5°	4	10	0,06	0,05	0,07	0,04
6°	4	14	0,07	0,05	0,07	0,05
7°	6	20	0,08	0,06	0,07	0,06
8°	6	26	0,08	0,07	0,08	0,07
9º	8	34	0,08	0,07	0,09	0,07
10º	8	42	0,08	0,07	0,4	0,07
11º	8	50	0,09	0,09	0,95	0,08

Tabela I – Desgaste de flanco nas ferramentas na condição longitudinal a seco

Fonte: Próprio autor.

Tabela II – Desgaste de flanco nas ferramentas na condição transversal a seco

Operação	Número de passes	Passes acumulados	Desgaste - Ferramentas			
-	-	-	1	2	3	4
1°	1	1	0	0	0	0
2°	1	2	0	0	0	0
3°	2	4	0,05	0,05	0,05	0,04
4°	2	6	0,05	0,06	0,06	0,04
5°	4	10	0,05	0,06	0,07	0,05
6°	4	14	0,06	0,06	0,07	0,05
7°	6	20	0,06	0,07	0,07	0,05
8°	6	26	0,07	0,08	0,07	0,05
9º	8	34	0,07	0,1	0,08	0,06
10°	8	42	0,09	0,16	0,1	0,07
11°	10	52	0,1	0,42	1,03	0,08

Fonte: Próprio autor.

	Número de					
Operação	passes	Passes acumulados	Desgaste - Ferramentas			
-	-	-	1	2	3	4
1°	1	1	0	0	0	0
2°	1	2	0	0	0	0
3°	2	4	0	0	0	0
4°	2	6	0	0	0,04	0
5°	4	10	0,03	0,04	0,05	0,04
6°	4	14	0,04	0,04	0,05	0,05
7°	6	20	0,05	0,05	0,07	0,06
8°	6	26	0,05	0,05	0,07	0,06
9º	8	34	0,05	0,06	0,08	0,07
10º	8	42	0,06	0,1	0,18	0,07
11º	8	50	0,06	0,28	0,42	0,09
12º	4	54	0,07	0,58	0,94	0,1

Tabela III – Desgaste de flanco nas ferramentas na condição MQL com fluido Vascomill MKS 22 na direção longitudinal

Fonte – Próprio autor

Tabela IV – Desgaste de flanco nas ferramentas na condição MQL com fluido Vascomill MKS 22 na direção transversal.

0		Passes	-			_
Operaçao	Numero de passes	acumulados	Desgaste - Ferramentas			
-	-	-	1	2	3	4
1º	1	1	0	0	0	0
2°	1	2	0	0	0	0
3°	2	4	0	0	0	0
4°	2	6	0,04	0	0,05	0,03
5°	4	10	0,04	0	0,05	0,04
6°	4	14	0,05	0,03	0,06	0,04
7°	6	20	0,05	0,04	0,06	0,04
8°	6	26	0,06	0,04	0,06	0,05
9º	8	34	0,06	0,05	0,07	0,05
10º	8	42	0,06	0,05	0,08	0,05
11º	10	52	0,07	0,06	0,8	0,06

Fonte – Próprio autor

0	Número de	Passes				
Operaçao	passes	acumulados	L	Pesgaste - I	-erramenta	as
-	-	-	1	2	3	4
1 ⁰	1	1	0	0	0	0
2°	1	2	0	0	0	0
3°	2	4	0	0	0	0
4°	2	6	0,04	0	0	0
5°	4	10	0,05	0,04	0,05	0,03
6°	4	14	0,05	0,04	0,05	0,03
7 ⁰	6	20	0,05	0,04	0,05	0,03
8°	6	26	0,05	0,04	0,06	0,04
9º	8	34	0,06	0,04	0,07	0,04
10º	8	42	0,06	0,05	0,07	0,05
11º	10	52	0,07	0,06	0,2	0,06
12º	6	58	0,07	0,59	0,29	0,08

Tabela V – Desgaste de flanco nas ferramentas na condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 na direção longitudinal.

Fonte – Próprio autor

Tabela VI – Desgaste de flanco nas ferramentas na condição MQL com fluido Vascomill MMS FA 2 na direção transversal.

Operação	Número de passes	Passes acumulados	Desgaste - Ferramentas			
-	-	-	1	2	3	4
1 ⁰	1	1	0	0	0	0
2º	1	2	0	0	0	0
3°	2	4	0,03	0	0,04	0
4°	2	6	0,03	0,04	0,05	0
5°	4	10	0,04	0,04	0,05	0
6°	4	14	0,04	0,05	0,06	0,03
7°	6	20	0,05	0,05	0,06	0,03
8°	6	26	0,05	0,06	0,07	0,04
9°	8	34	0,06	0,07	0,08	0,04
10°	8	42	0,06	0,07	0,09	0,05
11º	10	52	0,06	0,07	0,54	0,06
12º	2	54	0,06	0,08	0,69	0,06

Fonte – Próprio autor