

Vitor Gonçalves Rossi

**ANÁLISE DO DESGASTE NA ARESTA DE CORTE DE INSERTO DE
FRESAMENTO DURANTE A USINAGEM DE AÇO FERRAMENTA TOOLOX 44**

São Paulo

2022

Vitor Gonçalves Rossi

**ANÁLISE DO DESGASTE NA ARESTA DE CORTE DE INSERTO DE
FRESAMENTO DURANTE A USINAGEM DE AÇO FERRAMENTA TOOLOX 44**

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo.

Departamento de Engenharia Metalúrgica e
de Materiais da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo.

Orientadora: Profa. Dra. Izabel Fernanda
Machado

São Paulo, 2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Eu, Vitor Gonçalves Rossi, autorizo a reprodução total ou parcial e a divulgação desta obra, por quaisquer métodos convencionais ou eletrônicos para fins de estudos e pesquisa; desde que devidamente citado.



Vitor Gonçalves Rossi

Eu, Izabel Fernanda Machado, responsável por este trabalho, autorizo a publicação na biblioteca da USP desta versão desta obra para fins de divulgação científica.



Profa. Dra. Izabel Fernanda Machado

Catálogo-na-publicação

Rossi, Vitor Gonçalves

Análise do desgaste na aresta de corte de inserto de fresamento durante a usinagem de aço ferramenta toolox 44 / V. G. Rossi -- São Paulo, 2022.

44 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Desgaste em ferramenta de usinagem 2.Fresamento 3.Aço ferramenta 4.Desgaste I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer, primeiramente, a minha orientadora, Profa. Dra. Izabel Fernanda Machado por me apoiar, orientar e guiar com dedicação e paciência durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também aos técnicos do laboratório de metalografia do PMT e do laboratório LFS do PMR por me instruírem e auxiliarem durante a realização deste trabalho.

Quero agradecer também a Sandvik Coromant e aos colaboradores Sergio Rodrigues e Aldeci Santos por possibilitarem a realização dos testes e não medirem esforços ao disporem de seu tempo, recursos e conhecimento técnico.

Agradeço também aos professores do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP (PMT), por todo apoio e ensinamentos ao longo da graduação. Também expresso aqui minha gratidão a todos os funcionários do PMT por garantirem o funcionamento do departamento de modo excelente. Gostaria de agradecer em especial as funcionárias Regina e Joana por sempre recepcionarem a todos com alegria e carinho e por me apoiarem durante momentos difíceis enfrentados na graduação.

Agradeço imensamente a minha família, em especial os meus pais, Sebastião e Maria do Carmo por me apoiarem durante toda minha vida e me motivarem a ser sempre uma pessoa melhor. Obrigado também a minha namorada, Maria Eduarda, por me apoiar e incentivar durante a elaboração deste trabalho.

Por fim, agradeço os meus colegas de turma e aos meus amigos mais próximos, por todo o apoio nesses últimos anos, tanto em assuntos pessoais quanto em assuntos relacionados a graduação.

Resumo

Na produção de moldes e matrizes, além da escolha do material, a seleção da estratégia de usinagem utilizada na fabricação é de muita importância. Os parâmetros e estratégias de usinagem possibilitam as formas complexas exigidas pelo mercado de moldes e matrizes. Garantem também que as propriedades na superfície do material e o seu acabamento não interfiram na aplicação na fundição. Com isso, o entendimento dos processos de usinagem e do comportamento das ferramentas utilizadas na produção de moldes e matrizes é crucial. Portanto, o presente trabalho busca analisar o desgaste de uma ferramenta de corte empregada na usinagem de um aço ferramenta Toolox 44 utilizado na produção de moldes e matrizes. O desgaste na aresta de corte dos inserts foi analisado através da comparação do surgimento e da evolução desse desgaste entre fresamento concordante e discordante. Também foram comparadas a rugosidade, a dureza e a microestrutura das superfícies usinadas a fim de identificar possíveis fatores que podem influenciar no desgaste da ferramenta.

Palavras-chave: Estratégia de usinagem, fresamento, desgaste, aresta de corte, aço ferramenta, Toolox 44.

Abstract

In the production of molds and dies, in addition to the choice of material, the selection of the machining strategy used in manufacturing is of great importance. The machining parameters and strategies enable the complex shapes demanded by the die and mold market. Machining parameters and strategies also ensure that the surface properties of the material and its finish do not interfere with the application in the foundry. Understanding the machining processes and the behavior of the tools used in the production of molds and dies is crucial. Therefore, the present work seeks to analyze the wear of a cutting tool used in the machining of a Toolox 44 tool steel used in the production of molds and dies. The wear on the cutting edge of the inserts was analyzed by comparing the appearance and evolution of this wear between up-milling and down-milling. Roughness, hardness and microstructure of machined surfaces were also compared in order to identify possible factors that could influence tool wear.

Keywords: Machining strategy, milling, wear, cutting edge, tool steel, Toolox 44.

Lista de Figuras

Figura 1 - Representação esquemática das profundidades de corte radial (a_e) e axial (a_p)(17).	17
Figura 2 - Representação esquemática das velocidades de fuso (n) e de corte (V_c)(17).	17
Figura 3 - Representação esquemática do avanço por dente (f_z) e por minuto (V_f)(17).	18
Figura 4 - Representação esquemática de vista superior do método de fresamento concordante(10).	18
Figura 5 - Representação esquemática de vista superior do método de fresamento discordante(10)	19
Figura 6 - Representação de desgaste de flanco em aresta de corte (17).....	21
Figura 7 - Representação de craterização em aresta de corte (17).	21
Figura 8 - Representação de aresta postiça em aresta de corte (17).	22
Figura 9 - Representação de (a) trincas térmicas e (b) deformação plástica (17).....	22
Figura 10 - Representação de lascamento da aresta de corte (17).	23
Figura 11 - Exemplo de curva de vida para ferramenta de usinagem expressa a partir da velocidade de corte (V_c)(18).	24
Figura 12 - Curvas de desgaste por tempo para diferentes velocidades de corte (V_c)(18).	24
Figura 13 - Centro de usinagem Romi D1250 (semelhante a D800 utilizada no experimento)(22).	25
Figura 14 - Fresa utilizada os insertos já montados ($D=25\text{mm}$)	26
Figura 15 - Bloco de Toolox 44 fixado na mesa da máquina (face de $156\text{mm} \times 134\text{mm}$ paralela à mesa).....	27
Figura 16 - Indicação da superfície usinada e do avanço da mesa, durante fresamento concordante.....	28
Figura 17 - Indicação da superfície usinada e do avanço da mesa, durante fresamento discordante.....	28
Figura 18 - Representação esquemática do bloco com destaque, em vermelho, para as barras retiradas	30
Figura 19 - Representação esquemática da divisão das amostras, do fresamento concordante, para a realização do ensaio de dureza.	31

Figura 20 - Porção retirada do bloco usinado destacada a direita; à esquerda, amostra discordante retirada do bloco e amostra concordante separada em 4 seções de 18 x 27 x 35mm.....	31
Figura 21 - Representação esquemática das placas, em vermelho, que foram retiradas das amostras, embutidas e analisadas por MEV.	32
Figura 22 - Gráfico de comparação da Rugosidade média (Ra), em μm , por passe, após os processos de fresamento.....	33
Figura 23 - Aresta de corte da pastilha utilizada no fresamento concordante após o 15º passe, com indicação de maior desgaste medido (0,07mm)	35
Figura 24 - Aresta de corte da pastilha utilizada no fresamento concordante após o 30º passe, com indicação de maior desgaste medido (0,09mm)	35
Figura 25 - Aresta de corte da pastilha utilizada no fresamento concordante após o 50º passe, com indicação de maior desgaste medido (0,17mm)	36
Figura 26 - Aresta de corte da pastilha utilizada no fresamento concordante após o 60º passe, com indicação de maior desgaste medido (0,58mm)	36
Figura 27 - Aresta de corte da pastilha utilizada no fresamento discordante após o 15º passe, com indicação de maior desgaste medido (0,07mm).....	37
Figura 28 - Aresta de corte da pastilha utilizada no fresamento discordante após o 30º passe, com indicação de maior desgaste medido (0,07mm).....	37
Figura 29 - Aresta de corte da pastilha utilizada no fresamento discordante após o 50º passe, com indicação de maior desgaste medido (0,12mm).....	38
Figura 30 - Aresta de corte da pastilha utilizada no fresamento discordante após o 60º passe, com indicação de maior desgaste medido (0,11mm).....	38
Figura 31 - Microscopia eletrônica de varredura da amostra CE; região da superfície usinada está apresentada a direita e a região central da amostra está apresentada a esquerda.	40
Figura 32 - Microscopia eletrônica de varredura da amostra CS; região da superfície usinada está apresentada a direita e a região central da amostra está apresentada a esquerda.	41
Figura 33 - Microscopia eletrônica de varredura da amostra DE; região da superfície usinada está apresentada a direita e a região central da amostra está apresentada a esquerda	41

Figura 34 - Microscopia eletrônica de varredura da amostra DS; região da superfície
usinada está apresentada a direita e a região central da amostra está apresentada a
esquerda41

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Composição química do aço ferramenta Toolox 44	15
Tabela 2 - Dados de corte utilizados na usinagem durante os passes de 1 a 3 e de 4 a 60	29
Tabela 3 - Dureza (HV) medida na superfície usinada das amostras próximas a entrada da ferramenta.....	39
Tabela 4 - Dureza (HV) medida na superfície usinada das amostras 2	39
Tabela 5 - Dureza (HV) medida na superfície usinada das amostras 3	39
Tabela 6 - Dureza (HV) medida na superfície usinada das amostras próximas a saída da ferramenta.....	39

Sumário

1. Introdução.....	13
2. Objetivos.....	13
3. Revisão Bibliográfica.....	14
3.1. Moldes e Matrizes	14
3.1.1. Aços para aplicação em moldes e matrizes.....	14
3.1.2. Toolox 44.....	15
3.2. Fresamento.....	15
3.2.1. Variáveis no fresamento	16
3.2.1.1. Profundidade e largura de corte	16
3.2.1.2. Velocidade de corte e de fuso	17
3.2.1.3. Avanço por dente e por minuto	17
3.2.2. Fresamento Concordante	18
3.2.3. Fresamento discordante.....	19
3.3. Desgaste em ferramentas de usinagem.....	20
3.3.1. Curvas de vida da ferramenta de corte	23
4. Materiais e métodos.....	24
4.1. Equipamento	24
4.2. Materiais	25
4.2.1. Ferramenta.....	25
4.2.2. Amostra Usinada.....	26
4.3. Metodologia.....	27
4.3.1. Usinagem	27
4.3.2. Imagens do desgaste na aresta	29
4.3.3. Medidas de Rugosidade	29
4.3.4. Dureza Vickers.....	30
4.3.5. Microscopia (MEV) do perfil da superfície usinada.....	32

5. Resultados e Discussão	33
5.1. Rugosidade	33
5.2. Evolução do desgaste na aresta de corte	34
5.3. Ensaio de Dureza	38
5.4. MEV	40
6. Conclusões	42
7. Referências Bibliográficas	43

1. Introdução

A fundição sob pressão com moldes e matrizes é um processo econômico e rápido de se produzir peças com repetibilidade e confiabilidade. A produção de moldes e matrizes de boa qualidade e durabilidade passa diretamente pela escolha de seu material. A produção de peças a partir do emprego de moldes e matrizes envolvem altas temperaturas e pressões, exigindo do material resistência mecânica, química e a variações térmicas(1). Além das propriedades do material escolhido, a estratégia de usinagem escolhida na fabricação do molde é de grande importância. Não só para garantir as formas complexas desejadas nas aplicações de moldes e matrizes, mas também para garantir as propriedades na superfície do material e um acabamento que não interfira nas aplicações na fundição.

Sendo assim, o presente trabalho traz a análise comparativa entre o fresamento concordante e o fresamento discordante em Toolox 44, um aço ferramenta, de produção da SSAB, com excelentes propriedades físicas e mecânicas para a aplicação na produção de moldes e matrizes(2). A comparação foi feita a partir do acompanhamento do desgaste apresentado pelas arestas de corte após os fresamentos concordante e discordante.

Para a melhor compreensão dos desgastes encontrados e de sua evolução, conforme a estratégia utilizada e o número de operações realizadas, foram feitas algumas análises na superfície usinada. Foram medidas a rugosidade média e a dureza superficial da superfície usinada. A microestrutura na superfície usinada foi também por meio de microscopia eletrônica de varredura.

2. Objetivos

Este trabalho tem por objetivo analisar o desgaste da aresta de corte de insertos de fresamento durante a usinagem de aço ferramenta Toolox 44 por meio da comparação do desempenho do fresamento concordante e o fresamento discordante. A comparação será feita a partir do desgaste apresentado na aresta de corte dos insertos utilizados, medidos através de imagens de microscopia ótica processadas e analisadas digitalmente. Serão abordadas também a rugosidade na superfície usinada, a dureza medida na superfície usinada após a usinagem e a análise metalográfica da seção transversal da região usinada nos dois tipos de fresamento

com canto a 90° utilizados. Esses tópicos complementarão a discussão e compreensão dos resultados obtidos nas análises de desgaste nas arestas de corte.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Moldes e Matrizes

A fundição sob pressão é o processo de forçar o fundido sob alta pressão nas cavidades de moldes e matrizes. Esse método é um processo econômico de fazer peças fundidas de ligas à base de alumínio, zinco, magnésio e cobre(3). Por ser um método econômico e rápido de produção de peças, permitindo repetibilidade e confiabilidade no processo, a produção de moldes e matrizes de boa qualidade e durabilidade é de interesse da indústria metalmeccânica (4).

A vida útil de um molde de fundição depende da escolha de algumas das suas características, como sua composição química, método de fabricação e tratamento térmico (5). A constante exposição a altas temperaturas, picos de alta pressão e a gradientes de temperatura, gera o acúmulo de deformações plásticas locais na superfície da matriz, o que traz problemas relacionados a fadiga térmica e a falha mecânica, prejudicando sua durabilidade (6).

3.1.1. Aços para aplicação em moldes e matrizes

Os materiais utilizados em fundição de ligas metálicas em molde metálico ou em moldagem de plásticos em matrizes devem ser resistentes à variação de calor, ter alta dureza a quente, resistência à corrosão, adesão e abrasão(3,5).

A resistência a formação de trincas por fadiga térmica, provenientes da ciclagem térmica, depende das propriedades do material do molde relacionadas ao coeficiente de expansão térmica, a resistência ao escoamento a quente, a condutividade térmica, a resistência à fluência, a resistência ao amolecimento da têmpera e a ductilidade. Já a resistência aos processos de corrosão, adesão e abrasão, está relacionada as propriedades do material do molde relativas a dureza a quente, a resistência à têmpera, a solubilidade no material a ser moldado e a resistência à oxidação(5).

Os aços ferramenta utilizados com mais frequência na produção de moldes e matrizes, são provenientes de aciarias que usam como matéria prima sucata e entregam o material ao consumidor final sem um tratamento térmico. Assim os moldes

devem passar pelo processo de endurecimento nos fabricantes de moldes(1). Como consequência, esses aços contêm impurezas e podem apresentar irregularidades nas durezas alcançadas no produto final, visto que o processo de tratamento térmico dos moldes é realizado diferentes produtores.

3.1.2. Toolox 44

O Toolox 44 é um aço ferramenta pré-endurecido de baixa liga, dureza de 45~55 HRC. Possui grãos finos e apresenta em sua microestrutura martensita revenida(2). Pode ser facilmente polido, granulado, erodido, gravado, fatiado, soldado em aplicações que precisam de uma dureza de superfície mais elevada para combater o desgaste (2).

Em sua composição química, Tabela 1, podemos observar a presença de elementos de liga como cromo (Cr), vanádio (V) e molibdênio (Mo), que tem como objetivo, respectivamente, aumentar a temperabilidade, refinar o grão e aumentar a formação de carbonetos com alta dureza a quente. O Toolox 44 é produzido em uma aciaria totalmente integrada, permitindo a produção de aço extremamente limpo(1).

Tabela 1 - Composição química do aço ferramenta Toolox 44

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni
0.32%	0.6-1.1%	0.8%	< 0.01%	< 0.002%	1.35%	0.8%	0.14%	< 1.0%

Quando comparado com os aços normalmente usados na fabricação de moldes e matrizes, por passar pelos processos de tratamento térmico antes de chegar ao produtor de moldes e matrizes, o Toolox 44 apresenta maior uniformidade na dureza final dos moldes(5,7). Além disso, apresenta uma resistência maior ao impacto, tanto em temperatura ambiente quanto em altas temperaturas, quando comparado com outros aços empregados na fabricação de moldes(8).

3.2. Fresamento

Durante o fresamento, a remoção de material da peça usinada se acontece através da combinação da rotação de uma ferramenta de corte com múltiplas arestas e o avanço desta ferramenta em relação ao material usinado (9). Sendo assim, as diferentes estratégias adotadas para um processo de usinagem por fresamento

passam constantemente pelo modo como o avanço da peça usinada ocorre em relação à peça usinada.

No que refere a sentido de rotação da ferramenta de corte em relação ao eixo da máquina e a peça usinada, este processo apresenta principalmente duas maneiras diferentes de cortar materiais, sendo esses: fresamento concordante e fresamento discordante. A variação entre esses dois métodos de fresamento gera diferenças na interação entre ferramenta e material que geram, como consequência, diferenças de propriedades finais do material usinado. Entre as propriedades que podem ser alteradas estão: rugosidade, tensões residuais e alterações microestruturais (10,11). Ainda outros efeitos podem ser observados nas ferramentas, como a diferença de desgaste e vida útil da ferramenta, assim como a vibração no processo(12–14).

O estudo de processos de usinagem por fresamento para peças utilizadas em moldes e matrizes apresentam situações onde o contato da ferramenta com a peça usinada é complexo, além de a ferramenta e o material usinado estarem sujeitos a cargas de impacto que podem superar o limite suportado pelo conjunto. Esses fatos dificultam a interpretação e a previsão da evolução do desgaste da ferramenta(12). Assim, a escolha do método de fresamento, concordante ou discordante, na aplicação em processos relacionados a fabricação de moldes e matrizes influencia consideravelmente a distribuição de tensões durante a usinagem e também o desempenho da ferramenta(15).

3.2.1. Variáveis no fresamento

A compreensão dos conceitos de variáveis na usinagem é fundamental para o entendimento e para o estudo dos ângulos das ferramentas de corte, das forças de corte e das condições de usinagem(16). As características finais da de uma superfície usinada e a vida útil da ferramenta utilizada na usinagem dependem diretamente da definição dos dados de corte em um processo de fresamento. Assim, entender a definição de alguns desses dados se faz importante para a comparação entre duas diferentes estratégias de usinagem.

3.2.1.1. Profundidade e largura de corte

A profundidade e a largura de corte são consideradas a partir de duas perspectivas, a profundidade de corte da ferramenta no sentido axial (a_p) e a largura do corte no sentido radial (a_e), conforme esquema na Figura 1.

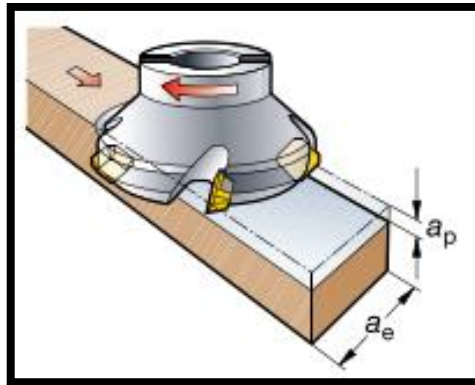


Figura 1 - Representação esquemática das profundidades de corte radial (a_e) e axial (a_p)(17).

Portanto a_p é a distância que a ferramenta está ajustada, abaixo da superfície não usinada e a_e é a distância da superfície que está sendo usinada(17).

3.2.1.2. Velocidade de corte e de fuso

A velocidade de fuso (n) é representada em rpm e indica o número de rotações que a ferramenta de fresamento faz por minuto em torno do próprio eixo. Já a velocidade de corte (V_c) é medida em m/min e indica a velocidade do ponto da ferramenta que está em contato com a superfície usinada. Essas variáveis podem ser observadas na Figura 2.

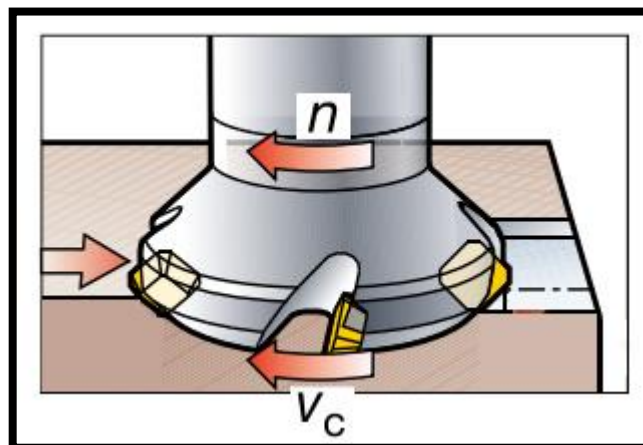


Figura 2 - Representação esquemática das velocidades de fuso (n) e de corte (V_c)(17).

3.2.1.3. Avanço por dente e por minuto

O avanço por dente (f_z), indica em mm/dente, a distância usinada por aresta de corte durante a rotação da ferramenta, definido a espessura do cavaco. O avanço por minuto ou avanço da mesa (V_f) indica o avanço da ferramenta em relação à peça em distância por unidade de tempo. Geralmente apresentado em mm/min, o valor é

definido a partir da relação entre o avanço por dente, o número de arestas de corte efetivas (z_c) e a velocidade de fuso. Essas variáveis são observadas na Figura 3.

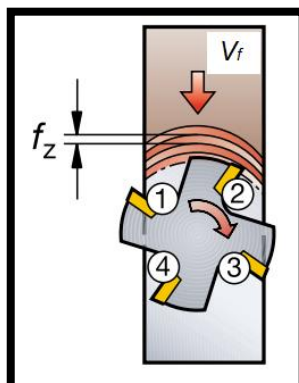


Figura 3 - Representação esquemática do avanço por dente (f_z) e por minuto (V_f)(17).

3.2.2. Fresamento Concordante

O fresamento concordante tem como característica o avanço do fuso tendo o mesmo sentido da rotação da ferramenta de corte, de maneira que a velocidade de corte da aresta que está em contato com o material usinado concorda, em sentido, com a velocidade de deslocamento do eixo da máquina em relação à peça usinada (16).

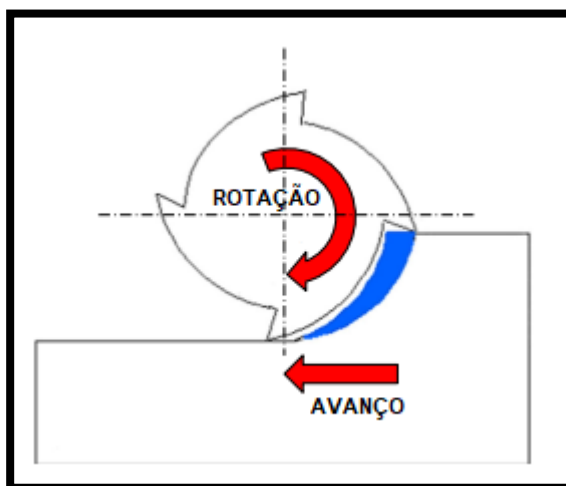


Figura 4 - Representação esquemática de vista superior do método de fresamento concordante(10).

O fresamento concordante tem como característica importante a posição de entrada da aresta de corte no material usinado. Essa entrada ocorre de maneira que a área de contato da aresta na entrada é máxima, seguida da diminuição gradual até

a saída da aresta do material, onde a área de contato é zero. Assim, devido a essa grande área de contato na entrada da ferramenta, nas peças que apresentam superfície endurecida, o contato inicial da aresta ocorre em situação desfavorável. Outra característica desse método está relacionada a componente horizontal da força de corte da ferramenta, que tem mesma direção e sentido do avanço da mesa, o que pode gerar vibração no processo devido a variação da resultante final das forças no fuso da máquina (18,19).

Geralmente o fresamento concordante é a opção de estratégia de usinagem mais indicada, pois costuma apresentar melhor acabamento, estabilidade e menor desgaste de ferramentas, porém existem algumas situações, como em máquinas com grande variação de folga ou uso de pastilhas cerâmicas resistentes ao calor em que o método discordante é recomendado(17,19).

3.2.3. Fresamento discordante

O fresamento discordante tem como característica o avanço do fuso tendo o sentido oposto ao sentido da rotação da ferramenta de corte, de maneira que a velocidade de corte da aresta que está em contato com o material usinado discorda, em sentido, com a velocidade de deslocamento do eixo da máquina em relação à peça usinada (16).

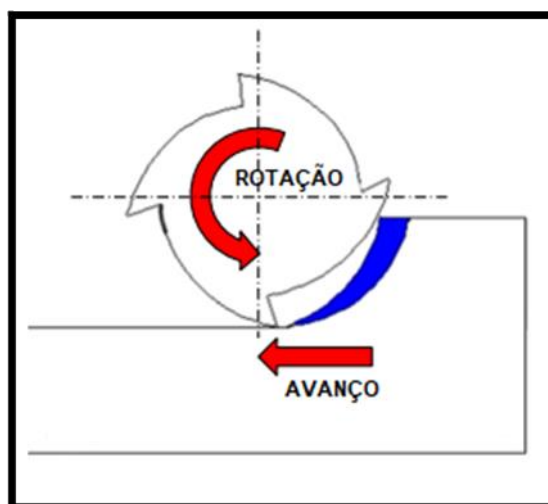


Figura 5 - Representação esquemática de vista superior do método de fresamento discordante(10)

A posição de entrada da aresta de corte no material usinado gera uma condição não muito favorável para o processo de usinagem em questão. A área de contato entre aresta e material usinado é mínima, aumentando até seu valor máximo no final do corte (18).

A utilização desta estratégia de fresamento faz com que a aresta de corte, na entrada da ferramenta, seja forçada para dentro do corte, visto que a componente horizontal da força de corte da ferramenta tem mesma direção e sentidos opostos.

Assim as folgas no fuso da máquina são eliminadas e ocorre o esfregamento ou queima devido à forte atrito, gerando altas temperaturas e a deformação plástica na região usinada (16,19). Na entrada da ferramenta ocorre também o contato da aresta de corte com as superfícies trabalhadas anteriormente, que apresentam aumento de dureza devido ao encruamento (15,16,18). O aumento da temperatura somado a grande espessura de saída do cavaco favorece a formação de rebarbas, o processo de adesão e o micro lascamento da aresta(17).

Devido a direção do avanço da mesa em relação a trajetória da aresta de corte, o raio de curvatura da trajetória da aresta de corte é diferente nos fresamentos discordante e concordante, sendo menor na estratégia discordante(20). Essa diferença pode causar menores rugosidades na superfície usinada com fresamento discordante, visto que os picos e vales gerados pelo avanço do dente na peça ficam mais próximos (21).

3.3. Desgaste em ferramentas de usinagem

O desgaste observado em ferramentas de usinagem varia conforme o processo, a ferramenta, as condições de corte e o material a ser usinado. Sendo assim, estudar o tipo de desgaste que ocorre na ferramenta de usinagem utilizada é de extrema importância. Por ser uma consequência direta de aspectos importantes na definição de um processo, entender bem o tipo de desgaste possibilita a otimização de processos, seja por dar mais vida útil a ferramenta ou por aumentar a produtividade de um processo de usinagem.

Os principais mecanismos de desgaste encontrados em ferramentas de corte podem ser divididos em 5 grupos principais, sendo esses: desgaste abrasivo, químico, adesivo, térmico e mecânico.

O tipo mais comum de desgaste abrasivo é chamado de desgaste de flanco, visto na Figura 6, que ocorre devido à abrasão de constituintes duros no material usinado e oferece a ferramenta uma vida útil previsível e desempenho estável.

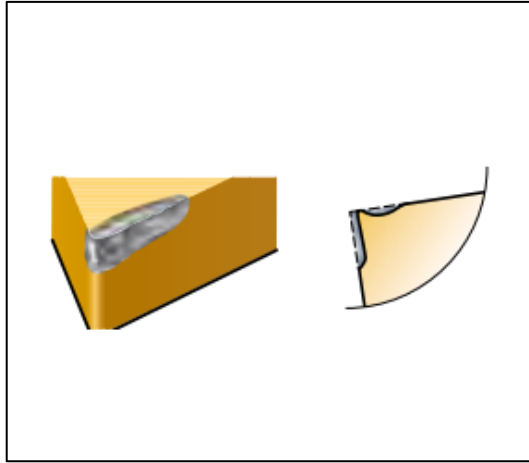


Figura 6 - Representação de desgaste de flanco em aresta de corte (17).

Quanto ao desgaste de tipo químico, o problema mais comum é a craterização, Figura 7, que ocorre devido à reação química entre o material usinado e a ferramenta ou a cobertura da ferramenta. A craterização enfraquece a ferramenta podendo levá-la à quebra.

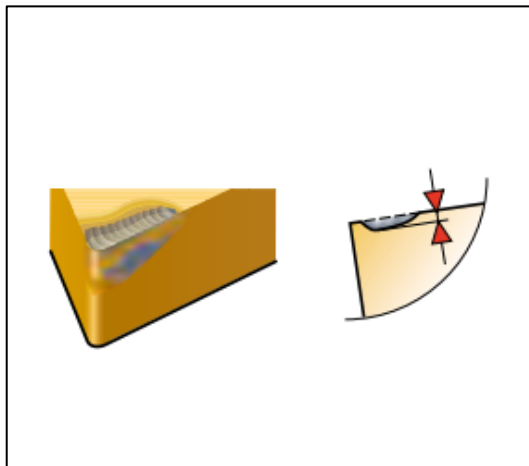


Figura 7 - Representação de craterização em aresta de corte (17).

Desgaste de tipo adesivo pode ocorrer principalmente de duas formas: pela formação de arestas postiças, Figura 8, ou por desgastes tipo entalhe. A aresta postiça ocorre quando há solda na aresta de corte, de material proveniente de cavacos, geralmente presente na usinagem de materiais pastosos ou em processo com baixa velocidade de corte. Já o desgaste tipo entalhe é caracterizado por desgaste

excessivo na face de saída e no flanco da ferramenta causado pela adesão de cavacos e pela deformação da superfície endurecida do incerto, o que é comum na usinagem de aços inoxidáveis e HRSA.

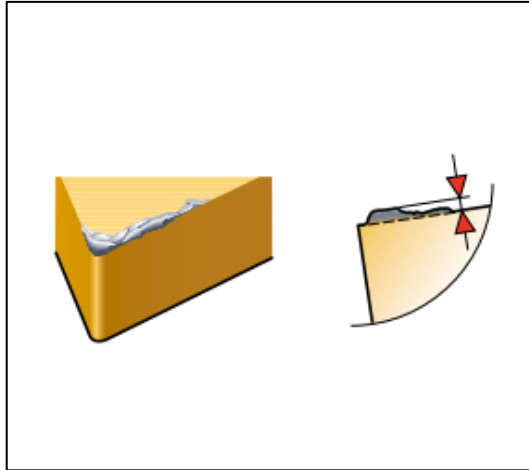


Figura 8 - Representação de aresta postiça em aresta de corte (17).

Desgastes gerados por altas temperaturas ocorrem, na maior parte das vezes, de duas maneiras: deformação plástica, onde as altas temperaturas durante a usinagem causam o amolecimento do material da ferramenta que se deforma plasticamente, ou pela aparição de trincas térmicas, que ocorrem quando a temperatura na aresta de corte diminui rapidamente. Estas geralmente ocorrem em processos com corte interrompido e aparecem mais ainda quando há a utilização de fluido refrigerante. Os dois tipos de desgaste podem ser observados na Figura 9.

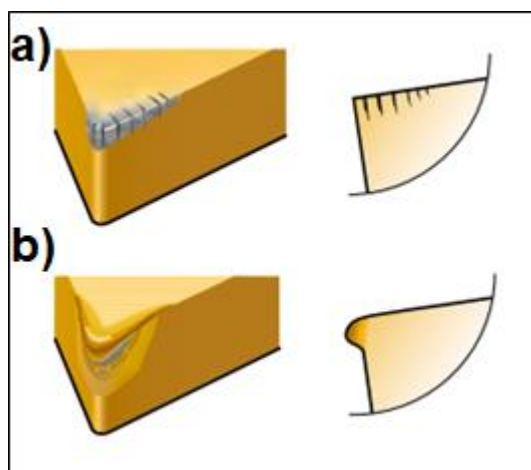


Figura 9 - Representação de (a) trincas térmicas e (b) deformação plástica (17).

Desgastes mecânicos são evidenciados pelo lascamento, Figura 10, ou quebra da aresta devido a uma sobrecarga de esforços mecânicos aos quais a ferramenta é submetida. As causas desses tipos de falha podem ser martelamento de cavacos, aresta postiça, vibração, má fixação, desgaste excessivo, dados de corte muito altos, inclusões no material usinado, entre outros.

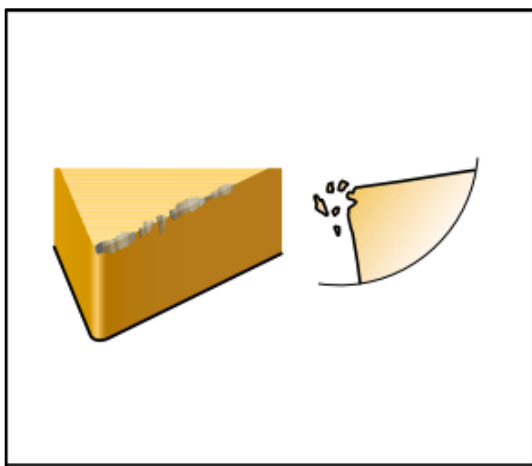


Figura 10 - Representação de lascamento da aresta de corte (17).

Além dos diferentes tipos de desgaste que podemos encontrar em uma ferramenta, um fator muito importante a se levar em conta é a evolução desse desgaste. A velocidade e a previsibilidade da progressão do desgaste em uma ferramenta mudam conforme o material usinado, a operação, estratégia usada na usinagem, presença ou não de chanfro e o tipo de desgaste inicial (11).

3.3.1. Curvas de vida da ferramenta de corte

Dentre os múltiplos fatores que influenciam a vida útil de uma ferramenta de usinagem, a compreensão dos efeitos das variáveis que podem ser controladas é de extrema importância. O entendimento do efeito na vida útil ocasionado por uma mudança nos parâmetros de corte torna possível estimar e controlar, a partir da alteração de algum dado de corte, a longevidade de uma ferramenta segundo as necessidades do processo.

Entre essas variáveis controláveis que afetam diretamente a vida útil da ferramenta destacam-se o avanço (f_v), as profundidades de corte (a_p e a_e) e a velocidade de corte (V_c) (16). Sendo assim, as curvas de vida de ferramenta, expressas a partir da vida útil e da velocidade de corte, Figura 11, são utilizadas como uma espécie de ábaco para a previsão do tempo de vida de uma ferramenta(18).

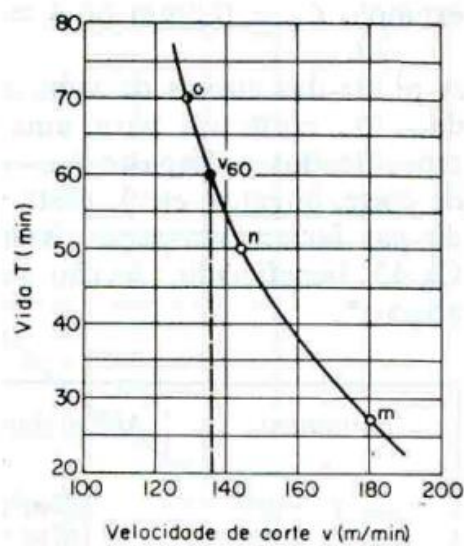


Figura 11 - Exemplo de curva de vida para ferramenta de usinagem expressa a partir da velocidade de corte (V_c)(18).

Essas curvas são construídas a partir de gráfico auxiliares que avaliam a vida útil da mesma ferramenta durante o mesmo processo de usinagem, com a alteração de apenas um dado de corte, a velocidade de corte (V_c), conforme Figura 12.

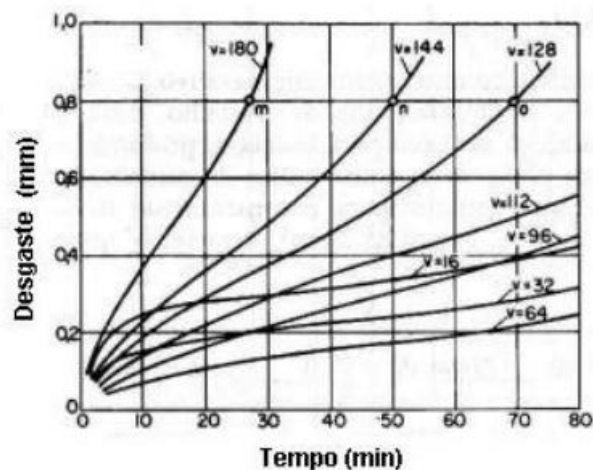


Figura 12 - Curvas de desgaste por tempo para diferentes velocidades de corte (V_c)(18).

4. Materiais e métodos

4.1. Equipamento

O experimento foi conduzido em um centro de torneamento Romi S.A. O modelo da máquina utilizado é a Romi D800, Figura 13, que tem as seguintes especificações técnicas:

- Velocidade de fuso: 10 rpm - 10.000 rpm
- Potência: 18,5 kW
- Tamanho da mesa: 914mm x 560mm
- Interface de máquina: ISO 40



Figura 13 - Centro de usinagem Romi D1250 (semelhante a D800 utilizada no experimento)(22).

4.2. Materiais

4.2.1. Ferramenta

O ferramental utilizado no teste é composto por uma fresa Sandvik Coromant da linha CoroMill 390 para fresamentos de canto a 90° e insertos de metal duro com cobertura CVD, conforme observamos na Figura 14. O código do corpo da fresa é R390-025EH25-11L que apresenta as seguintes especificações:

- Diâmetro de corte (DC) = 25mm
- Número de pastilhas = 2
- Ângulo da aresta de corte da ferramenta (KAPR) = 90°

Os insertos utilizados no teste foram também da Sandvik Coromant da linha de pastilha CoroMill 390 para fresamento. O código dos insertos utilizados na fresa durante os testes é R390-11 T3 08M-PM 4330, que apresentam as seguintes especificações:

- Raio do canto (RE) = 0,8mm
- Espessura da pastilha (S) = 3,59mm
- Largura da pastilha = 6,8mm
- Comprimento efetivo da aresta de corte (LE) = 10mm
- Cobertura = CVD (TiCN+Al₂O₃+TiN)



Figura 14 - Fresa utilizada os insertos já montados (D=25mm)

4.2.2. Amostra Usinada

A amostra inicial usinada foi um bloco de aço ferramenta Toolox 44, de fabricação da SSAB, fornecido pela Sandvik Coromant.

O bloco apresentava dimensões: 156mm x 134mm x 87mm, Figura 15. A dureza no bloco, antes da usinagem, estava dentro do intervalo especificado pelo fabricante, de 45 a 50 HRC. O material não passou por nenhum tratamento térmico adicional depois de sair do fabricante e apresentava, na superfície, marcas que indicavam corte através de serra de fita.

4.3. Metodologia

4.3.1. Usinagem

A trajetória de escolhida para a realização do teste foi o fresamento a 90°, com entrada por rolagem, da parede com maior comprimento do bloco inicial (156mm) e, visando melhor estabilidade no corte, Figura 16 e Figura 17. A fixação foi feita de modo que as maiores faces do bloco (156mm x 134mm) ficassem paralelas à mesa, conforme observado na Figura 15 . Sendo assim as faces usinadas foram as de medida 156mm x 87mm. Devido ao equipamento utilizado para a fixação do bloco bruto à mesa, 17mm de altura também não foram usinados, sendo assim a área considerada para a realização dos testes foi um retângulo de 156mm x 70mm na face indicada anteriormente.

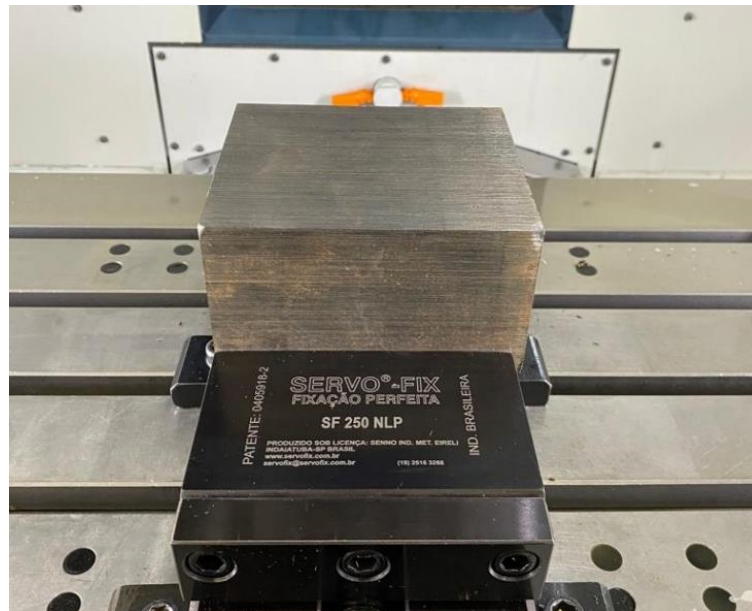


Figura 15 - Bloco de Toolox 44 fixado na mesa da máquina (face de 156mm x 134mm paralela à mesa)

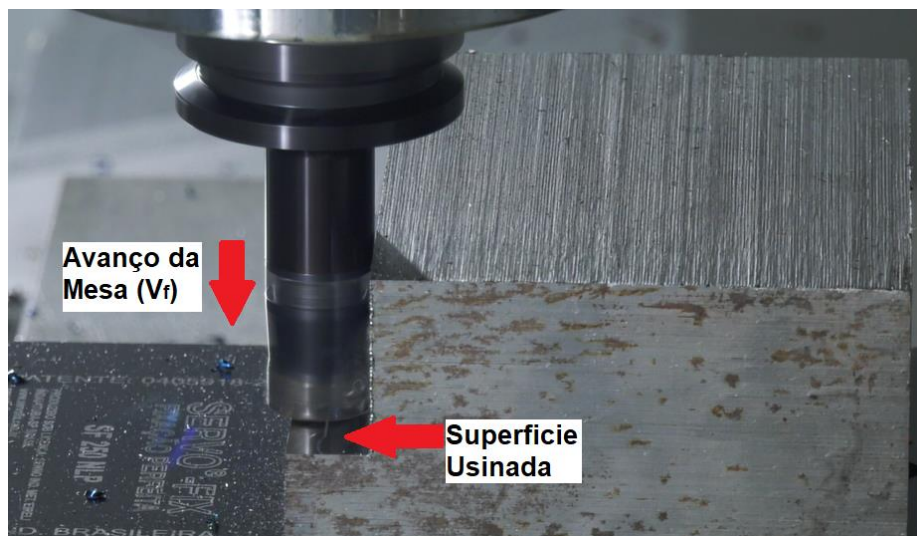


Figura 16 - Indicação da superfície usinada e do avanço da mesa, durante fresamento concordante

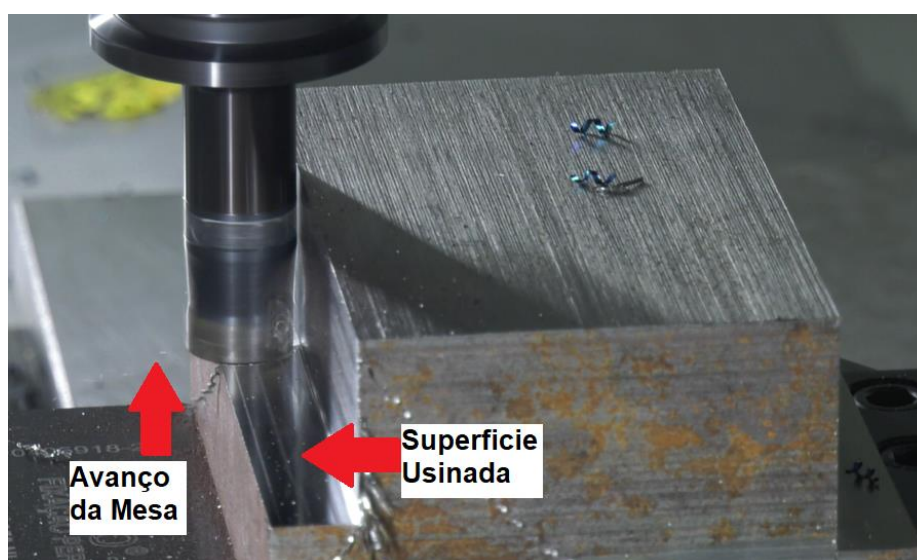


Figura 17 - Indicação da superfície usinada e do avanço da mesa, durante fresamento discordante

Para a escolha inicial dos dados de corte foi utilizada a ferramenta CoroPlus ToolGuide da Sandvik Coromant para obter os melhores dados possíveis de acordo com as ferramentas de corte disponíveis para os testes. Esta ferramenta indica os dados de corte a partir das recomendações de aplicação dos produtos Sandvik. A estimativa de vida útil estimada por esta ferramenta é calculada e apresentada a partir de curvas de vida(23).

Visto que a vida útil estimada da ferramenta para os dados de corte iniciais é muito longa para o tempo de máquina disponível e o ensaio visa analisar o desgaste na aresta de corte, os primeiros 3 passes foram realizados com os dados sugeridos e

os passes seguintes, do 4 ao 60, foram feitos com outros dados de corte, Tabela 2 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

A fim de não interferir negativamente nos resultados do ensaio, apenas uma variável foi alterada. Levando em consideração os dados de corte que poderiam ser alterados, por ter a maior influência na vida útil da ferramenta, a velocidade de corte foi aumentada, mantendo-se a mesma largura (a_e) e profundidade (a_p) de corte.

Tabela 2 - Dados de corte utilizados na usinagem durante os passes de 1 a 3 e de 4 a 60

	Passes 1 a 3	Passes 4 a 60
Largura de corte (a_e)	18 mm	18 mm
Profundidade de corte (a_p)	1 mm	1 mm
Avanço por dente (f_z)	0,115 mm	0,115 mm
Velocidade de corte (V_c)	156 m/min	200 m/min
Velocidade de fuso (n)	1990 rpm	2550 rpm
Vida útil esperada	48 min	26 min

4.3.2. Imagens do desgaste na aresta

Para documentar a evolução do desgaste das arestas de corte e da interferência dos dois métodos de usinagem durante o processo, ao final de alguns passes, foram feitas imagens das arestas de corte. A ferramenta de corte foi retirada da máquina e as arestas de corte foram fotografadas com um aumento de 46x.

Foi utilizado um microscópio ótico digital Veho DX-1 USB 2MP para a captura das imagens. A partir de um programa computacional de processamento e análise de imagem da fabricante do microscópio, os desgastes foram identificados e medidos.

As imagens foram feitas ao fim dos passes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 15, 20, 30, 40, 50 e 60

4.3.3. Medidas de Rugosidade

As medidas de rugosidade (r_a) foram obtidas utilizando um rugosímetro portátil de modelo Mitutoyo SJ210 - 178-561-02A.

Entre os passes citados no item anterior foram obtidas três medidas de rugosidade média (r_a) da superfície usinada. Assim a rugosidade de cada superfície foi considerada como a média das três medidas.

4.3.4. Dureza Vickers

A fim de entender melhor as possíveis alterações sofridas pelo material na superfície usinada, foram cortadas, com a utilização de uma fresa de disco, as barras laterais do bloco que não foram retiradas na usinagem, mas tiveram sua superfície usinada, Figura 18. Em seguida essas barras foram divididas em 4 seções de mesmo tamanho, com a utilização de uma serra de bancada, a fim de estudar os possíveis efeitos em diferentes regiões da usinagem, Figura 19 e Figura 20. Essas seções foram divididas em: região próxima a entrada da ferramenta, região próxima a saída da ferramenta e dois segmentos da porção do meio das barras.

As amostras retiradas do processo concordante foram chamadas de CE, C2, C3 e CS e as amostras retiradas do processo discordante foram chamadas de DE, D2, D3, e DS, seguindo o esquema representado na Figura 19 .

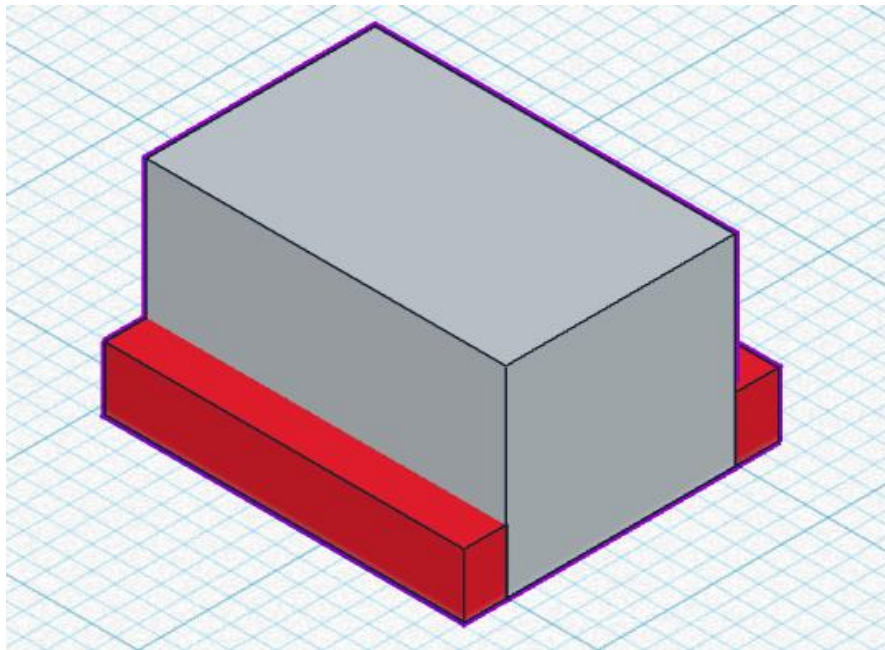


Figura 18 - Representação esquemática do bloco com destaque, em vermelho, para as barras retiradas

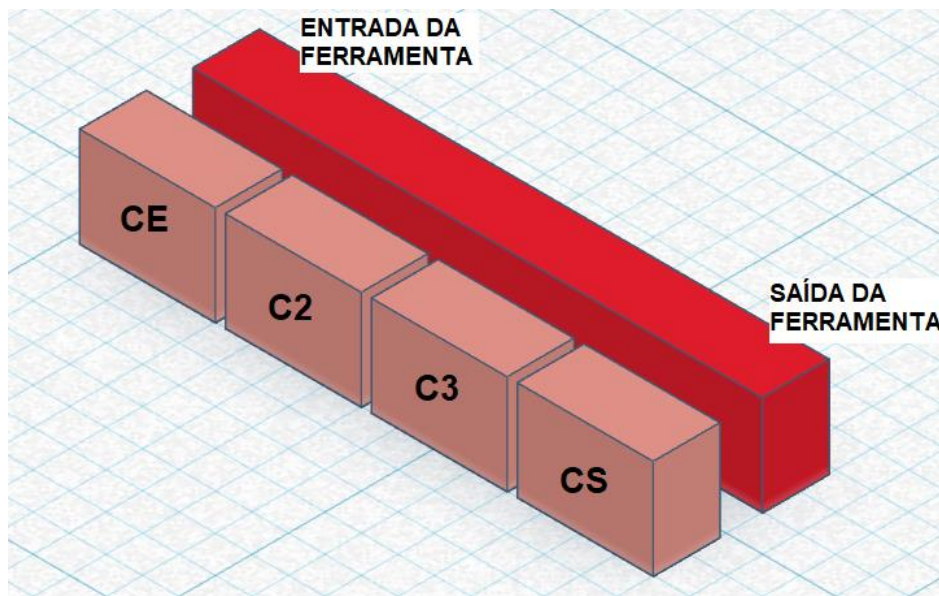


Figura 19 - Representação esquemática da divisão das amostras, do fresamento concordante, para a realização do ensaio de dureza.

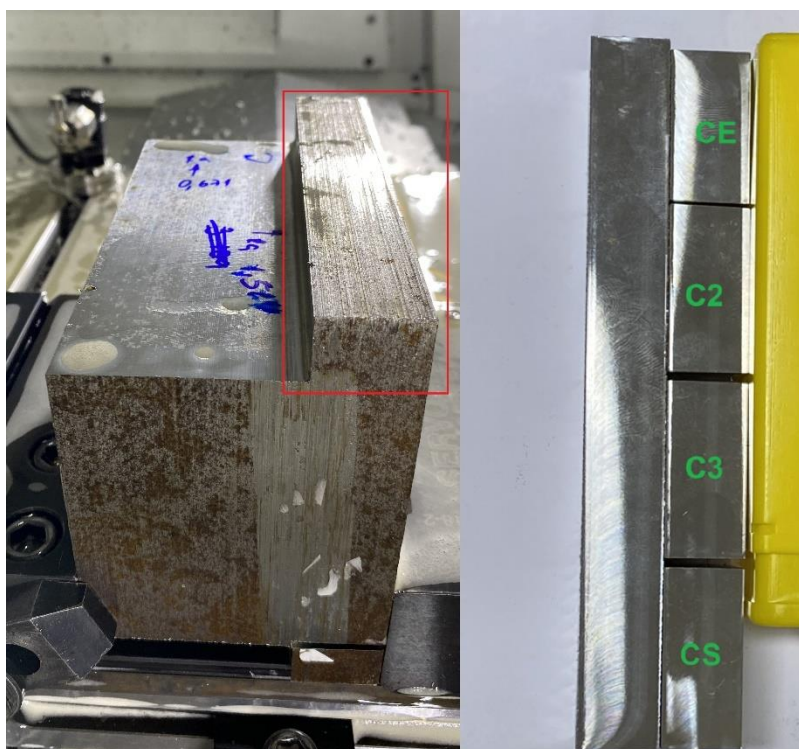


Figura 20 - Porção retirada do bloco usinado destacada a direita; à esquerda, amostra discordante retirada do bloco e amostra concordante separada em 4 seções de 18 x 27 x 35mm.

A partir das 4 amostras retiradas de cada tipo de fresamento, foi realizado um ensaio de microdureza com carga de 50gf. Utilizando um microdurômetro digital

BUEHLER, foram feitas 5 endentações com espaço de 1mm entre elas e foi calculada a dureza Vickers média.

4.3.5. Microscopia (MEV) do perfil da superfície usinada

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada para possibilitar a identificação de possíveis deformações plásticas na superfície usinada.

Foram retiradas das amostras CE, CS, DE e DS, placas de 3mm de espessura e de seções com dimensão de 18 x 20mm, conforme Figura 21. Essas placas foram as amostras utilizadas na análise metalográfica da superfície usinada nas regiões de entrada e saída da ferramenta.

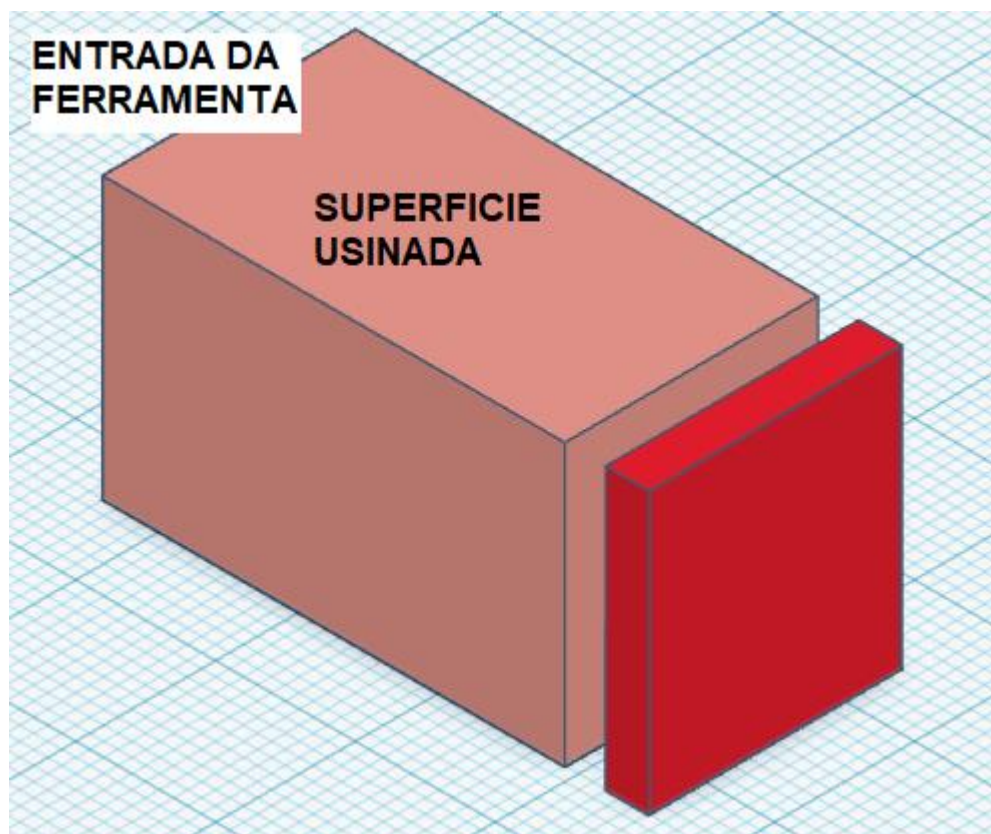


Figura 21 - Representação esquemática das placas, em vermelho, que foram retiradas das amostras, embutidas e analisadas por MEV.

As amostras foram embutidas a quente em baquelite, com a face de 18 x 20mm exposta, lixadas através de uma máquina de lixamento semiautomática até a lixa de granulometria 1200. Foram polidas em politriz com pasta de diamante de

granulometria 3 μ m e 1 μ m. Depois de polidas, as amostras foram atacadas quimicamente com Nital 3% através de ataque por imersão.

Utilizando o MEV, foram feitas imagens de elétrons retroespalhados com 2500x de aumento. As imagens foram feitas no Laboratório de Fenômenos de Superfície, usando um microscópio de modelo JEOL JSM-6010LA.

5. Resultados e Discussão

5.1. Rugosidade

Os resultados obtidos para as análises de rugosidade da superfície da amostra usinada após os passes dos fresamentos concordante e discordante são observados no gráfico apresentado na Figura 22.

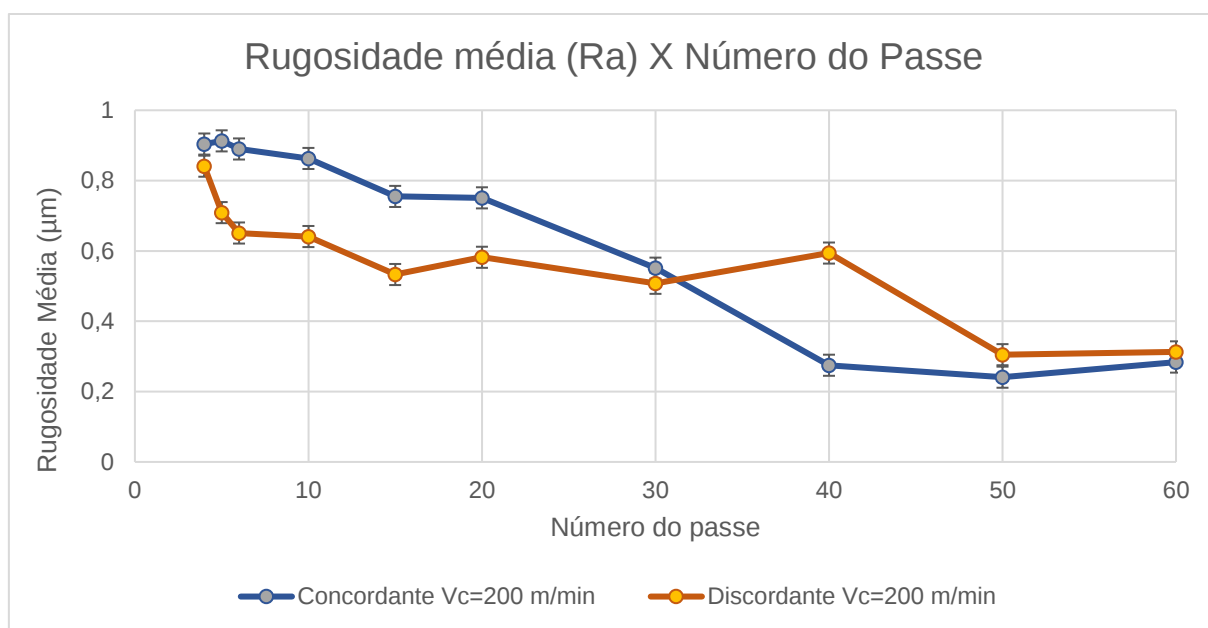


Figura 22 - Gráfico de comparação da Rugosidade média (Ra), em μ m, por passe, após os processos de fresamento.

Nota-se inicialmente que os valores medidos para a rugosidade média da superfície usinada, nos dois tipos de fresamento, diminuem conforme a progressão da usinagem. Esse comportamento só não foi observado entre as medidas realizadas após os passes 15 e 20 e após os passes 30 e 40.

Os valores encontrados para a rugosidade média foram menores para o fresamento concordante até o passe de número 30. Resultados esses que são

similares aos encontrados nos experimentos conduzidos por Dib (21) e podem ser explicados pela diferença do raio circular da trajetória da aresta de corte nos dois tipos de fresamento.

As medidas feitas no passe de número 40 apresentam uma diferença inesperada entre a rugosidade dos métodos de fresamento, visto que a rugosidade na superfície usinada por fresamento concordante diminuiu muito em relação a rugosidade média medida na superfície usinada por fresamento discordante. Já os valores encontrados nas medidas feitas após os passes 50 e 60 apresentam valores próximos para os dois métodos.

A repetição do teste pode trazer resultados mais representativos, especialmente para as medidas de rugosidade média realizada após os passes 40, 50 e 60.

5.2. Evolução do desgaste na aresta de corte

As imagens das arestas de corte obtidas após os passes 15, 30, 50 e 60 nos fresamentos concordante e discordante podem ser observadas nas figuras Figura 23 a Figura 30, apresentadas de maneira a separadas por método de fresamento.

Os desgastes registrados após o 15º e o 30º passe no fresamento concordante, Figura 23 e Figura 24, e no discordante, Figura 27 e Figura 28, mostram o surgimento de desgaste de flanco de tamanho similar. O desgaste é evidenciado pela coloração acinzentada da aresta de corte do inserto, o que marca o desgaste por abrasão da cobertura da ferramenta.

Nos desgastes registrados após o 50º passe mostram para a aresta do fresamento concordante, Figura 25, um aumento do desgaste de flanco. Esse aumento não é observado, com a mesma proporção, na aresta de corte do inserto utilizado no fresamento discordante, Figura 29.

Para os desgastes registrados após o 60º passe mostram, no fresamento concordante, desgaste mecânico no inserto através do lascamento da aresta de corte utilizada, Figura 26. Já no fresamento discordante, o desgaste registrado, Figura 30, foi similar ao apresentado no passe anterior, sem alteração significativa de tamanho.

Esse comportamento diferente entre os desgastes analisados, explicado por Bouzakis (12), se dá através dos diferentes perfis das forças de corte na entrada da

aresta no material. Pode também ser relacionado a vibrações na usinagem que, evidenciado por Diniz (18), são provenientes de possíveis folgas no eixo da máquina e suas interações com as forças resultantes dos esforços de corte.

Concordante:

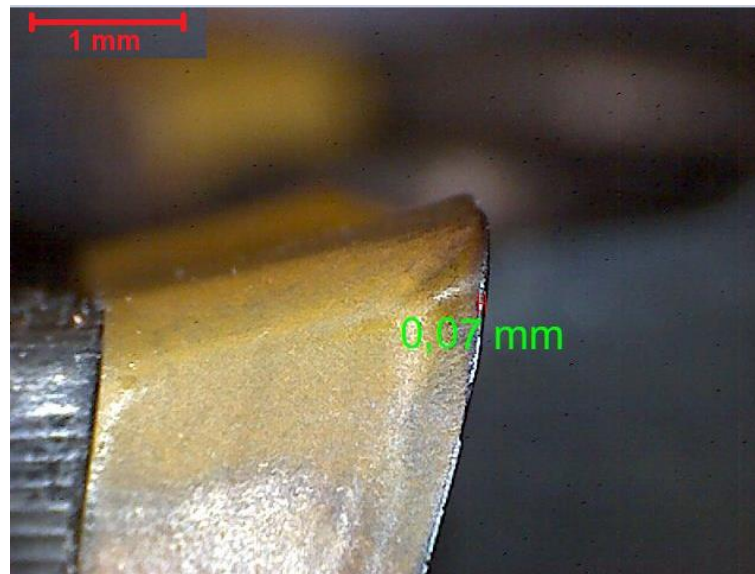


Figura 23 - Aresta de corte da pastilha utilizada no fresamento concordante após o 15º passe, com indicação de maior desgaste medido (0,07mm)

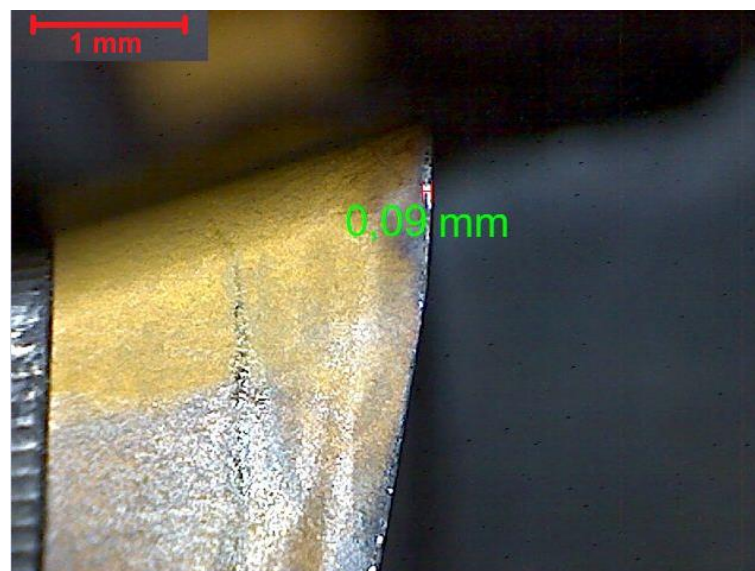


Figura 24 - Aresta de corte da pastilha utilizada no fresamento concordante após o 30º passe, com indicação de maior desgaste medido (0,09mm)

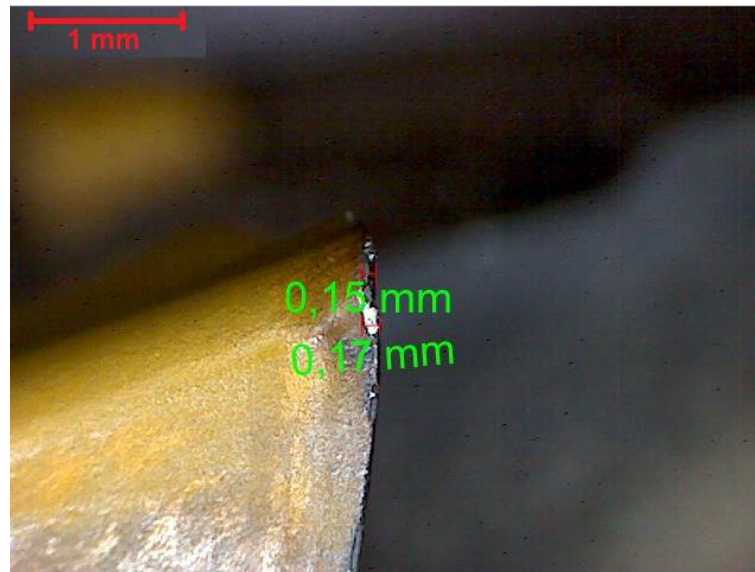


Figura 25 - Aresta de corte da pastilha utilizada no fresamento concordante após o 50º passe, com indicação de maior desgaste medido (0,17mm)

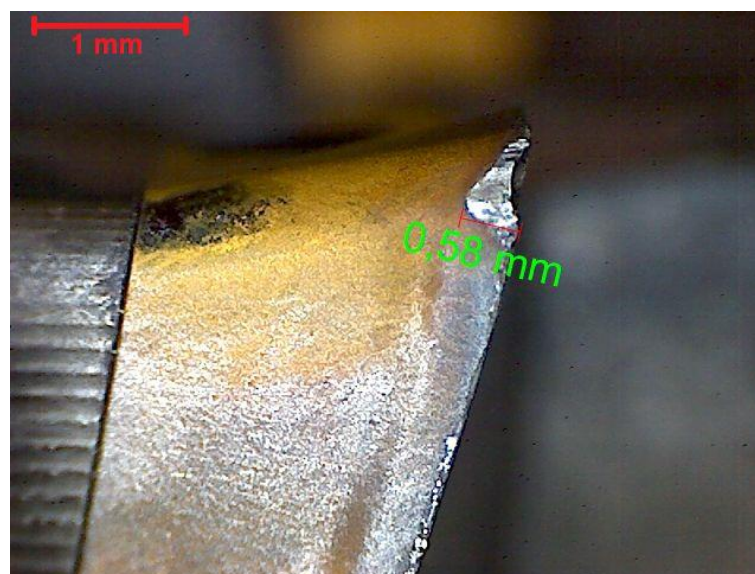


Figura 26 - Aresta de corte da pastilha utilizada no fresamento concordante após o 60º passe, com indicação de maior desgaste medido (0,58mm)

Discordante:

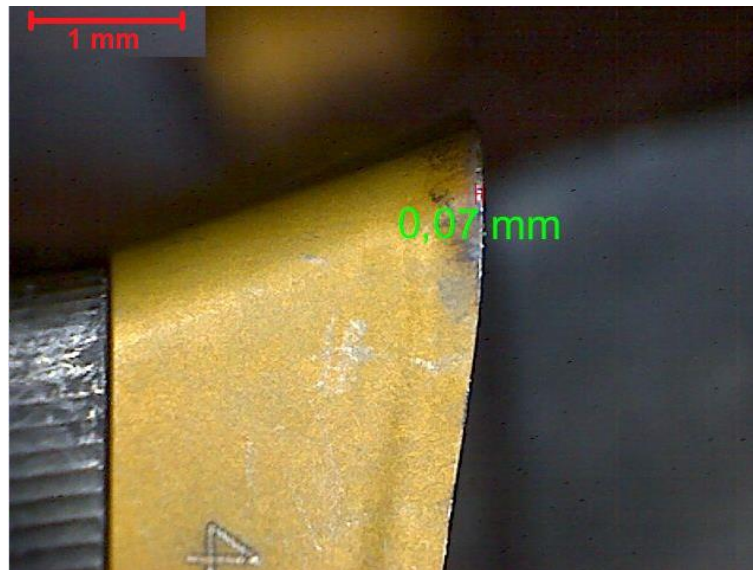


Figura 27 - Aresta de corte da pastilha utilizada no fresamento discordante após o 15º passe, com indicação de maior desgaste medido (0,07mm)

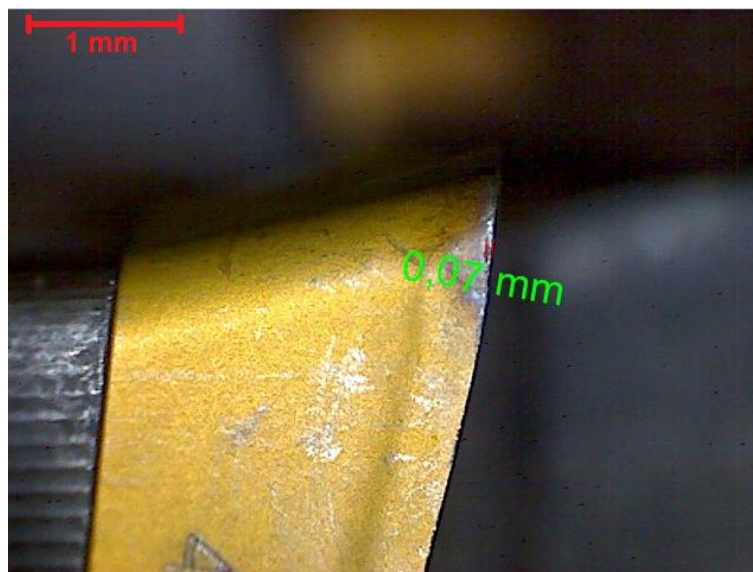


Figura 28 - Aresta de corte da pastilha utilizada no fresamento discordante após o 30º passe, com indicação de maior desgaste medido (0,07mm)

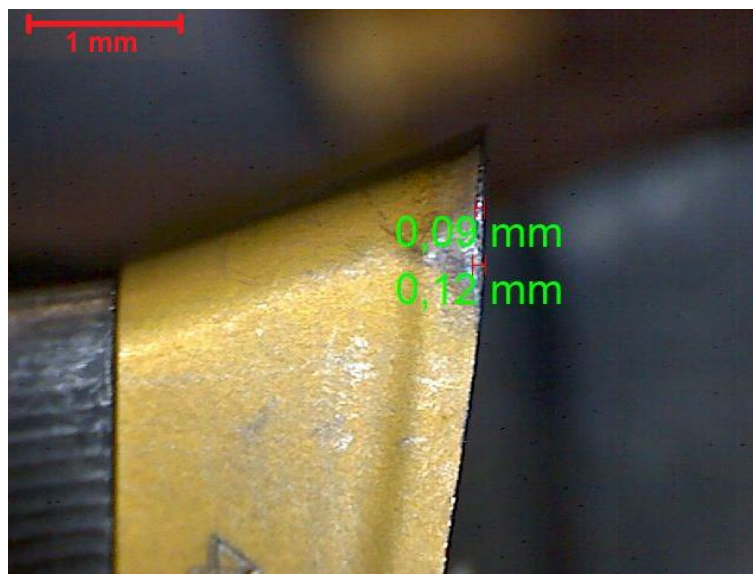


Figura 29 - Aresta de corte da pastilha utilizada no fresamento discordante após o 50º passe, com indicação de maior desgaste medido (0,12mm)

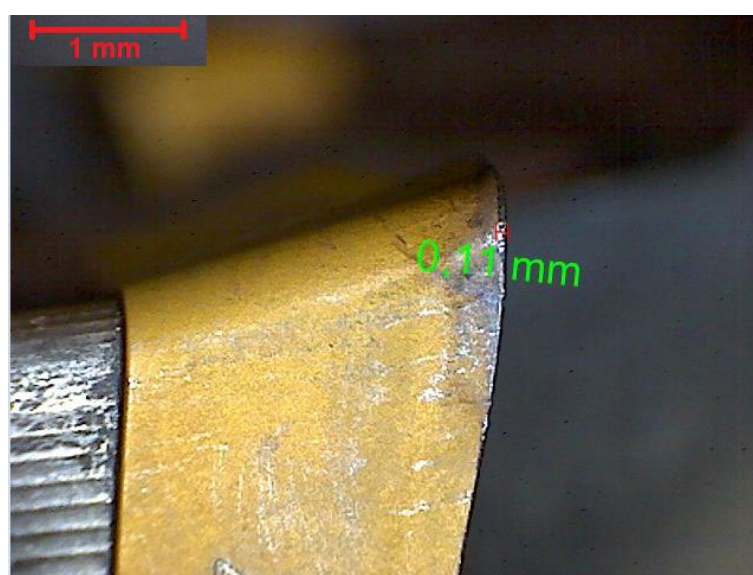


Figura 30 - Aresta de corte da pastilha utilizada no fresamento discordante após o 60º passe, com indicação de maior desgaste medido (0,11mm)

5.3. Ensaio de Dureza

As Tabela 3, Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6 mostram os valores obtidos a partir do ensaio de dureza realizado nas amostras de fresamento concordante e discordante. As medidas de dureza são apresentadas em Vickers (HV).

Tabela 3 - Dureza (HV) medida na superfície usinada das amostras próximas a entrada da ferramenta

Amostra	Concordante (CE)	Discordante (DE)
Média	655,0	780,4
Desvio padrão	62,9	43,6

Tabela 4 - Dureza (HV) medida na superfície usinada das amostras 2

Amostra	Concordante (C2)	Discordante (D2)
Média	740,2	722,0
Desvio padrão	53,0	52,8

Tabela 5 - Dureza (HV) medida na superfície usinada das amostras 3

Amostra	Concordante (C3)	Discordante (D3)
Média	694,7	697,3
Desvio padrão	48,4	36,8

Tabela 6 - Dureza (HV) medida na superfície usinada das amostras próximas a saída da ferramenta

Amostra	Concordante (CS)	Discordante (DS)
Média	671,2	691,8
Desvio padrão	47,8	21,6

Os valores de dureza encontrados nas amostras próximas a entrada da ferramenta mostram resultados significativos. Como esperado, a dureza da superfície na entrada da ferramenta no fresamento discordante é maior em relação ao fresamento concordante. Bouzakis (15) e Diniz (18) mostram que o perfil de esforços e o forte atrito na entrada da ferramenta no material usinado no fresamento discordante gera aumento de dureza no material, justificando os resultados encontrados.

Já na dureza medida nas superfícies das outras amostras, de ambos os métodos de fresamento, os valores não apresentaram diferenças significativas entre fresamento concordante e discordante. Contudo apresentaram diferença com relação a dureza do material especificado pelo fabricante, SSAB. Ferraresi (16) explica que

essa diferença ocorre devido ao esfregamento da aresta de corte com o material, que causa deformações plásticas na superfície usinada.

5.4. MEV

As imagens obtidas por meio de microscopia eletrônica de varredura das amostras retiradas das regiões próximas a entrada e a saída da ferramenta no fresamento concordante, Figura 31 e Figura 32, e no fresamento discordante, Figura 33 e Figura 34.

É possível identificar nas imagens regiões deformadas plasticamente na superfície usinada. Essa regiões deformadas plasticamente, na usinagem de Toolox 44, são similares a resultados obtidos por Bayraktar e Uzun (7).

Diniz (18) relaciona a formação dessas camadas deformadas plasticamente, pelo contato da aresta, ao aumento da dureza na superfície. Esse aumento foi percebido nas medidas de dureza apresentadas anteriormente.

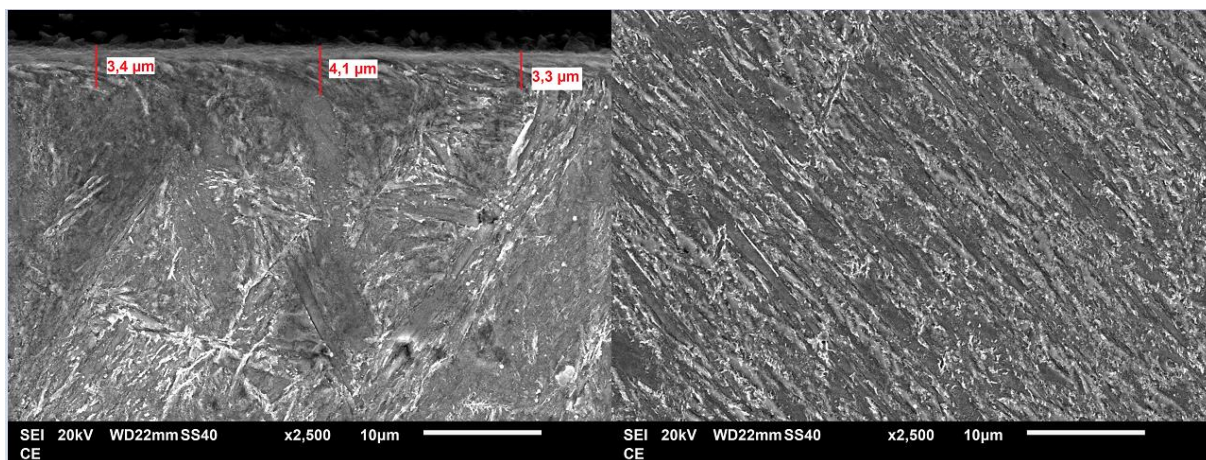


Figura 31 - Microscopia eletrônica de varredura da amostra CE; região da superfície usinada está apresentada a direita e a região central da amostra está apresentada a esquerda.

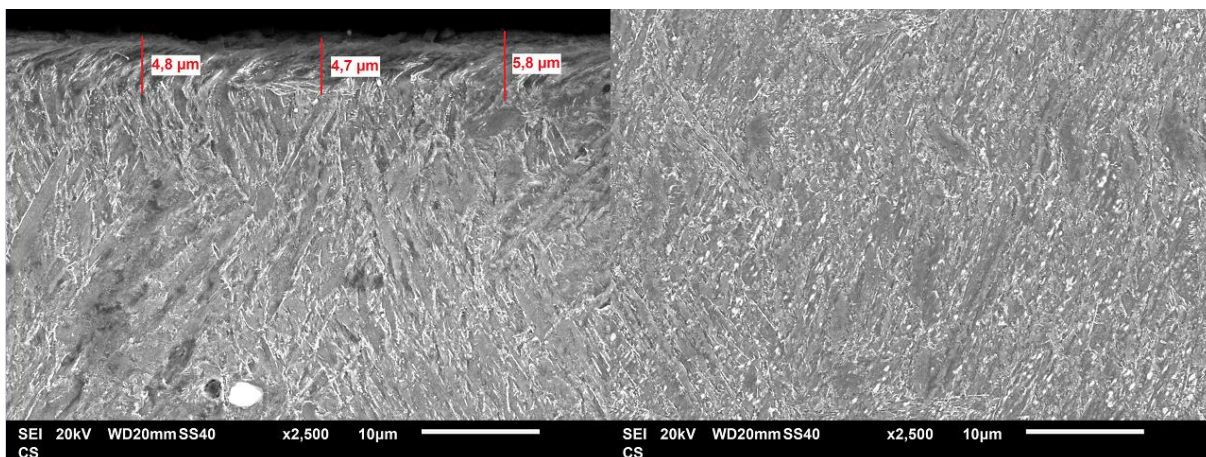


Figura 32 - Microscopia eletrônica de varredura da amostra CS; região da superfície usinada está apresentada a direita e a região central da amostra está apresentada a esquerda.

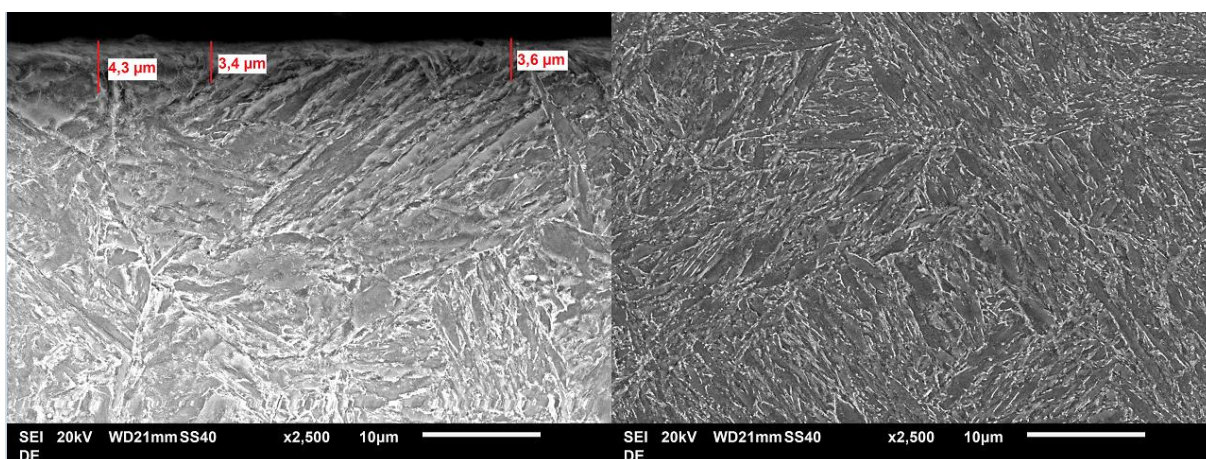


Figura 33 - Microscopia eletrônica de varredura da amostra DE; região da superfície usinada está apresentada a direita e a região central da amostra está apresentada a esquerda

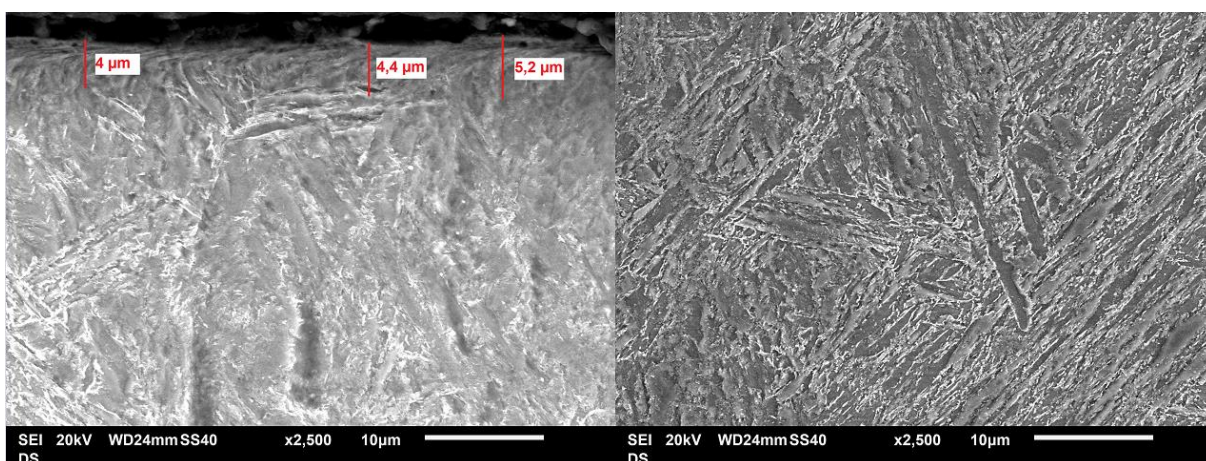


Figura 34 - Microscopia eletrônica de varredura da amostra DS; região da superfície usinada está apresentada a direita e a região central da amostra está apresentada a esquerda

6. Conclusões

A partir dos resultados obtidos nos testes realizados pode-se observar que a formação e a evolução do desgaste nas arestas de corte foram mais controladas e previsíveis no fresamento discordante do que no fresamento concordante, de modo que a vida útil da ferramenta utilizada no fresamento discordante tende a ser maior.

A rugosidade média (r_a) na superfície usinada foi menor no fresamento discordante até o meio do procedimento experimental, passe 30. Após o meio do procedimento experimental, a rugosidade medida nas superfícies usinadas por fresamento concordante foram menores.

O processo de fresamento alterou a dureza nas superfícies usinadas com os dois métodos. A dureza apresentada na região próxima a entrada da ferramenta no fresamento discordante foi maior do que no fresamento concordante. Nas demais regiões analisadas as diferenças não apresentarão diferenças significativas.

A alteração na dureza foi ocasionada através da formação de deformações plásticas na microestrutura da superfície usinada. As imagens obtidas através de MEV mostraram que essas regiões deformadas plasticamente foram similares nos dois tipos de estratégia de fresamento analisados.

7. Referências Bibliográficas

1. Hansson P. Modern prehardened tool steels in die-casting applications. *Mater Manuf Process*. 2009;24(7–8):824–7.
2. SSAB. Toolox: Once Toolox, always Toolox. 2021;2:36.
3. Muhič M, Tušek J, Kosel F, Klobčar D, Pleterški M. Thermal fatigue cracking of Die-casting dies. *Metalurgija*. 2010;49(1):9–12.
4. Oliveira AJ De. Análise do desgaste de ferramentas no Fresamento com Alta Velocidade de aços endurecidos. 2007;232.
5. Naimi S, Hosseini SM. Tool Steels in Die-Casting Utilization and Increased Mold Life. *Adv Mech Eng*. 2015;7(1).
6. Persson A. On Tool Failure in Die Casting. 2003;
7. Bayraktar Ş, Uzun G. Experimental study on machinability of pre-hardened Toolox 44 and Nimax mould steels. *J Fac Eng Archit Gazi Univ*. 2021;36(4):1939–47.
8. Sjöström J, Bergström J. Thermal fatigue in hot-working tools. *Scand J Metall*. 2005;34(4):221–31.
9. Walsh RA, Cormier DR. McGraw-Hill machining and metalworking handbook. 2006;1006.
10. Laamouri A, Ghanem F, Braham C, Sidhom H. Influences of up-milling and down-milling on surface integrity and fatigue strength of X160CrMoV12 steel. *Int J Adv Manuf Technol*. 2019;105(1–4):1209–28.
11. Yue C, Gao H, Liu X, Liang SY. Part functionality alterations induced by changes of surface integrity in metal milling process: A review. Vol. 8, *Applied Sciences* (Switzerland). Multidisciplinary Digital Publishing Institute; 2018. p. 2550.
12. Bouzakis KD, Makrimalakis S, Katirtzoglou G, Bouzakis E, Skordaris G, Maliaris G, et al. Coated tools' wear description in down and up milling based on the cutting edge entry impact duration. *CIRP Ann - Manuf Technol*. 2012;61(1):115–8.
13. Hadi MA, Ghani JA, Che Haron CH, Kasim MS. Comparison between Up-milling

- and Down-milling Operations on Tool Wear in Milling Inconel 718. *Procedia Eng.* 1 de janeiro de 2013;68:647–53.
14. Insperger T, Mann BP, Stépán G, Bayly P V. Stability of up-milling and down-milling, Part 1: Alternative analytical methods. *Int J Mach Tools Manuf.* janeiro de 2003;43(1):25–34.
 15. Bouzakis KD, Gerardis S, Katirtzoglou G, Makrimalakis S, Michailidis N, Lili E. Increasing tool life by adjusting the milling cutting conditions according to PVD films' properties. *CIRP Ann - Manuf Technol.* 2008;57(1):105–8.
 16. Ferraresi D. Fundamentos da usinagem dos metais. 1º ed. Vol. 1, São Paulo: Edgard Blücher. São Carlos; 1977. p. 751.
 17. Sandvik Coromant. Tecnologia da Usinagem de Metais, Manual Técnico. Sandvik Coromant; 2010. 760 p.
 18. Diniz AE, Marcondes FC, Coppini NL. Tecnologia Da Usinagem Dos Materiais. São Paulo; 2014.
 19. Mangoni C. Determinação Teórico-experimental de Forças e Análise Dinâmica Por Elementos Finitos no Fresamento de Peças Com Baixa Rigidez. Florianópolis, SC; 2004.
 20. Bao WY, Tansel IN. Modeling micro-end-milling operations. Part II: tool run-out. *Int J Mach Tools Manuf.* 1 de dezembro de 2000;40(15):2175–92.
 21. Dib MHM, Jasinevicius RG, Benjamin GM. UMA ANÁLISE EXPERIMENTAL DO FRESAMENTO DISCORDANTE E CONCORDANTE. *Revista Illuminart.* 2015;0(13):17.
 22. Romi S.A. Vertical Machining Centers (VMCs). 2018.
 23. Sandvik Coromant. CoroPlus ToolGuide. Disponível em : < <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/pages/toolguide.aspx?ToolSelectorModeValue=CuttingDataCalculation&MaterialID=7564364>>. Acesso em: 10 de jul. de 2022.