

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DAS EXATAS E ENGENHARIAS

JÚLIO FLAMIA

COMPARAÇÃO ENTRE FERRAMENTAS DE METAL DURO DE CLASSES DIFERENTES
PARA FRESAMENTO DE AÇO AISI H13

CAXIAS DO SUL
2019

JÚLIO FLAMIA

**COMPARAÇÃO ENTRE FERRAMENTAS DE METAL DURO DE CLASSES DIFERENTES
PARA FRESAMENTO DE AÇO AISI H13**

Trabalho da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II (MEC0290) apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Processos e Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann.

CAXIAS DO SUL

2019

JÚLIO FLAMIA

**COMPARAÇÃO ENTRE FERRAMENTAS DE METAL DURO DE CLASSES DIFERENTES
PARA FRESAMENTO DE AÇO AISI H13**

Trabalho da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II (MEC0290) apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Processos e Fabricação

Aprovado em 28 / 11 / 2019 .

Banca Examinadora

Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Dr. Leandro Luís Corso
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Ms. Albano Luis Weber
Universidade de Caxias do Sul - UCS

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho à toda a minha família, em especial aos meus pais, Rosicler e Sérgio, pelo apoio e incentivo durante toda a sua realização.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador desse trabalho, Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann, pelo apoio e diretrizes durante a realização do trabalho.

À empresa Zen Design, principalmente ao Lorenzo e ao Pedro da Ré, por abrirem as portas da empresa e permitirem a execução dos testes necessários para a realização deste trabalho, e, ao Armendio da Silva Laiola, Angelo Lunardi e ao Gustavo Henrique, pelo suporte técnico antes e durante a execução dos testes.

Ao técnico laboratorial Gaston Henrique Rossa pela solicitude e ajuda durante a realização das medições de usinabilidade.

Aos professores Ms. Jean Greselle Balotin e ao Dr. Evandro Paese pelas dicas na parte final do trabalho.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, foram fundamentais na realização deste trabalho.

"Get busy living or get busy dying".

The Shawshank Redemption

RESUMO

Atualmente, na produção de moldes e matrizes no Brasil, mais da metade do valor final da peça está relacionado aos custos de usinagem e apenas uma pequena parcela está ligada à matéria-prima. Seguindo uma tendência de aumento dos investimentos em modernização, as indústrias buscam melhorar seus processos produtivos para se manterem competitivas no mercado. Este trabalho tem como objetivo propor uma alternativa de maior custo benefício em relação ao processo de usinagem de uma matrizaria, através da análise comparativa entre a ferramenta atualmente atualizada no processo em relação à uma ferramenta proposta. Ambas as ferramentas possuem mesmo diâmetro, 6 milímetros e foram utilizadas sob as mesmas condições de trabalho. As ferramentas apresentam diferenças, como a classe do metal-duro em que foram fabricadas e seu revestimento. Também se distinguem na sua recomendação de uso: a ferramenta atual é recomendada para a usinagens em geral, enquanto a ferramenta que está sendo proposta nesse trabalho é designada pelo fabricante para a usinagem de aços endurecidos sob altas velocidades de corte. Os testes foram realizados utilizando um corpo de prova de aço H13 temperado até 55 HRc. As ferramentas foram analisadas em intervalos de 20 minutos de usinagem até um tempo total de 60 minutos. Os critérios levados em consideração foram o desgaste das ferramentas e a rugosidade do material usinado, avaliados com o uso de um microscópio e rugosímetro respectivamente. Ao fim dos testes foram feitas as comparações que demonstraram uma grande diferença entre as ferramentas testadas em relação ao desgaste das mesmas e as texturas resultantes na superfície do corpo de prova. Observou-se que a ferramenta proposta nesse trabalho demonstrou grande superioridade em relação ao desgaste e também na rugosidade superficial.

Palavras-chave: Fresamento. Desgaste de ferramenta. Rugosidade. H13. Metal-duro.

ABSTRACT

Nowadays, in the production of molds and dies in Brazil, more than half of the final value of the production is related to machining costs and only a small part is related to the materials. Following a trend of increasing investments in modernization, industries seek to improve their production processes to remain competitive in the market. This paper aims to propose a more cost-effective alternative to the process of machining a die by comparative analysis between the tool that is currently being used in the process in relation to a new proposed tool. Both tools have the same diameter, 6 millimeters and were used under the same machining conditions. The tools differ, such as the grade of carbide in which they were manufactured and their coating. They also differ in their recommendation for use: the current tool is recommended for general machining, while the tool being proposed in this work is designed by the manufacturer for machining hardened steels at high cutting speeds. The tests were performed using a hardened H13 steel specimen to 55 HRC. The tools were analyzed at 20-minute machining intervals to a total time of 60 minutes. The criteria taken into consideration were tool wear and the roughness of the machined material, evaluated using a microscope and roughness meter respectively. At the end of the tests comparisons were made which showed a big difference between the tested tools in relation to their wear and the resulting textures on the specimen surface. It was observed that the proposed tool in this work showed great superiority in relation to the wear and also in the superficial roughness.

Keywords: Milling. Tool wear. Roughness. H13. Hard metal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Diferentes tipos de fresamento	9
Figura 2- Fresamento frontal e cilíndrico tangencial.....	10
Figura 3 - Sentidos de corte para fresamento concordante e discordante.....	11
Figura 4 - Diferença entre ap e ae no fresamento tangencial e frontal	13
Figura 5 - Relação do tamanho de grão com a dureza do metal-duro.	16
Figura 6 - Processo de Produção do metal-duro	17
Figura 7 - Microdureza de diferentes revestimentos superficiais.....	20
Figura 8 - Gráfico Desgaste versus tempo	21
Figura 9 - Classificação da norma ISO 3585 sobre os desgastes de ferramenta.....	22
Figura 10- Ação da velocidade de corte nos diferentes desgastes	23
Figura 11 - Formação da aresta postiça de corte através da adesão do material.	24
Figura 12 - Rugosidades Ra, Rz e Rzmáximo.....	27
Figura 13 - Sentido de corte no corpo de prova	30
Figura 14 - Informações da fresa GM-4RL-D6.0R0,5.	32
Figura 15 - Informações da fresa HM-4RF-D6.0R1.0	33
Figura 16 - Centro de usinagem DMG Deckel Maho DMC 835v	34
Figura 17 - Corpo de prova	34
Figura 18 - Desgaste da face de corte da ferramenta após realização do pré-teste. Ampliação 30x	36
Figura 19 - Desgaste do gume secundário da ferramenta após realização do pré-teste. Ampliação 30x.....	36
Figura 20 - Desgaste da ferramenta, visto do topo, após realização do pré-teste. Ampliação 10x.....	37
Figura 21 - Ferramenta HM-4RF-D6.0R1.0 após 20 minutos de corte e parâmetros utilizados.....	38
Figura 22 - Ferramenta GM-4RF-D6.0R0.5 após 20 minutos de corte e parâmetros utilizados.....	39
Figura 23 - Presença de cavaco na face de corte proveniente do processo.	40
Figura 24 - Ferramenta HM-4RF-D6.0R1.0 após 40 minutos de corte e parâmetros utilizados.....	41

Figura 25 - Ferramenta GM-4RF-D6.0R0.5 após 40 minutos de corte e parâmetros utilizados.....	42
Figura 26 - Ferramenta HM-4RF-D6.0R1.0 após 60 minutos de corte e parâmetros utilizados.....	43
Figura 27 - Ferramenta GM-4RF-D6.0R0.5 após 60 minutos de corte e parâmetros utilizados.....	44
Figura 28 - Gráfico de comparação entre desgastes medidos no preset das ferramentas	44
Figura 29 - Corpo de prova utilizado para os testes de rugosidade	45
Figura 30 - Ra máximo e mínimo medido para cada ferramenta.	46
Figura 31 - Rz máximo e mínimo medido para cada ferramenta.....	46
Figura 32 - Rzmáximo máximo e mínimo medido para cada ferramenta.	47
Figura 33 - Perfil de rugosidade da ferramenta GM-4RF-D6,0R0,5 nova.	48
Figura 34 - Perfil de rugosidade da ferramenta GM-4RF-D6,0R0,5 com 60 minutos de uso.	48
Figura 35 - Perfil de rugosidade da ferramenta HM-4RF-D6,0R1,0 nova.	49
Figura 36 - Perfil de rugosidade da ferramenta HM-4RF-D6,0R1,0 com 60 minutos de uso.	49
Figura 37 - Superfície usinada pela ferramenta GM-4RF-D6,0R0,5 nova.	50
Figura 38 - Superfície usinada pela ferramenta GM-4RF-D6,0R0,5 com 60 minutos de uso.	50
Figura 39 - Superfície usinada com a ferramenta HM-4RF-D6,0R1,0 nova.	51
Figura 40 - Superfície usinada com a ferramenta HM-4RF-D6,0R1,0 com 60 minutos de uso.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades de diferentes metais duros	16
Tabela 2 - Composição química e principais características do metal-duro segundo a norma ISO.....	18
Tabela 3 - Classificação AISI dos aços-ferramenta do grupo H	28
Tabela 4 - Composição química do aço AISI H13	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	5
1.1	JUSTIFICATIVA.....	7
1.2	OBJETIVOS.....	8
1.2.1	Objetivo Geral	8
1.2.2	Objetivos Específicos	8
2	REFERENCIAL TEÓRICO	9
2.1	PROCESSO DE FRESAMENTO.....	9
2.2	GRANDEZAS DO FRESAMENTO.....	12
2.3	MATERIAIS PARA FERRAMENTAS.....	13
2.3.1	Metal-duro	15
2.3.2	Revestimento	18
2.4	USINABILIDADE.....	20
2.4.1	Vida da ferramenta	21
2.4.2	Mecanismos de desgastes de ferramentas	22
2.4.2.1	Adesão.....	24
2.4.2.2	Abrasão mecânica.....	25
2.4.2.3	Difusão.....	25
2.4.2.4	Oxidação.....	25
2.4.3	Parâmetros de Rugosidade	26
2.4.4	Ensaio de usinabilidade	27
2.4.5	Aço AISI H13	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1	PROCEDIMENTOS.....	30
3.2	FERRAMENTAS.....	31
3.3	MAQUINÁRIO UTILIZADO.....	33
3.4	MATERIAL.....	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1	PRÉ-TESTE.....	35
4.2	TESTES PRINCIPAIS.....	37

4.2.1	Desgaste da ferramenta	37
4.2.2	Rugosidade.....	45
5	CONCLUSÕES	53
	REFERÊNCIAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

Os processos de usinagem estão presentes em quase tudo que é utilizado diariamente. Segundo Ferraresi (1970), os processos de usinagem são, junto com os processos de conformação mecânica, as duas grandes classes de trabalho e operações com metal. É possível definir usinagem como o processo de remoção de material da peça em forma de cavacos, conferindo a ela a forma, dimensão ou acabamento desejados.

Dentre os processos mais conhecidos estão os de torneamento, fresamento e furação. Esses processos utilizam-se das mais variadas ferramentas de corte, fresas e brocas, que são encontradas em inúmeros tamanhos, diâmetros, quantidade de gumes, geometrias, revestimentos e aplicações.

Tanio (2019) afirma que, segundo a Confederação Nacional da Indústria (CNI), em 2018, os custos industriais, que englobam os custos tributários, de capital de giro e de produção, subiram 8,8%. Puxado pelo aumento da energia e pelo aumento dos preços de bens intermediários, o custo industrial teve seu maior aumento desde o início da série, em 2006. Não obstante, o aumento de 8,8% nas despesas de produção interna, a desvalorização do Real em relação ao Dólar – moeda que regula os mercados internacionais – favoreceu as empresas brasileiras no curto prazo, pois encareceu os produtos manufaturados vindos do exterior em 22,5%. Entretanto, no médio e longo prazo, a perda de poder de compra da moeda brasileira acabará prejudicando a indústria nacional, pois haverá aumento de custo na compra de insumos e matérias-primas importadas necessárias para a produção.

Por outro lado, segundo Tanio (2019), citando dados da Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos (Abimaq), as indústrias brasileiras de bens de capital mecânico encerraram 2018 com um crescimento de receita de 7%, alavancado pelas exportações, que foram responsáveis por 47% do total de arrecadação destas empresas.

Os maiores responsáveis pelas exportações de bens de capital mecânico brasileiros são os Estados Unidos e a Europa, que compraram 46% do total dos itens deste setor que foram exportados, seguidos pela América Latina, responsável pela compra de mais de 37% do total das exportações. Para 2019, os analistas creem que, para o mercado crescer, será necessário o crescimento de vendas efetuadas para empresas brasileiras, uma vez

que, segundo a Abimaq, a previsão referente ao comportamento dos principais mercados do exterior que compram capitais mecânicos brasileiros, não é promissora.

Na América Latina, em geral, em 2018, as exportações - que representam 37,2% do total exportado do Brasil - caíram 8,6%. Considerando apenas o Mercosul, a queda foi de 18,2%. Esse decréscimo nas vendas ocorreu principalmente pela queda nas compras pelo mercado argentino, que ficaram 30% abaixo do registrado em 2017, onde há previsão de melhora na situação econômica apenas para 2020. No que concerne ao mercado europeu, o cenário preocupa ainda mais. A Itália, por exemplo, já é considerada tecnicamente um país em recessão, após ter sofrido um recuo de 0,1% e 0,2% no Produto Interno Bruto (PIB) no terceiro e quarto trimestres de 2018, respectivamente. A Alemanha, por sua vez, que registrava crescimento econômico de 2,2% e 1,5% em 2016 e 2017, respectivamente, prevê um crescimento de no máximo 1% em 2019.

Para tentar aumentar as vendas no mercado interno e não precisar diminuir a produção, os empresários irão investir 2,7 bilhões de reais em 2019, segundo estimativas do Departamento de Economia e Estatísticas da Abimaq. Esse valor representa uma alta de mais de 30% em relação aos investimentos do setor em 2018. No último ano esse setor apresentou uma relação de investimentos sobre receita líquida muito baixa, de 3%, ao passo que, entre 2010 e 2013, a média foi de 9,3%. Outro fator importante é a maior disposição das “micro e pequenas” e “médias” empresas, que esperam investir mais de 48,7% e 50,3% além do que estavam investindo, respectivamente.

Dentro dessa previsão de grandes investimentos das empresas brasileiras, em torno de 35% do total destes investimentos será destinado à modernização tecnológica e aprimoramento da produção.

Por essas razões, existe hoje, no setor industrial, uma busca crescente pelo aprimoramento dos processos, além de um esforço constante em realizá-lo de maneira que convirja com uma diminuição de gastos atrelados à produção. Em suma, procura-se aumentar a produtividade sem que isso acarrete um aumento de custos ao processo.

Klocke (2010) afirma que a busca pelo aprimoramento dos processos de usinagem é um fenômeno antigo, uma vez que, por exemplo, quanto maior for a velocidade de corte no processo, menor será o tempo de uso da máquina para a realização desse processo industrial.

Isso acaba se tornando um jogo de pesos-e-medidas. Aumentando a velocidade de corte, por exemplo, é obtida uma diminuição no tempo de usinagem e no tempo de uso da

máquina. Para isso, aumentam-se as exigências sobre as ferramentas de corte, resultando em uma menor vida útil das ferramentas utilizadas e conseqüentemente aumentado o custo total do trabalho.

Na indústria mecânica, um dos mais importantes custos do processo se refere à durabilidade das ferramentas metálicas utilizadas para a fabricação do produto. Esse custo de compra é diretamente influenciado pela qualidade da ferramenta, que varia conforme sua natureza e suas características: o material com o qual essa ferramenta foi produzida, seu tempo de vida útil, a quantidade de material que é removido por ela, se a ferramenta possui ou não um revestimento e se foi produzida através de um tratamento químico, por exemplo.

1.1 JUSTIFICATIVA

Conforme citado anteriormente, os custos produtivos para as empresas brasileiras desse setor aumentaram no último ano, obrigando-os a procurar maneiras de baratear suas manufaturas, a fim de não perderem competitividade e espaço no mercado.

Segundo Sandvik (2002), citado por Oliveira (2006), dentro dos custos relacionados à produção de matrizes e moldes, 65% correspondem à custos relacionados com a usinagem e apenas 20% dos custos está relacionado à matéria-prima (CARVALHO, 2015). Sá (2010) afirma também que, em países industrializados, 20% do preço final de um produto corresponde ao seu custo de usinagem.

Justifica-se então este trabalho, que busca através de uma revisão de conceitos - e a aplicação destes em uma análise de resultados de experiências práticas - encontrar uma alternativa capaz de aprimorar o processo técnica e economicamente. Para isso, foram avaliadas possíveis variações de ferramentas para corte em um processo específico dentro de uma empresa de acessórios para móveis, mais especificamente, no seu setor de matrizaria.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Comparar duas ferramentas produzidas com o mesmo material: metal-duro, porém de classes distintas, aplicadas na usinagem do aço AISI H13.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

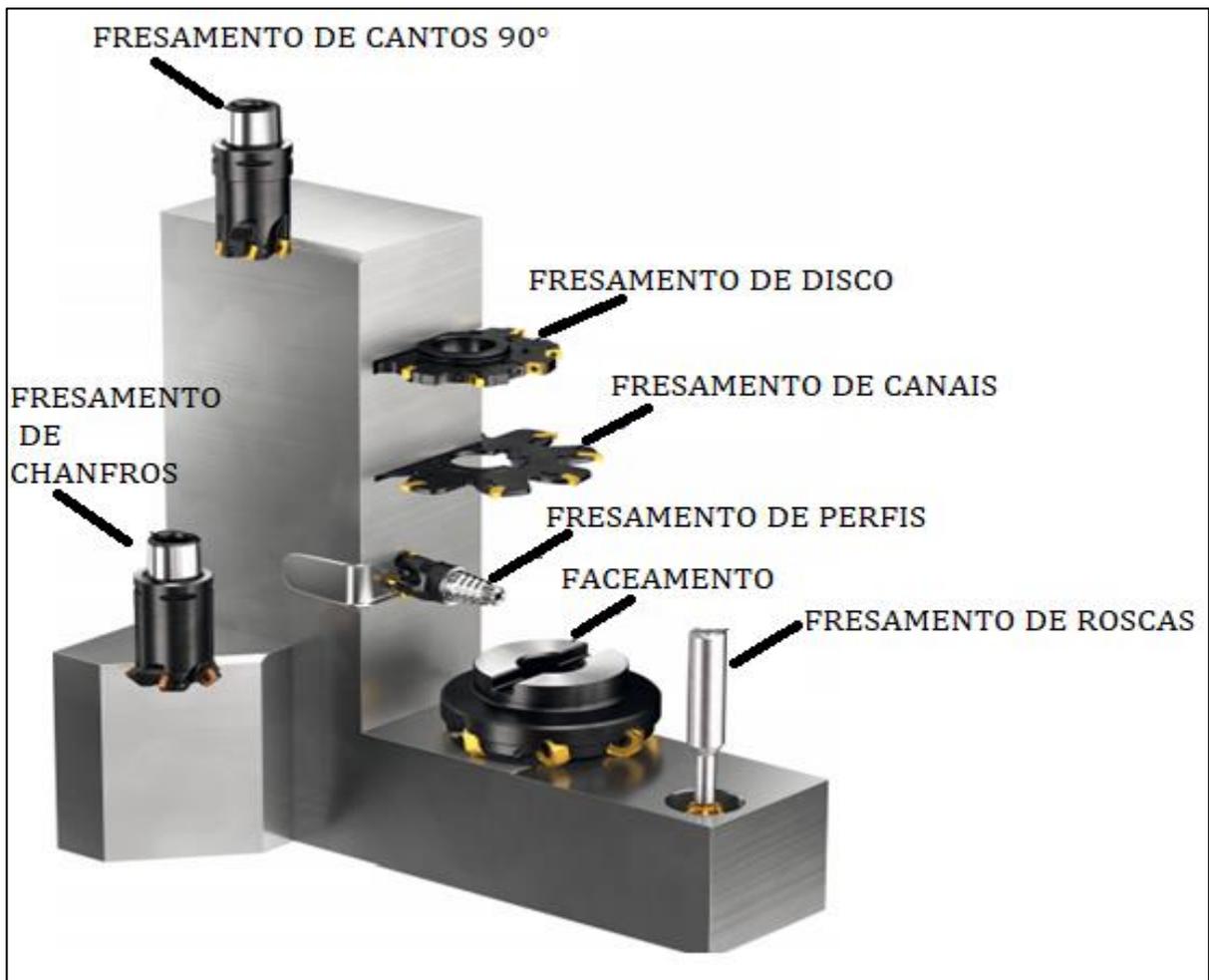
- a) Com base na revisão bibliográfica, realizar teste prático para que a comparação das ferramentas de metal-duro seja feita;
- b) Avaliar a qualidade superficial gerada no metal usinado pelas duas ferramentas de metal-duro;
- c) Avaliar os mecanismos de desgaste nas duas ferramentas de metal duro;
- d) Estabelecer uma análise e comparação dos resultados obtidos nos testes; e

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 PROCESSO DE FRESAMENTO

O processo de fresamento é um dos mais versáteis em relação às geometrias possíveis de serem geradas, segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2010). Os autores complementam que essa polivalência se deve ao fato de as fresas serem encontradas nas mais variadas formas. A escolha entre as ferramentas será feita a partir da relação entre profundidade, largura do corte e, principalmente, da máquina disponível. Algumas formas e geometrias, como superfícies não planas e de não revolução, podem ser obtidas apenas pelo fresamento (Figura 1).

Figura 1-Diferentes tipos de fresamento



Fonte: Adaptado de Sandvik (2017).

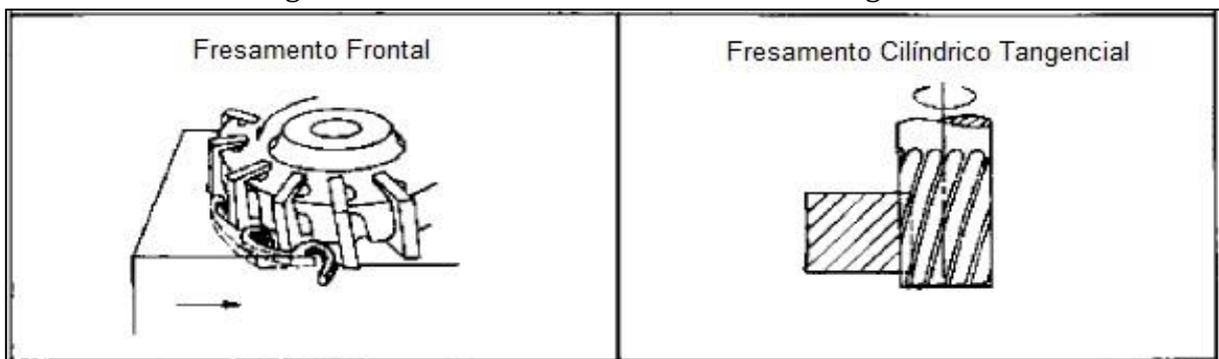
Segundo Klocke (2010), o processo de fresamento é um método produtivo de usinagem onde há um movimento circular de corte geralmente feito com uma ferramenta variável para obtenção de uma peça desejada. A direção de corte pode ser tanto perpendicular quanto transversal à direção de rotação do giro da ferramenta.

Ferraresi (1970) classifica o fresamento como um processo mecânico de usinagem para obtenção de superfícies quaisquer com a ajuda de ferramentas multicortantes. Diferente do torneamento, nesse processo, é a ferramenta que gira e a peça permanece imóvel. Segundo ele, é possível dividir o fresamento em dois tipos básicos: fresamento cilíndrico tangencial, ou apenas fresamento tangencial, e fresamento frontal.

Pela versatilidade, por permitir uma elevada produtividade e por possibilitar a obtenção de uma grande variedade de formas, o fresamento é o processo mais amplamente utilizado na produção de moldes. (SECCO, 2015).

Quando o eixo de rotação da ferramenta encontra-se posicionado perpendicularmente à superfície usinada ocorre o fresamento frontal. Já o fresamento tangencial ocorre quando o eixo de rotação da ferramenta está posicionado paralelamente à superfície de corte (Figura 2).

Figura 2- Fresamento frontal e cilíndrico tangencial



Fonte: Adaptado de Ferraresi (1970).

Esse processo divide-se ainda em:

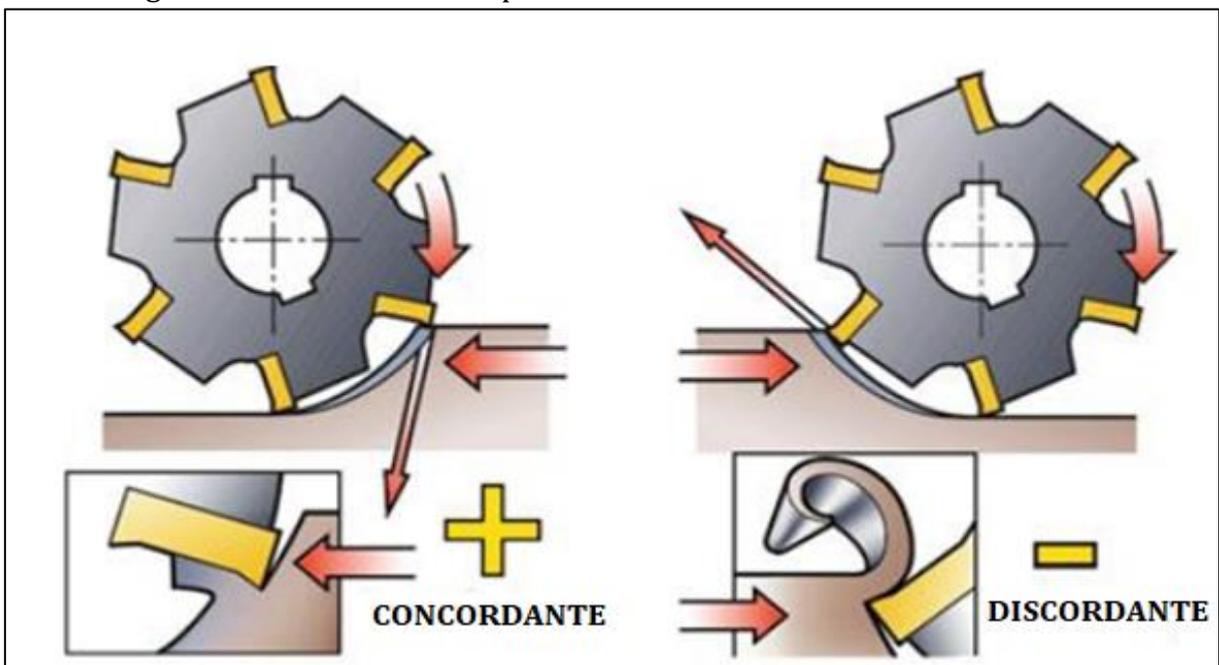
- a) Concordante; e
- b) Discordante.

No fresamento tangencial discordante evidencia-se que o sentido do avanço e o sentido da rotação são opostos. Nesse caso, o gume de corte da ferramenta é forçado a entrar na peça. Esse movimento gera um grande atrito entre a ferramenta e a superfície,

já que a superfície se encontra encruada devido à compressão do material pela ferramenta e, como consequência, obtêm-se uma menor vida dos gumes da ferramenta.

No fresamento tangencial concordante o sentido de avanço e de rotação do eixo são os mesmos, sendo assim, o cavaco começa a ser removido pela sua espessura máxima, assim como os esforços de corte, que também começarão em seu máximo e decairão até zero, no final do corte. Este fenômeno é muito prejudicial para a vida da ferramenta, já que, geralmente, a superfície do material usinado passou por algum tipo de endurecimento antes de passar pelos processos, como pode ser visto na figura 3, a seguir. (ARGENTA, 2015), (STEMMER, 1995).

Figura 3 - Sentidos de corte para fresamento concordante e discordante



Fonte: Mirres (2013).

O principal ponto negativo no fresamento é o fato de ser um processo de corte interrompido. Esse fenômeno acaba gerando ciclos térmicos e mecânicos, o que afeta a integridade da peça e o desgaste da ferramenta utilizada (SECCO, 2015). Segundo Stemmer (1995), citado em Nicola (2008), essa remoção intermitente é efetuada pela rotação da ferramenta em torno do seu eixo, promovendo o corte e remoção do material, com o movimento de avanço da máquina.

2.2 GRANDEZAS DO FRESAMENTO

Conforme Diniz, Marcondes e Coppini (2001), os mais importantes elementos que devem ser levados em consideração no processo de fresamento são:

- a) Velocidade de corte (v_c) [m/min];
- b) Velocidade de avanço (v_f) [mm/min];
- c) Avanço por dente, ou por gume (f_z) [mm];
- d) Profundidade ou largura de usinagem (a_p) [mm];
- e) Penetração de trabalho (a_e) [mm];
- f) Diâmetro da fresa (d) [mm]; e
- g) Número de dentes ou gumes (z).

A velocidade de corte v_c é o valor instantâneo de velocidade resultante da rotação da ferramenta em torno da peça. É calculada pela equação abaixo:

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

Onde: v_c é a velocidade de corte [m/min], d é o diâmetro da fresa [mm], e n é a rotação da máquina [rpm].

A velocidade de avanço v_f , segundo Stemmer (1995), citado por Nicola (2008), se trata do avanço da ferramenta em relação à peça em função do número de gumes e o avanço por gume. Pode ser calculada pela equação:

$$v_f = z \cdot f_z \cdot n \quad (2)$$

Onde: v_f é a velocidade de avanço [mm/min], z é o número de dentes/gumes da ferramenta, f_z é o avanço por dente/gume da ferramenta [mm], e n é a rotação da máquina [rpm].

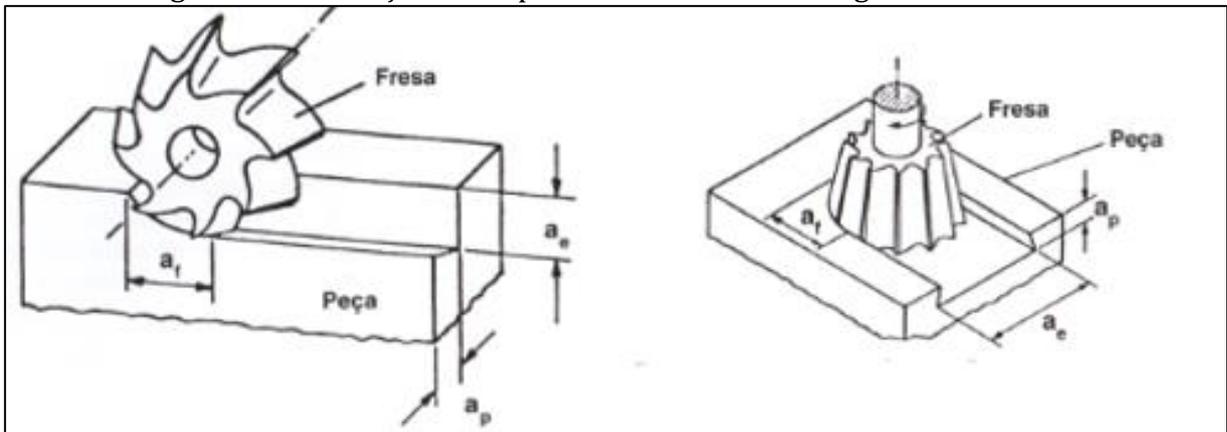
De acordo com Nicola (2008), citando Stemmer (1995), o avanço por gume ou dente f_z é a distância linear percorrida pelo gume durante o processo de corte em relação ao avanço da ferramenta. É calculado a partir da equação abaixo:

$$f_z = \frac{f}{z} \quad (3)$$

Sendo que f_z é o avanço por gume [mm], f é o avanço [mm], e z é o número de gumes.

A profundidade ou largura de usinagem a_p é definida por Diniz, Marcondes e Coppini (2001) como a penetração da ferramenta na superfície do material medida perpendicularmente ao plano de trabalho. Já a penetração de trabalho a_e é a penetração da ferramenta na superfície da peça, porém diferentemente da profundidade de usinagem a_p , é medida perpendicularmente ao avanço da ferramenta. As diferenças entre essas duas grandezas, a_p e a_e , podem ser observadas na Figura 4, a seguir:

Figura 4 - Diferença entre a_p e a_e no fresamento tangencial e frontal



Fonte: Adaptado de Diniz, Marcondes e Coppini (2001).

2.3 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS

O fenômeno do corte durante a usinagem ocorre com o uso de uma ferramenta que, obrigatoriamente, deve ser mais dura que o material a ser cortado. O maior desafio no desenvolvimento de uma ferramenta é achar um balanço entre dureza e tenacidade, propriedades essas que dificilmente serão encontradas em um mesmo material (AMORIM, 2002).

Entretanto, o desenvolvimento do setor de materiais de ferramentas de corte está longe de estar finalizado. Os pesquisadores dessa área estão constantemente em busca de melhorias para os materiais de ferramentas já atualmente consagrados no mercado e até mesmo na produção de novos compostos para ferramentas. Esses materiais tem uma influência direta nos tempos e custos relacionados à usinagem (KLOCKE, 2010).

Stemmer (2001) afirma que todos os materiais utilizados na confecção de ferramentas para corte devem obedecer a algumas exigências mínimas: ter uma dureza elevada quando comparada à dureza do metal que vai ser usinado, ser tenaz o suficiente para que a ferramenta resista ao processo e a todas as adversidades intrínsecas a ele (impacto e atrito, por exemplo), estar quimicamente estável e, por último, ser facilmente encontrado e ser economicamente viável para a empresa. Stemmer complementa que nenhum material, sintético ou disponível na natureza, apresenta em grande escala todos os atributos necessários. Os materiais sempre irão apresentar ótimas características em alguns aspectos, porém podem ser deficitários em outras propriedades.

Pelo fato de não existir uma classificação padronizada internacional das composições químicas dos materiais, os autores Diniz, Marcondes e Coppini (2003) classificam os materiais da seguinte maneira:

- a) Aços-rápidos, com ou sem cobertura;
- b) Metal-duro, com ou sem cobertura;
- c) Materiais cerâmicos;
- d) Nitreto de Boro Cúbico, (CBN); e
- e) Diamante.

Em uma comparação entre dois materiais muito utilizados - aço rápido e ligas cerâmicas - é perceptível que cada um deles possui uma aplicação distinta. O aço rápido, por exemplo, é o material mais tenaz entre os dois, entretanto é o que apresenta menor dureza. Por outro lado, as ligas cerâmicas são as mais duras, mas sua fragilidade é tamanha que exige que o processo seja feito em condições especiais para que se consiga o melhor aproveitamento da ferramenta (FERRARESI, 1970).

Diniz, Coppini e Marcondes (2001) demonstram que, para que haja uma seleção correta do material da ferramenta, vários tópicos devem ser levados em consideração, como:

- a) A liga/material que será usinado;
- b) Qual o processo de usinagem em que a ferramenta será empregada;
- c) Condições da máquina em que a ferramenta será utilizada;
- d) As formas e dimensões da ferramenta;
- e) O custo do material da ferramenta;
- f) Os parâmetros de usinagem, e
- g) As condições de operação.

É sempre necessário buscar um equilíbrio entre as propriedades das ferramentas a serem utilizadas. Sabe-se que estas se sobressaem em alguns aspectos, mas são inferiores em outros. Essa escolha influenciará na escolha da máquina, no tempo de fabricação e no custo do processo, como, por exemplo, o CBN, notavelmente mais caro que cerâmica e metal duro, entre outros (XAVIER, 2003).

2.3.1 Metal-duro

Na segunda década do século XX, na Alemanha, H. Voigtlander e H. Lohmann requereram a patente de um novo material para ferramentas e moldes produzidos através da metalurgia do pó. Esse material consistia em uma liga formada por carbonetos de Molibdênio e Tungstênio. Surgiram, então, os metais duros.

Essa descoberta provocou uma revolução nos métodos de usinagem até então conhecidos e utilizados. Com o tempo, novas pesquisas foram feitas baseadas na patente existente para que, cada vez mais, fossem obtidas melhorias no material a fim de aumentar a sua aplicabilidade e resistência à usinagem (FERRARESI, 1970).

Metal-duro é um material amplamente utilizado na usinagem devido à sua alta resistência ao desgaste, alta dureza e melhor tenacidade quando comparado a outros materiais frequentemente utilizados para confecção de ferramentas (XIAO et al., 2009).

Por apresentar elevada dureza, tenacidade à fratura relativamente alta e grande resistência ao desgaste, o metal-duro é altamente utilizado para a confecção de ferramentas de corte industriais, onde é necessária uma grande resistência ao desgaste. Os compósitos de metal-duro contribuem também para a diminuição do custo e aumento da vida útil das ferramentas (TORRES, 2009).

Destaca-se sua grande utilização em processos de usinagem que envolvem elevadas velocidades de corte onde a taxa de desgaste da ferramenta, devido às altas temperaturas que ocorrem durante o processo, tendem a ser maiores (BALZARETTI et al., 2007).

Atualmente, segundo Sandvik (2019), 80% dos metais duros apresentam em sua composição carboneto de Tungstênio (WC) e ligantes, que podem ser: Cobalto, que é o mais comum, Níquel e Ferro. Segundo Torres (2009), as quantidades dos ligantes na mistura serão diretamente proporcionais às características finais do metal-duro, sendo

que, quanto mais agentes de liga forem utilizados, menor será a dureza da ferramenta e, conseqüentemente, menor será a sua resistência à quebra (Tabela 1).

Tabela 1 - Propriedades de diferentes materiais de metal-duro.

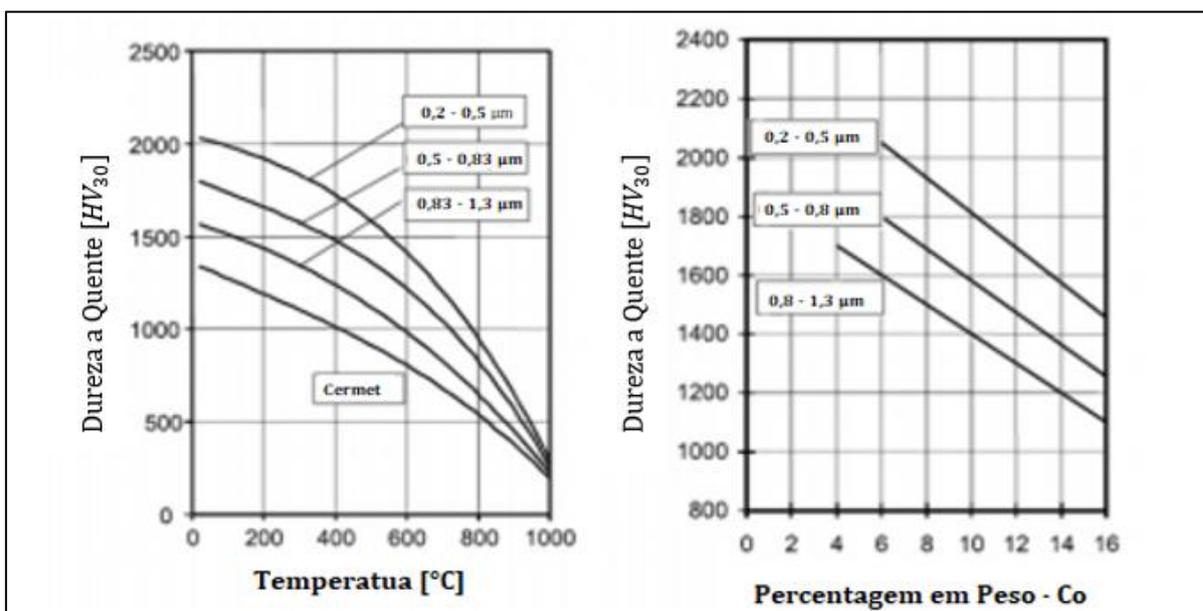
Composição	Dureza HV	Resistência à Compressão (Mpa)	Resistência à Tração (Mpa)	Densidade (g/cm ³)
WC-3Co	1900	7100	1600	15,25
WC-10Co	1625	6000	2280	14,50
WC-20Co	1050	3100	2850	13,55

Fonte: adaptado de Torres (2009).

Um importante aspecto do metal-duro é o tamanho dos grãos de WC. Esses grãos de WC conferem ao material uma elevada dureza e resistência ao desgaste, enquanto o Cobalto ligante aumenta a tenacidade da ferramenta (TORRES, 2009).

Gilles, et al. (2002) mostra que o tamanho do grão do Carboneto de Tungstênio tem uma grande importância na dureza do material, sendo que, quanto menor for o tamanho do grão e a porcentagem de aglomerantes presentes no metal-duro, mais alta será a sua dureza (Figura 5).

Figura 5 - Relação do tamanho de grão com a dureza do metal-duro.



Fonte - Boing apud Gille, et al. (2002).

O processo de produção do metal duro (Figura 6) consiste na mistura do carboneto de Tungstênio com o agente ligante à base de Cobalto. Essa mistura é prensada e após coloca-se o produto em um forno de sinterização, promovendo a fundição dos materiais, à 1400°C, resultando no metal duro (MITSUBISHI, 2019).

Figura 6 - Processo de Produção do metal-duro



Fonte: Mitsubishi (2019).

Existem muitas classes de metal-duro. Essas classes diferem-se entre si pelas quantidades de ligantes que possuem na sua composição, e, como visto anteriormente, esses ligantes tem um papel diretamente relacionado com as características finais do metal e, conseqüentemente, em que tipo de aplicação o material será utilizado.

Os metais duros que possuem maior concentração de Cobalto, por exemplo, devido ao seu alto ponto de fusão, 1495°C, e pela sua relação com a tenacidade do material, são mais apropriados em aplicações que envolvem impacto e altas temperaturas, como matrizes para forjamento de ligas metálicas (CAMERINI, 2008).

As diferentes classes de metal-duro, suas características e composições químicas podem ser observadas na tabela a seguir (Tabela 2):

Tabela 2 - Composição química e principais características do metal-duro segundo a norma ISO.

Designação	Composição (%)			Principais Características				
	WC	Tic + TaC	Co	Densidade (g/cm ³)	Dureza Vickers (Kg/mm ²)	Módulo de Elasticidade (Kg/mm ²)	Resistência à Ruptura Transversal (Kg/mm ²)	Coefficiente de Dilatação Térmica (10 ⁻⁶ l/°C)
P01	30	64	6	7.2	1800	-	75	-
P10	55	36	9	10.4	1600	52000	140	6.5
P20	76	14	10	11.9	1500	54000	150	6
P25	73	19	8	12.5	1500	55000	170	6
P30	82	8	10	13	1450	56000	170	5.5
P40	77	12	11	13.1	1400	56000	180	5.5
P50	70	14	16	12.9	1300	52000	200	5.5
M10	84	10	6	13.1	1650	58000	140	5.5
M20	82	10	8	13.4	1550	56000	160	5.5
M30	81	10	9	14.4	1450	58000	180	5.5
M40	78	7	15	13.5	1300	55000	200	5.5
K01	93	2	5	15	1750	63000	120	5
K05	92	2	6	14.6	1700	63000	135	5
K10	92	2	6	14.8	1650	63000	150	5
K20	91.5	2.5	6	14.8	1550	62000	170	5
K30	89	2	9	14.5	1450	-	190	5.5
K40	88	-	12	14.3	1300	58000	210	5.5

Fonte: Adaptado de Ferraresi (1969).

2.3.2 Revestimento

De acordo com Klocke (2010), os tratamentos superficiais aos quais as ferramentas são submetidas servem para aprimorar ainda mais as suas características ou aprimorar aspectos nos quais elas se apresentam menos eficientes. Os maiores impactos causados pela adição de revestimento são percebidos na redução do desgaste da ferramenta e no atrito do corte, no aumento da vida útil e na possibilidade da realização de cortes à seco (SÁ, 2010).

O modo mais efetivo de se obter melhorias físicas e mecânicas significativas nas ferramentas para corte é através da deposição de revestimentos em suas superfícies de trabalho com o intuito de modificá-las. As coberturas superficiais das ferramentas se

manifestam de duas maneiras, simultaneamente: melhorando as características mecânicas do material e reduzindo os efeitos termomecânicos que ocorrem durante o corte. (VERESHCHAKA *et al.*, 2016).

Ferramentas de metal duro suportam, durante o processo de usinagem, velocidades de até 100 m/min, entretanto, em velocidades muito altas, existe um grande desgaste devido ao seu aquecimento. Para que seja possível empregar maiores velocidades de corte na ferramenta, sem que haja prejuízo de desempenho, é necessário que a mesma possua um revestimento superficial, desde que a adesão entre a camada superficial e o substrato seja suficiente para que esse conjunto seja consistente (ROBINSON, JACKSON E WHITFIELD, 2007).

Vereshchaka *et al* (2016) ainda complementa afirmando que atualmente muitos estudos estão sendo feitos para otimizar cada vez mais as ferramentas e suas coberturas, tendo como finalidade a redução progressiva no uso de fluidos de corte.

Os principais métodos de deposição de revestimento sobre a ferramenta são os mecanismos PVD – *physical vapor deposition* – deposição de vapor física, e CVD – *chemical vapor deposition* – deposição de vapor química.

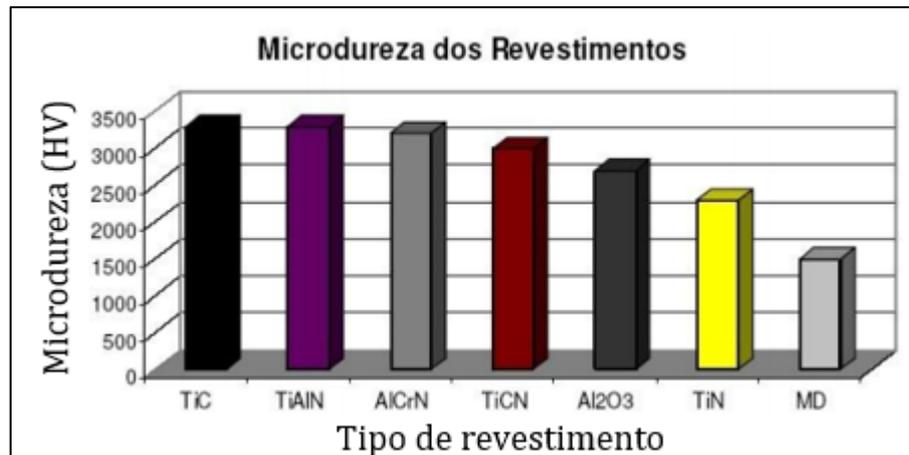
No processo PVD a deposição do vapor se dá através do aquecimento da ferramenta no vácuo em temperaturas até 500°C em câmaras especiais. O revestimento é vaporizado no interior dessa câmara juntamente com um gás reativo que, misturados, geram um composto altamente aderente que se deposita nas ferramentas (SÁ, 2010).

O processo CVD, por sua vez, consiste no aquecimento do substrato em um reator a temperaturas superiores a 1000°C e alimentado através de gases, que, como produto das reações, formam um material sólido que condensa sobre as superfícies (SÁ, 2010).

Apesar de muito semelhantes, os processos são utilizados, nas plantas industriais mais modernas, de maneira concomitante. Dessa forma, busca-se potencializar as vantagens e diminuir as desvantagens que cada um dos processos traz consigo (SÁ, 2010).

Sá (2010) destaca alguns revestimentos como o carboneto de titânio (TiC), carbonitreto de titânio ($TiCN$) e óxido de alumínio (AlO_3). Cada um deles possui vantagens e demonstram aspectos superiores aos outros não só na microdureza, mas também na menor tendência de soldagem do material com o cavaco, dificultando a adesão, faixa de temperatura de trabalho e coeficiente de dilatação térmica. Na imagem a seguir (Figura 7) podemos evidenciar as diferenças de microdurezas entre os diferentes tipos de revestimento.

Figura 7 - Microdureza de diferentes revestimentos superficiais.



Fonte: Adaptado de Sá (2010).

2.4 USINABILIDADE

Os critérios mais utilizados para fins de análise de usinabilidade são:

- a) Vida da ferramenta;
- b) Acabamento;
- c) Formação de cavaco; e
- d) Forças de usinagem. (DINIZ, MARCONDES E COPINI, 2001)

Stemmer (2001) define a usinabilidade dos materiais como a propriedade destes de se deixarem trabalhar sob a atuação das ferramentas de corte. Em outras palavras, a usinabilidade é o comportamento dos materiais durante o processo de usinagem em que são empregados. Ferraresi (1970) aponta ainda que a usinabilidade não é uma propriedade singular, mas sim uma resultante da combinação *material-peça usinada*, e que essa combinação tem influência direta no custo de fabricação da peça.

Usinabilidade também pode ser considerada o aspecto que abrange todas as propriedades de um material que afetarão o processo de usinagem. A usinabilidade de um material sempre deverá ser observada dentro de um contexto de fabricação. (SCHROETER, 2002).

Para estabelecer o grau de usinabilidade de um material alguns conceitos devem ser levados em consideração. Alguns dos mais importantes são: qualidade superficial e grandezas de corte, como força e potência, e vida útil da ferramenta (MARIN, 2016).

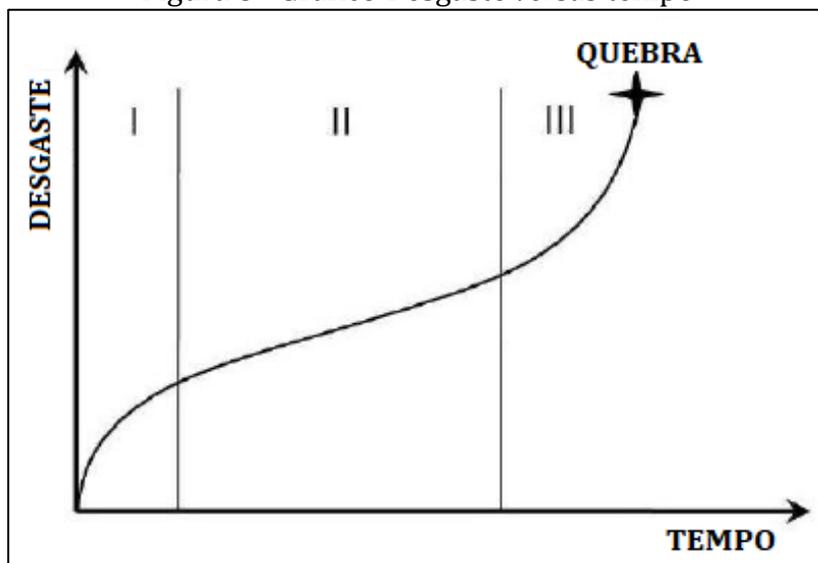
Klocke (2001) afirma que o parâmetro mais significativo na caracterização da usinabilidade é a vida útil da ferramenta.

Esses conceitos são importantes por exercerem grande influência sobre grandezas mensuráveis que estão intrínsecas ao processo. Desse modo, a usinabilidade, diferente de características como a resistência à tração, não é uma grandeza específica de cada material. (FERRARESI, 1970).

2.4.1 Vida da ferramenta

Diniz, Marcondes e Coppini (2001) caracterizam o desgaste de ferramenta como uma perda de nível microscópico, mas contínua devido à ação do corte. Pela sua relação com a qualidade da superfície usinada, o desgaste é considerado um problema crítico na usinagem (MAIA DE SÁ, 2010). Esse desgaste contínuo, até seu colapso, em função do tempo, é demonstrado através da imagem abaixo (Figura 8).

Figura 8 - Gráfico Desgaste *versus* tempo



Fonte: Adaptado de Maia de Sá (2010).

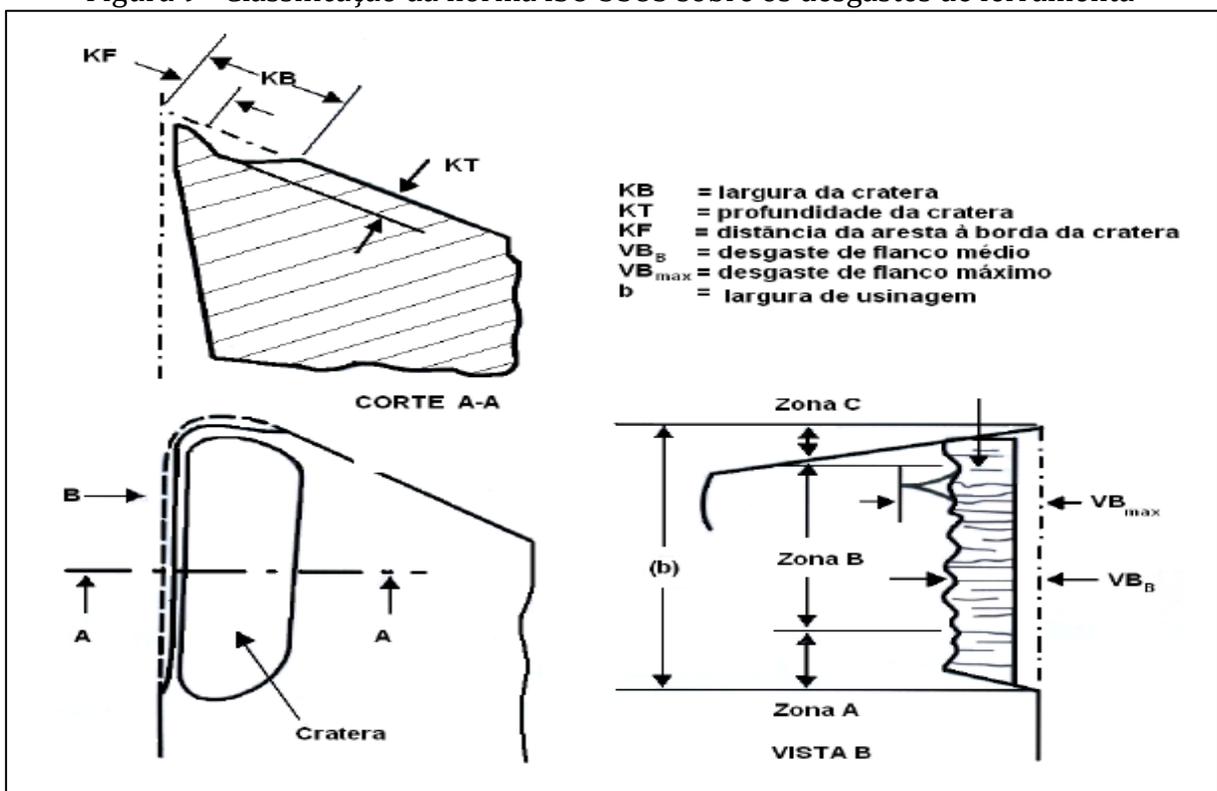
Os desgastes podem ser avaliados por meio de diferentes métodos visuais. Métodos diretos contam com o auxílio de lupa ou microscópio, e nos métodos indiretos, são levados em consideração valores medidos, como o aumento da vibração, aumento de ruídos e aumento das forças de usinagem. (MAIA DE SÁ, 2010).

Independentemente da resistência ao desgaste da ferramenta e das propriedades mecânicas presentes no material a ser cortado, a ferramenta sofrerá um desgaste que,

cedo ou tarde, exigirá que ela seja trocada. A necessidade de parar a máquina para efetuar a troca de ferramenta representa perda de produtividade e aumento de custos adicionais. (MACHADO *et al*, 2011).

Maia de Sá (2010) citando a norma ISO 3585-1993, afirma que são considerados critérios de vida de ferramentas, independente dos seus substratos, os seguintes parâmetros: $V_b = 0,3\text{mm}$ e $V_{\text{máximo}} = 0,6\text{ mm}$. A imagem abaixo (Figura 9) mostra a classificação dos desgastes segundo a norma acima citada.

Figura 9 - Classificação da norma ISO 3585 sobre os desgastes de ferramenta



Fonte: Maia de Sá (2010) *apud* Norma ISO 3585.

2.4.2 Mecanismos de desgastes de ferramentas

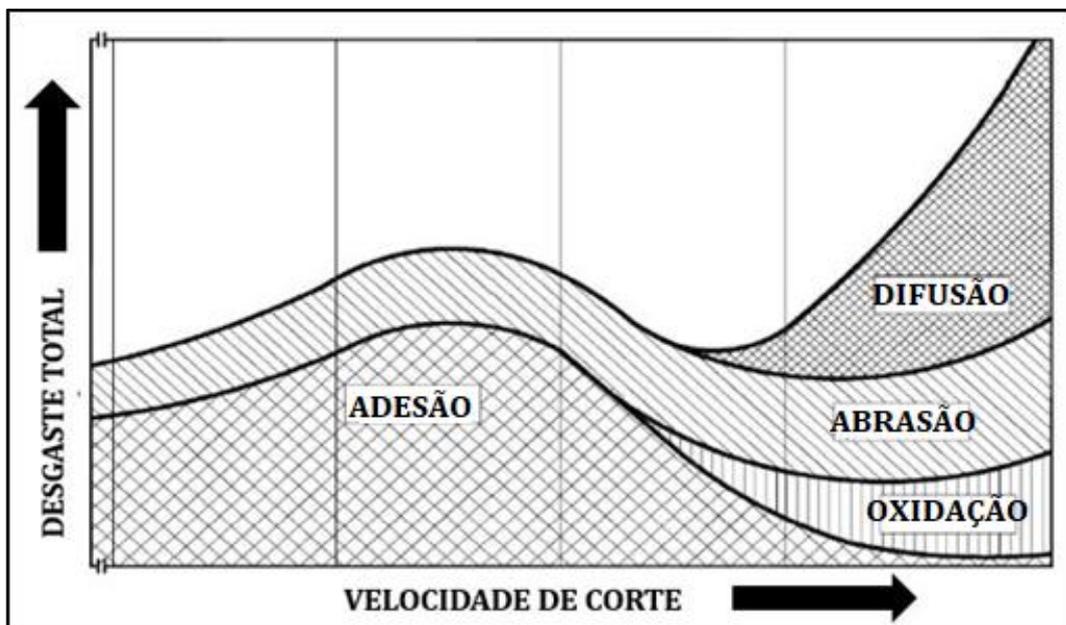
Stemmer (2001) afirma que as falhas nas ferramentas se manifestam de três maneiras: lascamento, desgaste de flanco e desgaste da face. O lascamento é a quebra do gume de corte em pedaços, resultando em superfícies acidentadas. O desgaste de flanco, que é causado pelo contato entre a ferramenta e a peça, é visível na superfície de incidência por meio de marcas de desgaste. O desgaste de face, que é causado pelo atrito entre os cavacos e a ferramenta, é notado na superfície de saída na forma de crateras.

Para Diniz, Marcondes e Coppini (2003), os principais fenômenos causadores de desgastes nas ferramentas são:

- a) Gume postiço de corte;
- b) Abrasão mecânica;
- c) Difusão; e
- d) Oxidação.

Todos esses tipos de desgastes tem um fator em comum: a velocidade de corte (Figura 10).

Figura 10- Ação da velocidade de corte nos diferentes desgastes



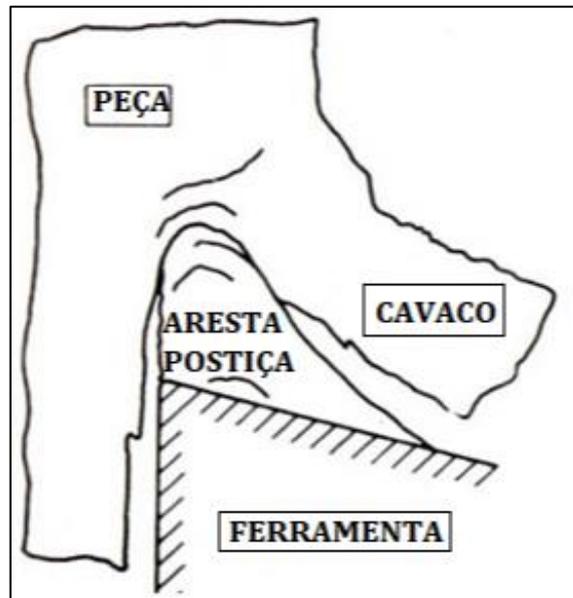
Fonte: Adaptado de Marin (2016).

Essas falhas são totalmente indesejáveis, entretanto ainda não há um material que resista plenamente a uma aplicação tão intensa quanto um processo de usinagem. Levando-se em consideração que durante a realização do processo a ferramenta passa por longos períodos de incidência sobre o material, inclusive em um cenário de altas temperaturas e pressões, são esperadas deformações na forma e no contorno das ferramentas.

2.4.2.1 Adesão

Devido à combinação de altas temperaturas e pressões e por se tornarem quimicamente muito ativas, partículas do material mantêm contato por um tempo suficiente para que elas se soldem à ferramenta e permaneçam presas. Com o andamento do processo esse material sofre deformação a frio - encruamento - e ganha resistência e dureza, gerando assim uma nova aresta de corte anexa na superfície da ferramenta, como pode ser visto na figura a seguir (STEMMER, 2001) (Figura 11):

Figura 11 - Formação da aresta postiça de corte através da adesão do material.



Fonte: adaptado de Diniz, Marcondes e Coppini (2003).

O gume postiço vai dificultando o deslizamento do cavaco, aumentando o seu coeficiente de atrito com a face. Esse fenômeno faz com que as forças de deslizamento aumentem a ponto de arrancar as partículas soldadas. A separação do gume postiço da ferramenta causa desgaste abrasivo no flanco e na face da ferramenta. (STEMMER, 2001).

Esse tipo de desgaste é muito prejudicial no acabamento superficial da peça, uma vez que o gume de corte está irregular e desgastado, e na diminuição da força de corte, pois o ângulo de saída aumenta. (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2003).

2.4.2.2 Abrasão mecânica

A abrasão é a forma de desgaste mais comum das ferramentas. Ela ocorre devido à retirada de finas partículas de material em virtude do atrito gerado entre a face da ferramenta e a peça. Esse desgaste está diretamente relacionado à quantidade de inclusões duras no aço. A abrasão pode gerar tanto o desgaste de flanco quanto o desgaste de face. (STEMMER, 2001), (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2003).

Segundo Stemmer (2001), a resistência à abrasão depende apenas da dureza do material da ferramenta e o aumento da velocidade de corte do processo resultará na queda da sua resistência à abrasão devido ao desgaste mais acelerado.

2.4.2.3 Difusão

Dependente basicamente da temperatura na zona de corte, do tempo de contato e da afinidade entre os metais, a difusão entre a ferramenta e o cavaco é um fenômeno microscópico. Trata-se basicamente da transição de átomos entre os metais envolvidos quando estes ganham mobilidade.

A transferência de átomos de ferro provenientes do aço para a ferramenta faz com que seja perdido o equilíbrio químico dela resultando em reações que formam carbonetos complexos. Esses carbonetos são pouco resistentes e facilmente removidos por abrasão.

Na superfície de saída da ferramenta é onde encontramos as situações ideais para a ocorrência da difusão, que são as altas temperaturas geradas pela velocidade de corte e é onde há o contato cavaco-ferramenta. A difusão não ocorre em ferramentas de aço-rápido, onde a temperatura não é alta o suficiente, nem em ferramentas cerâmicas, onde o material não possui afinidade com o aço. (STEMMER, 2001), (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2003).

2.4.2.4 Oxidação

Diniz, Marcondes e Coppini (2003) afirmam que a presença de água nos fluidos refrigerantes mais o ar ambiente e as altas temperaturas dos cavacos causam a oxidação na maioria dos metais. Esse desgaste, no âmbito da usinagem, é mais perceptível nas extremidades da superfície de saída das ferramentas de corte. Isso se deve por se tratar

do local onde o ar tem acesso mais facilitado e há uma quantidade mais abundante de fluido.

2.4.3 Parâmetros de Rugosidade

Devido à ação de ferramentas de corte na retirada de material, a superfície da peça é modificada em sua região superficial. Através de um processo de fabricação podem ocorrer alterações na superfície ou em uma camada subsuperficial da ordem de grandeza de micrometros. Uma superfície, por mais bem-acabada, sempre apresenta irregularidades. (FIELD, KHALES E CAMMET, 1972).

Um fator que também tem influência na rugosidade da peça é a rigidez do sistema. As frequências naturais geradas durante um processo de usinagem estão diretamente relacionadas com o comprimento da ferramenta utilizada. O sistema apresentará frequências naturais menores, ou seja, o sistema será mais rígido, conforme menor for o comprimento livre da ferramenta nele utilizada (VIEIRA E ALMEIDA, 2006). Isso explica também o coeficiente de esbeltez, que é a divisão do comprimento em balanço da ferramenta pelo seu diâmetro. Quanto maior for esse coeficiente maior será a vibração e menor será a estabilidade do sistema

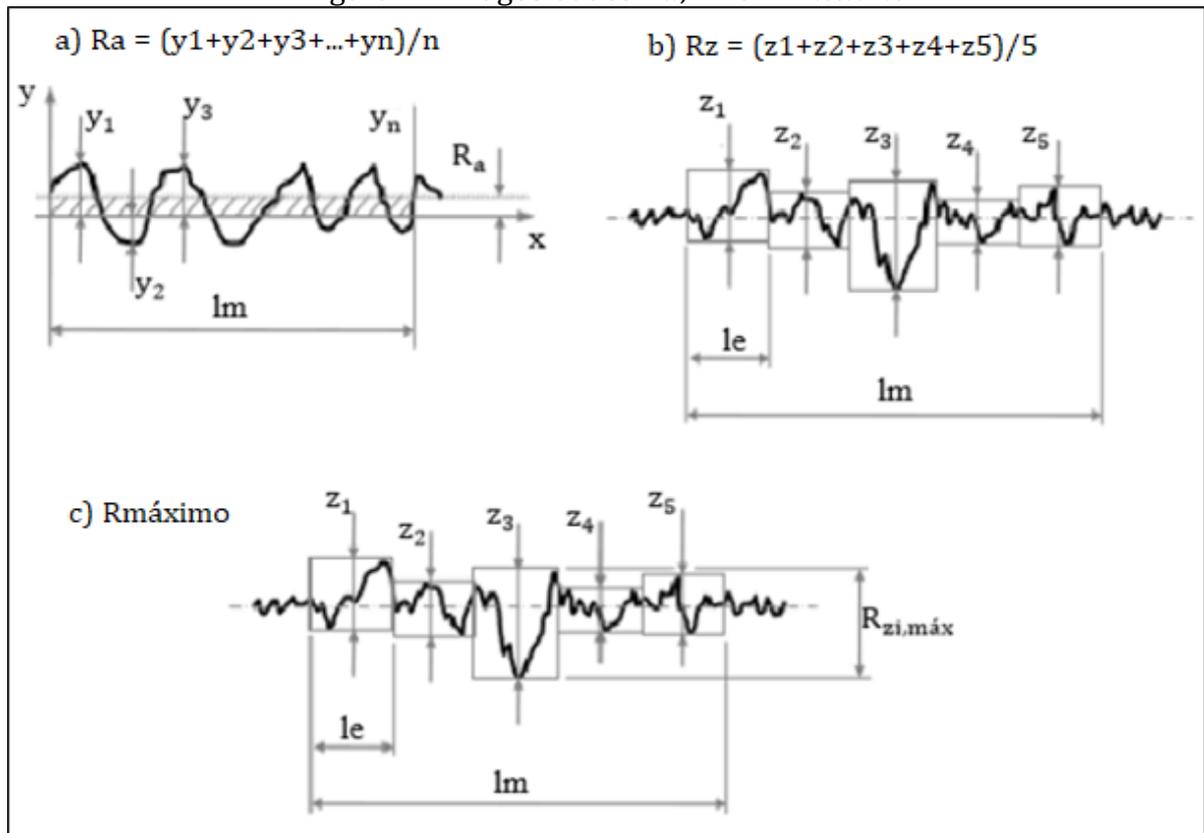
Para que o processo seja feito adequadamente é necessária a atribuição de parâmetros de acabamento, assim pode-se definir como deverá ser feita a usinagem. A verificação da rugosidade da superfície usinada é feita através da utilização de um rugosímetro.

A rugosidade R_a é a rugosidade média aritmética entre os valores absolutos medidos pelo aparelho em relação a uma linha média dentro do comprimento de medição.

A rugosidade R_z é a rugosidade média aritmética dos valores absolutos dos pontos de maior distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo dentro de um comprimento *cut-off* definido.

A Rugosidade $R_{z\text{máximo}}$ é um valor único que representa a distância vertical entre o maior pico e o vale mais profundo dentro do comprimento analisado. (SÁ, 2010).

As medidas citadas são exemplificadas a seguir (Figura 12):

Figura 12 - Rugosidades R_a , R_z e $R_{z\text{máximo}}$ 

Fonte: Adaptado de Schwaizer (2018).

2.4.4 Ensaios de usinabilidade

Independentemente de vários métodos serem propostos para a medição da usinabilidade, o que é mais aceito é o ensaio de longa duração, onde se leva em conta a vida da ferramenta. Essa metodologia consiste na utilização da ferramenta até que seja alcançado o fim do seu emprego ou até um determinado desgaste.

São chamados ensaios de curta duração os ensaios em que a usinagem é feita sob condições e parâmetros forçados a fim de que essa análise termine rapidamente. Um teste de rugosidade, por exemplo, é um ensaio de curta duração, uma vez que são necessárias apenas algumas passadas da ferramenta no material para que se obtenha uma condição viável para a medição e aferição dos resultados. (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2003).

2.4.5 Aço AISI H13

A normatização da AISI, *American Iron and Steel Institute*, é a mais utilizada para classificação de aços ferramenta pelo mundo. Os aços da família H são classificados pela AISI como aços para trabalho a quente, sendo o prefixo a letra H, derivado de *Hot Working*. (GABARDO, 2008).

Muito utilizado para matrizes de fundição sob pressão de ligas de alumínio e para moldes de injeção, o aço AISI H13 é uma liga muito utilizada no meio industrial, já que apresenta ótimas características quando utilizada em trabalhos a quente. Suas principais características são:

- a) Alta resistência à fadiga térmica;
- b) Excelentes propriedades mecânicas;
- c) Boa tenacidade, polibibilidade e usinabilidade;
- d) Boa estabilidade dimensional durante tratamentos térmicos; e
- e) Pouca sensibilidade a choques térmicos e boa resistência ao desgaste.

A norma AISI para aços ferramenta separa os aços do grupo H em 3 tipos, diferenciando-os pelos seus ligantes (Tabela 3). Entre todos os metais do grupo H, os mais utilizados são os aços H11, H12 e H13, que são os ligados ao Cromo. (SILVA, 2006).

Tabela 3 - Classificação AISI dos aços-ferramenta do grupo H

TIPOS DE AÇO FERRAMENTA		SÍMBOLO
Aços para trabalho a quente <i>(Hot Working)</i>	Ao Cromo	H1-H19
	Ao Tungstênio	H20-H39
	Ao Molibdênio	H40-H59

Fonte: Adaptado de Gabardo (2008) *apud* Silva e Mei (2006).

O aço AISIH13 é recebido na indústria no seu estado normalizado apresentando uma dureza em torno de 16 HRc. Nesse estado, o material apresenta uma boa condição de usinabilidade. Normalmente esse aço passa por um tratamento térmico, conhecido como têmpera, para aprimorar as suas propriedades mecânicas.

A têmpera busca, através do aquecimento homogêneo do bloco em uma temperatura acima da linha crítica e resfriamento em meio líquido, água ou óleo

normalmente, uma melhora nas propriedades mecânicas do material, devido ao aumento de sua dureza, pela formação de uma estrutura martensítica. (NICOLA, 2008).

A composição química desse material mostra que se trata de um aço-carbono de média ou alta liga com baixo teor de Carbono. É ainda composto por alguns elementos químicos como Si, Mg, Cr, Mo e V, seguindo as seguintes especificações de quantidades (Tabela 4):

Tabela 4 - Composição química do aço AISI H13

Elemento Químico	Carbono (C)	Silício (Si)	Manganês (Mg)	Cromo (Cr)	Molibdênio (Mo)	Vanádio (V)
Quantidade (%)	0,40	1,00	0,35	5,20	1,50	0,90

Fonte: Villares Metals (2006).

Com o objetivo de aumentar sua resistência, esse material passa por tratamentos térmicos como a têmpera. No entanto, o fato desse material ser uma liga que apresenta certa quantidade de elementos formadores do metal duro, como o Cromo, Molibdênio e o Tungstênio, faz com que esse metal tenha uma usinagem mais difícil. É possível dizer que quanto maior é a dureza proveniente de tratamento térmico, pior será sua usinabilidade. (DEMIR, GÜNDÜZ E ERDEN, 2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PROCEDIMENTOS

Os testes foram reproduzidos da seguinte maneira: fresamento de topo plano com a utilização de fresas inteiriças. Foram desenvolvidos cortes concordantes em cheio com parâmetros pré-definidos para ambas as ferramentas.

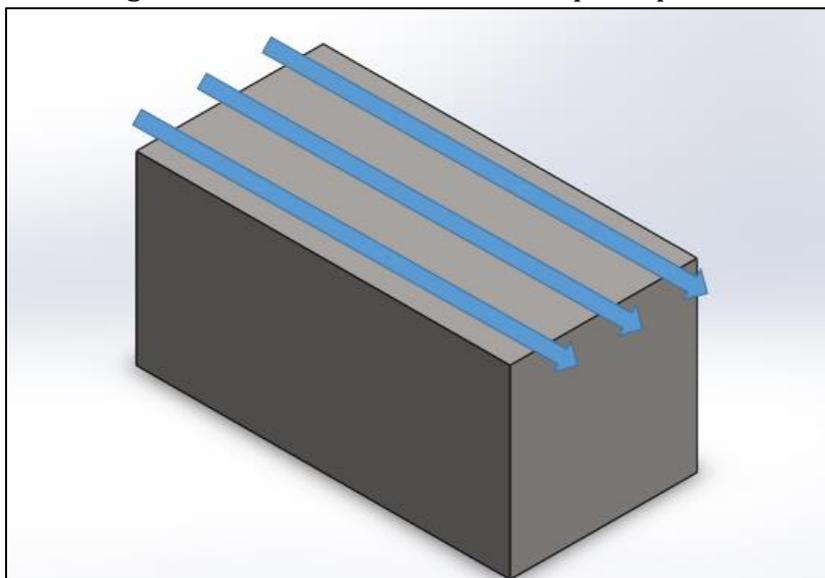
Em ambas as ferramentas utilizadas nos testes os parâmetros de corte foram os seguintes: $n = 8000$ rpm, $V_c = 150$ m/min e $f = 925$ mm/min e $a_p = 0,05$ mm.

Durante a realização dos testes foram feitas as análises de usinabilidade do processo. Os itens levados em consideração foram: a vida útil de ambas as ferramentas através de análises do desgaste e avaria dos gumes de corte das mesmas. Essas medições foram feitas por meio de uma análise microscópica das ferramentas.

Outra verificação foi a mensuração da rugosidade do material usinado. Essa aferição foi feita através dos conceitos de rugosidade por meio da utilização de um rugosímetro, que trouxe valores das medidas de Ra , Rz e $Rz_{máximo}$, já revisados e conceituados anteriormente.

A estratégia de usinagem utilizada foi a de fresamento concordante obedecendo o sentido mostrado na imagem abaixo (Figura 13). Quando o passe da ferramenta chegar ao fim do corpo de prova, ele retorna ao início do bloco para que o corte seja reiniciado.

Figura 13 - Sentido de corte no corpo de prova



Fonte: O Autor (2019).

As medições de desgaste das ferramentas foram monitoradas através de V_B e V_{Bmax} , feitas a cada 20 minutos de corte das mesmas, até que atinjam 60 minutos totais de trabalho ou no momento em que apresentem lascamentos críticos para o processo.

Outra verificação foi a medição da rugosidade do material usinado. Essa aferição se deu através dos conceitos de rugosidade, por meio da utilização de um rugosímetro *Surfjet-SJ310* da empresa Mitutoyo, que trouxe valores das medidas de Ra , Rz e $Rz_{máximo}$. As medições foram feitas no início do processo, com as ferramentas sem uso e no final do processo, quando foi atingido o tempo total de 60 minutos de duração.

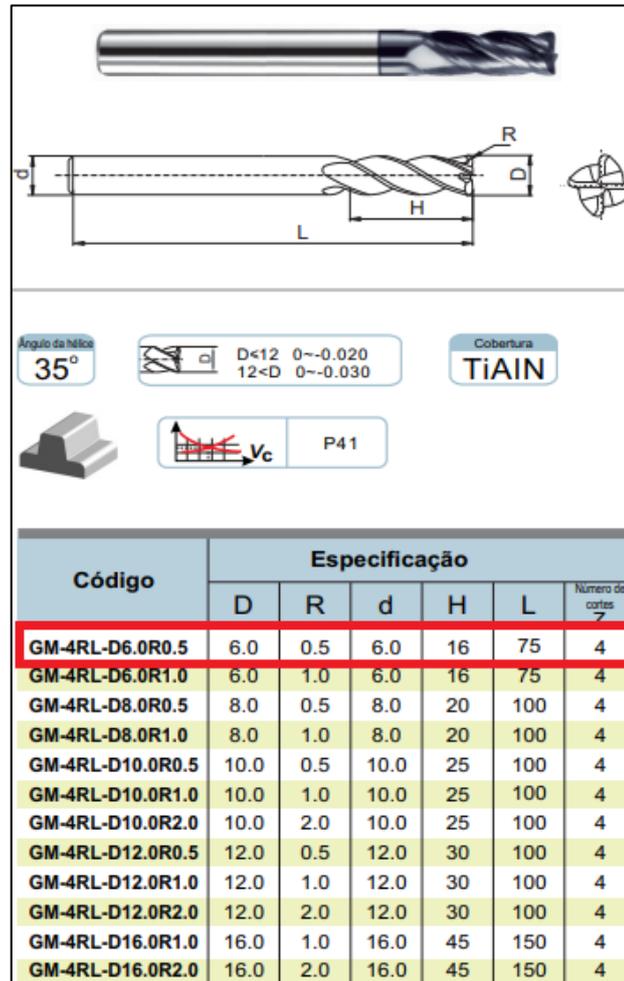
A fim de coletar dados mais conclusivos, foi realizado um pré-teste no processo para análise dos parâmetros de corte e dos desgastes das ferramentas quando utilizadas com os parâmetros supramencionados.

3.2 FERRAMENTAS

Para a realização dos testes avaliativos foram utilizadas duas ferramentas, uma já atualmente empregada no processo da empresa e outra proposta pelo autor para aplicação nesse processo, fabricadas com o substrato metal-duro e que apresentam diferença entre suas classes. Ambas ferramentas consistem em fresas inteiriças com 4 gumes de corte e 6 milímetros de diâmetro.

Segundo o catálogo do fabricante, a ferramenta utilizada atualmente no processo, destacada na Figura 14, apresenta o código GM-4RL-D6.0R1.0. A ferramenta é indicada pelo fabricante para usinagem geral. O código em destaque aponta as características da ferramenta. As letras "GM" indicam uma ferramenta indicada para ser utilizada para usinagem geral. O número "4" representa o número de gumes de corte. A letra "R", por sua vez, informa que a ferramenta é uma fresa de topo reto com raio. Os termos "D6.0" e "R1.0" informam, respectivamente, em milímetros, o diâmetro da fresa e o seu raio de quina. Além disso, o catálogo nos passa que a ferramenta possui 75 mm de comprimento total "L" e 16 mm de comprimento da área de corte "H". A ferramenta possui também revestimento de (TiAl)N.

Figura 14 - Informações da fresa GM-4RL-D6.0R0,5.



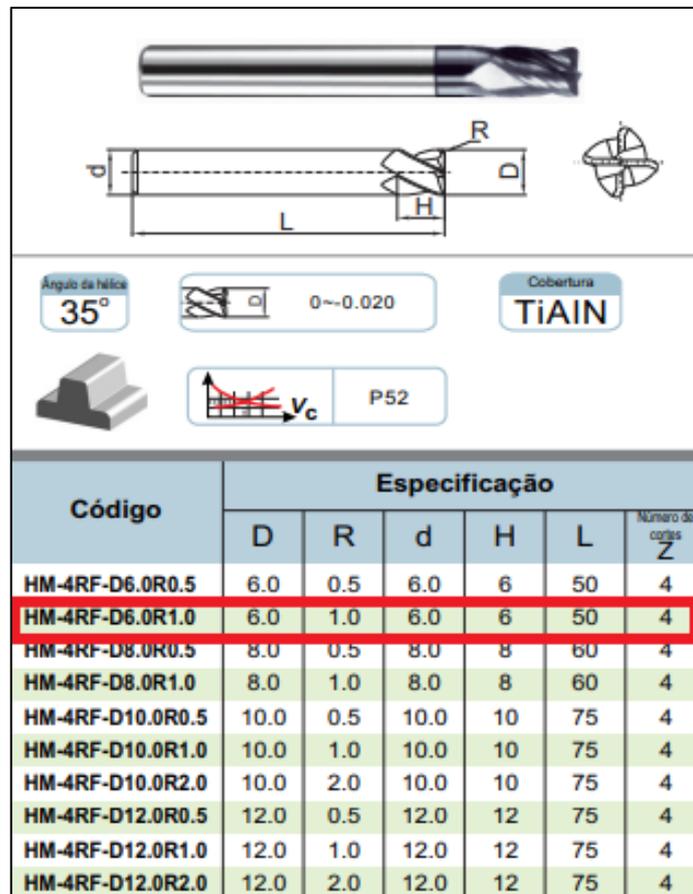
Fonte: Adaptado de ZCC-CT Tools (2019).

A ferramenta que foi proposta para o processo é uma fresa inteiraça também produzida com o substrato metal-duro. Essa fresa, por sua vez, é uma fresa produzida especificamente para o fresamento de materiais endurecidos em processos de usinagem que empregam altas velocidades de corte.

A ferramenta proposta é a fresa de código HM-4RF-D6.0R1.0 (Figura 15). O código da ferramenta nos mostra as seguintes características: as letras “HM” indicam uma ferramenta que pode ser utilizada para usinagem de alta velocidade de aços endurecidos. O número “4” representa o número de gumes de corte. A letra “R”, por sua vez, informa que a ferramenta é uma fresa de topo reto com raio. Os termos “D6.0” e “R1.0” informam, respectivamente, em milímetros, o diâmetro da fresa e o seu raio de quina. Além disso, o

catálogo nos passa que a ferramenta possui 50 mm de comprimento total “L” e 6mm de comprimento da área de corte “H”. A ferramenta possui também revestimento de (TiAl)N.

Figura 15 - Informações da fresa HM-4RF-D6.0R1.0



Fonte: adaptado de ZCC tools (2019).

3.3 MAQUINÁRIO UTILIZADO

A máquina que foi utilizada nos experimentos é um centro de usinagem da marca DMG Deckel Maho DMC 835v (Figura 16). Esse equipamento apresenta as seguintes características técnicas:

- CNC vertical com 3 eixos;
- Capacidade de trabalho com peças de até 1000kg;
- Rotação máxima de 18000 rpm;
- Torque máximo de 86 Nm;
- Potência nominal máxima de 25 kW; e
- Velocidade máxima de deslocamento dos eixos de 42 m/min.

Figura 16 - Centro de usinagem DMG Deckel Maho DMC 835v

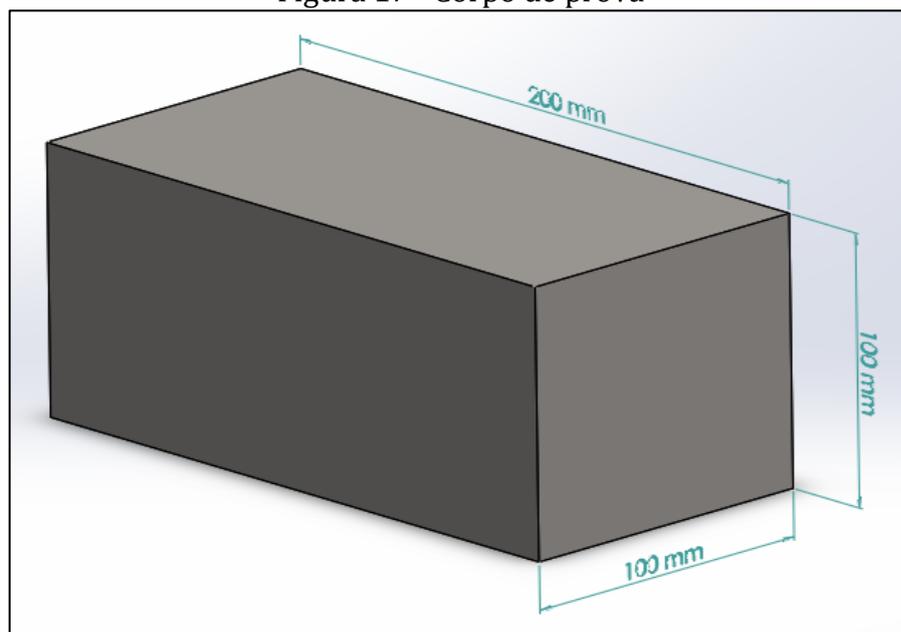


Fonte: O autor (2019).

3.4 MATERIAL

Os testes práticos serão feitos em um corpo de prova fabricado com aço AISI H13 e posteriormente endurecido até 55 HRc por meio do tratamento térmico de têmpera. O corpo de prova apresentará as seguintes dimensões (Figura 17):

Figura 17 - Corpo de prova



Fonte: O autor (2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo estão apresentados os resultados dos testes práticos propostos no capítulo anterior.

4.1 PRÉ-TESTE

Com o propósito de buscar resultados mais claros e conclusivos foi proposta a realização de um pré-teste com a ferramenta que estava sendo testada no processo. A fresa utilizada foi a de código HM-4RF-D6.0R1.0, proposta para o processo.

Os parâmetros de corte utilizados para a realização do pré-teste foram os parâmetros indicados no catálogo do fornecedor, já apresentados anteriormente. O tempo de duração do pré-teste foi de 20 minutos de corte ininterrupto.

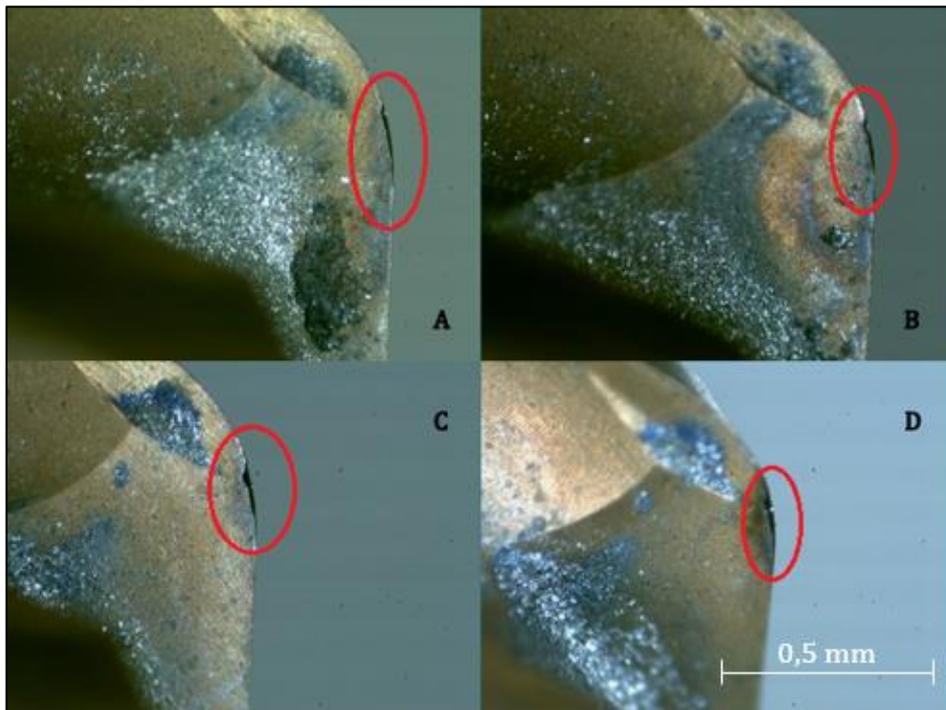
A ferramenta utilizada foi submetida a uma análise microscópica de imagem dos seus gumes. Na análise foi evidenciado que o desgaste gerado no teste seria inconclusivo no quesito de vida útil da fresa.

Essa análise fez com que a primeira proposta de duração dos testes fosse refutada. Essa proposta tinha como objetivo analisar o desgaste ferramental a cada 2 minutos de corte até que se atingisse o tempo máximo de 20 minutos, ou, até que a ferramenta alcançasse o fim da sua vida útil.

Feitas essas observações, o tempo de usinagem e também os intervalos de análises, consequentemente, foram alterados para: avaliação das ferramentas a cada 20 minutos de corte até que era totalizado 60 minutos, ou, até que seja perceptível o fim da vida útil da mesma.

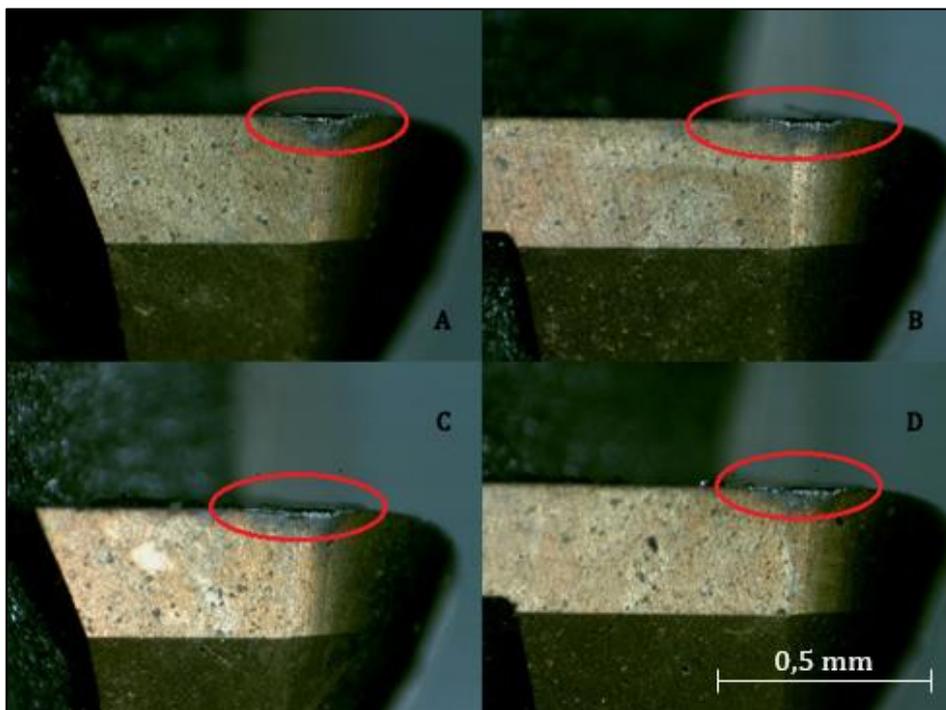
Após a visualização da ferramenta após 20 minutos de corte ficou identificado um pequeno desgaste dos gumes (Figuras 18, 19 e 20).

Figura 18 - Desgaste da face de corte da ferramenta após realização do pré-teste.
Ampliação 30x.



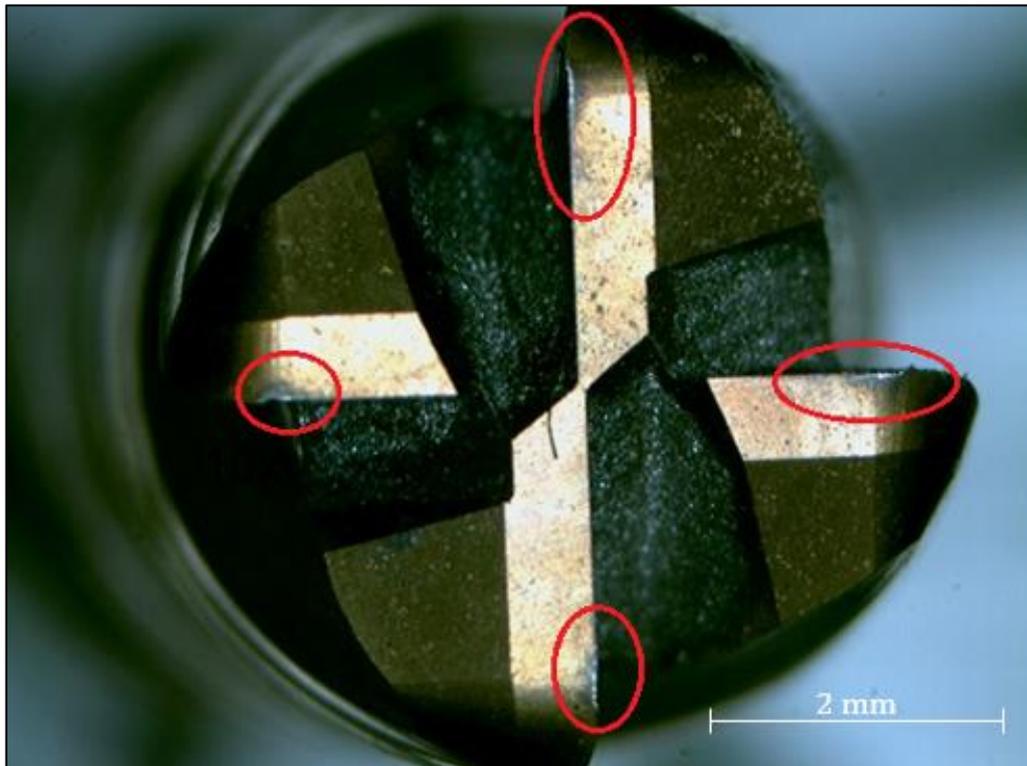
Fonte: O Autor (2019).

Figura 19 - Desgaste do gume secundário da ferramenta após realização do pré-teste.
Ampliação 30x.



Fonte: O Autor (2019).

Figura 20 - Desgaste da ferramenta, visto do topo, após realização do pré-teste. Ampliação 10x.



Fonte: O Autor (2019).

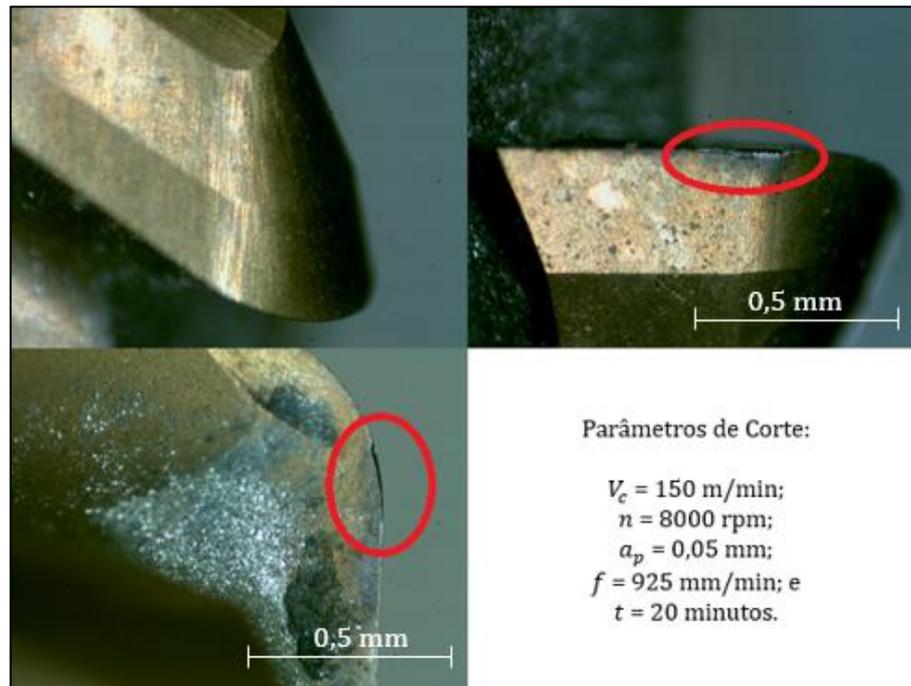
4.2 TESTES PRINCIPAIS

4.2.1 Desgaste da ferramenta

Como visto anteriormente, os resultados obtidos no pré-teste mostraram-se insuficientes em relação ao estudo que fora proposto inicialmente neste trabalho. Com o ajuste dos tempos de corte, baseados nesses resultados, foram feitos então os testes principais.

Na ferramenta proposta, após 20 minutos de corte com os parâmetros de $n = 8000$ rpm, $V_c = 150$ m/min e $a_p = 0,05$ mm, e $f = 925$ mm/min os resultados obtidos, no que se refere ao desgaste dos gumes da ferramenta, visualizados através de um microscópio com ampliação de 30x (Figura 21):

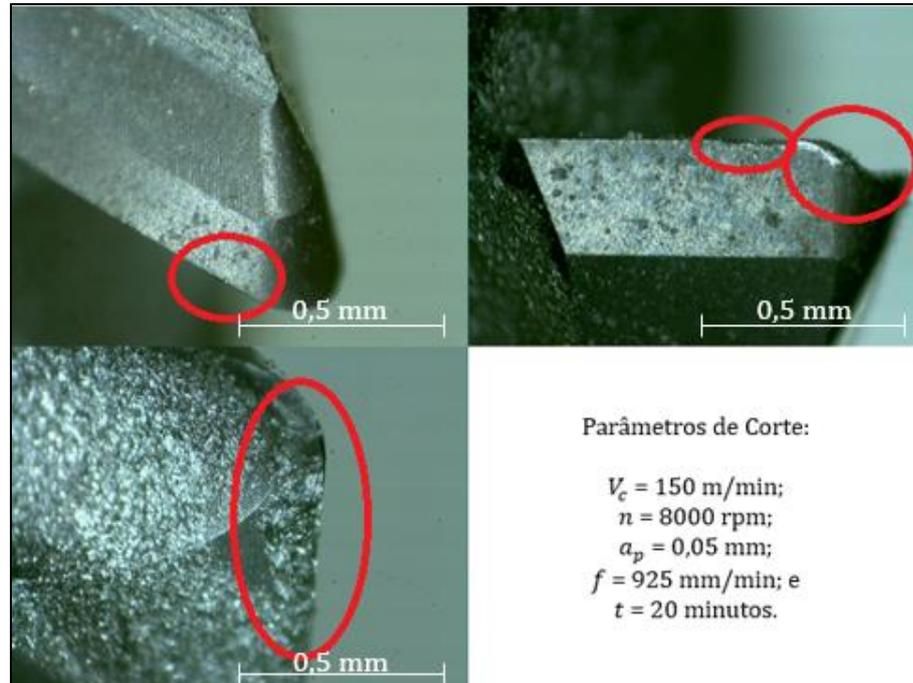
Figura 21 - Ferramenta HM-4RF-D6.0R1.0 após 20 minutos de corte e parâmetros utilizados.



Fonte: O Autor (2019).

Na ferramenta atual, após 20 minutos de corte com os parâmetros de $n = 8000$ rpm, $V_c = 150$ m/min, $a_p = 0,05$ mm, e $f = 925$ mm/min, os resultados obtidos, no que se refere ao desgaste dos gumes da ferramenta, visualizados através de um microscópio com ampliação de 30x (Figura 22):

Figura 22 – Ferramenta GM-4RF-D6.0R0.5 após 20 minutos de corte e parâmetros utilizados

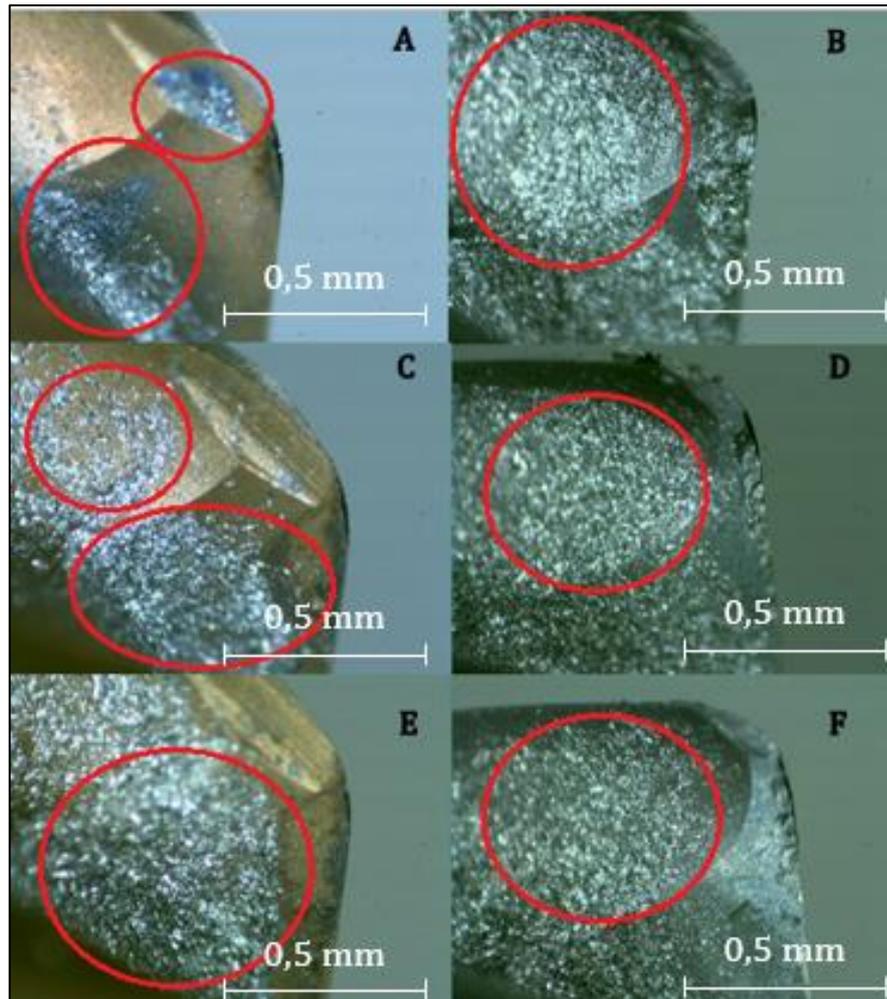


Fonte: O Autor (2019).

Através da visualização destas duas figuras alguns pontos podem ser evidenciados. A primeira observação que pode ser feita é que para a ferramenta atual, na imagem 22, apesar de possuir um raio de gume de 0,5 milímetros, meio milímetro menor que o raio da ferramenta de maior dureza que está sendo testada, esperava-se que houve um maior desgaste devido a essa diferença de dimensões entre elas. Entretanto, por tratar-se de um processo de desbaste não tão agressivo, com $a_p = 0,05$ milímetros, a parte que apresentou desgaste foi a face de contato da ferramenta.

Na Figura 23 é visível a presença de cavacos soldados na face de corte de ambas as ferramentas em diferentes tempos de corte. As imagens A e B representam 20 minutos de corte, as ferramentas das imagens C e D foram utilizadas durante 40 minutos de corte e as imagens E e F representam as ferramentas utilizadas para 60 minutos de usinagem. Os cavacos estão localizados principalmente na face de corte e sua concentração decresce conforme a distância da área de contato entre a ferramenta e o material aumenta.

Figura 23 - Presença de cavaco na face de corte proveniente do processo.



Fonte: O Autor (2019).

Nota-se, entretanto, que existe diferença na quantidade de cavaco que se juntou à ferramenta. Na ferramenta mais frágil percebe-se que há grande quantidade de material aderido, desde os 20 minutos, enquanto na ferramenta mais dura, com 20 minutos, há uma pequena quantidade de cavacos aderidos. Esse número é crescente conforme cresce também o tempo de corte, ficando claro que, com 60 minutos de corte, existe uma grande quantidade de material na face de ambas as ferramentas.

Um aspecto perceptível em relação aos cavacos e sua formação é que, devido à pequena profundidade de corte a_p , o tamanho dos cavacos resultantes da operação é muito pequeno, sendo necessária a utilização de um microscópio para sua visualização.

Outro ponto que chama atenção é o tamanho do desgaste das ferramentas. Nas imagens vê-se que, devido à diferença entre as classes do metal-duro das ferramentas, o desgaste da primeira (Figura 21), foi menor que o da segunda (Figura 22).

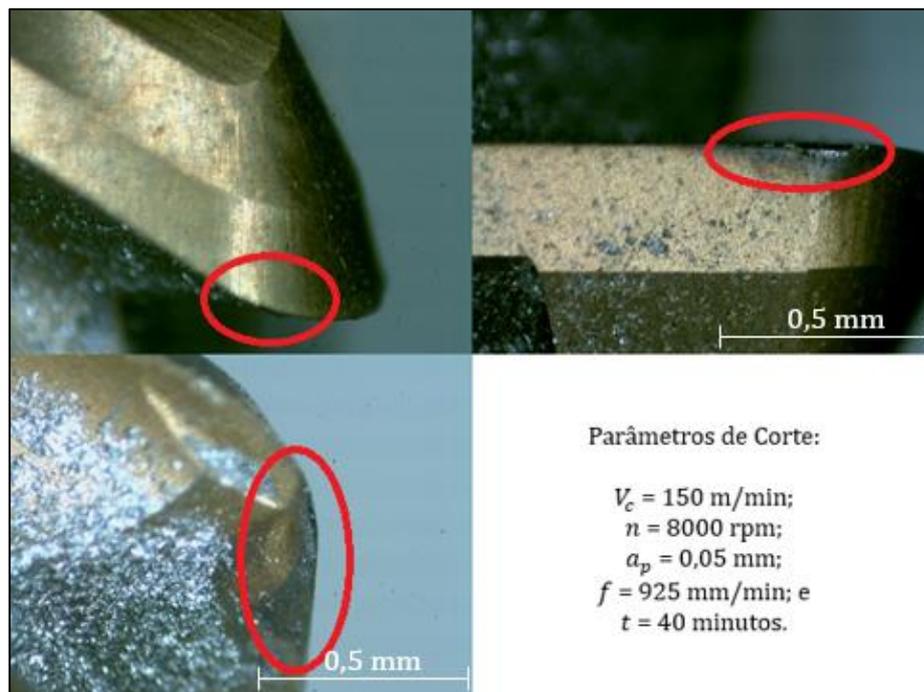
A ferramenta atual, na imagem 22, apresentou, inclusive, formação de cratera, enquanto, por sua vez, a ferramenta proposta, na imagem 21, apresentou um pequeno desgaste visível na face de corte, mas ainda assim consideravelmente menor que o desgaste presente na ferramenta atual, de código GM-4RF-D6.0R0.5.

Como já era esperado depois do que foi observado anteriormente, as ferramentas que foram submetidas a 40 minutos de usinagem apresentaram um desgaste mais acentuado em comparação às anteriores e ficou ainda mais evidente a diferença de resistência ao desgaste dos materiais.

Mais uma vez, na ferramenta atual, foi possível observar a formação de cratera no gume de corte. Além disso, a diferença do desgaste nas faces entre as duas fresas ficou ainda mais evidente já que o aumento do desgaste das ferramentas foi muito expressivo.

Na ferramenta proposta é perceptível que o desgaste aumenta com 40 minutos em comparação ao seu desgaste com 20 minutos de corte, porém não há um grande aumento entre eles. O que mais se percebe é que existe a formação de uma área de coloração escura, muito provavelmente causada pela temperatura decorrente do processo ou pelo cisalhamento dos cavacos extraídos do material. Na face principal de corte ainda não é possível identificar um desgaste V_b notável (Figura 24).

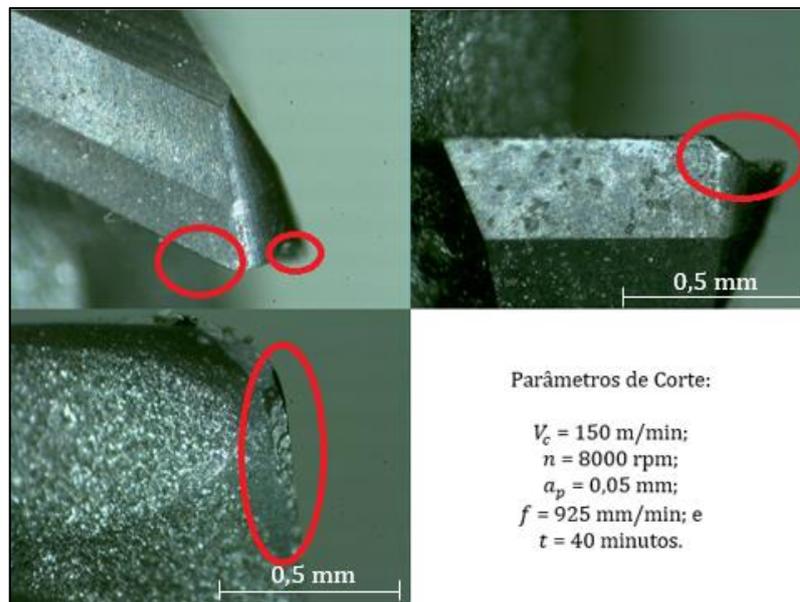
Figura 24 - Ferramenta HM-4RF-D6.0R1.0 após 40 minutos de corte e parâmetros utilizados.



Fonte: O Autor (2019).

Já na ferramenta atual, após 40 minutos de corte, é perceptível que há um grande aumento do desgaste em relação à própria ferramenta que foi submetida a 20 minutos de corte. Na face de contato já se percebe a presença de um desgaste que se expande radialmente em direção à sua extremidade. Como dito anteriormente, mais uma vez temos o lascamento de um dos gumes de corte (Figura 25).

Figura 25 - Ferramenta GM-4RF-D6.0R0.5 após 40 minutos de corte e parâmetros utilizados.



Fonte: O Autor (2019).

As ferramentas que foram empregadas na usinagem com duração de 60 minutos demonstraram comportamento semelhante ao que foi exposto nas análises dos tempos de usinagem anteriormente.

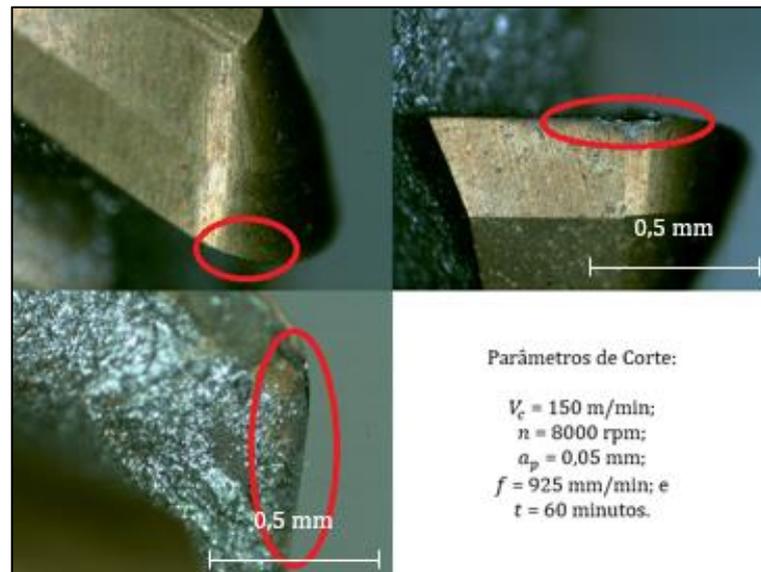
Como na situação anterior, de usinagem com duração de 40 minutos, a fresa atual apresentou um grande desgaste. Com a presença de uma grande cratera em sua face de corte. Ficou, mais uma vez, evidente o aumento do desgaste em comparação à ferramenta utilizada na usinagem anterior de 40 minutos.

A ferramenta proposta exibiu um crescimento no desgaste da sua face, mas, como esperado, não comparável ao desgaste evidenciado na ferramenta atual e, mais uma vez, não houve um desenvolvimento notável do desgaste V_b .

Na ferramenta proposta, entretanto, percebe-se que o desgaste se expandiu em área, já que ele não estava mais presente exclusivamente no raio da face, mas também se

estendeu em direção ao centro da ferramenta. Na usinagem de 60 minutos, mais uma vez, não houve um desenvolvimento notável do desgaste de gume, porém, apresentou o maior desgaste V_b , entre todas as ferramentas, no seu gume secundário (Figura 26).

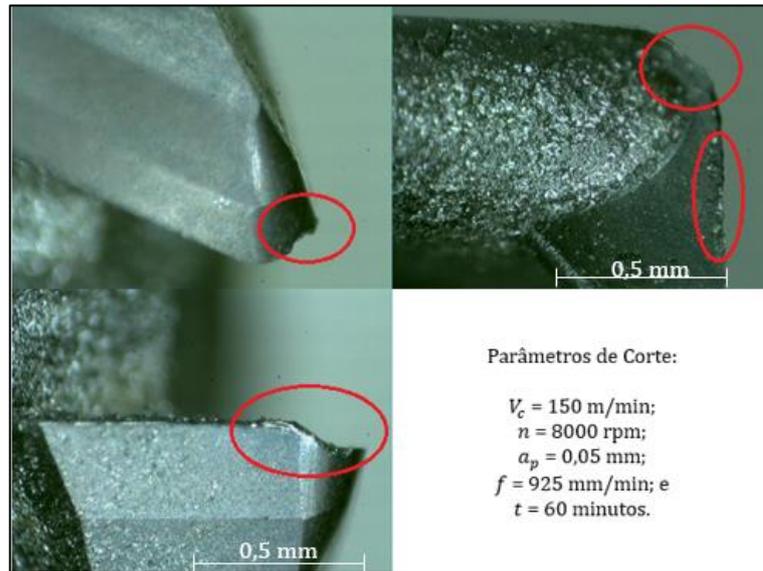
Figura 26 - Ferramenta HM-4RF-D6.0R1.0 após 60 minutos de corte e parâmetros utilizados.



Fonte: O Autor (2019)

Na ferramenta atual além da cratera formada em sua face de corte, também é possível observar um grande desgaste V_b no seu gume secundário (Figura 27).

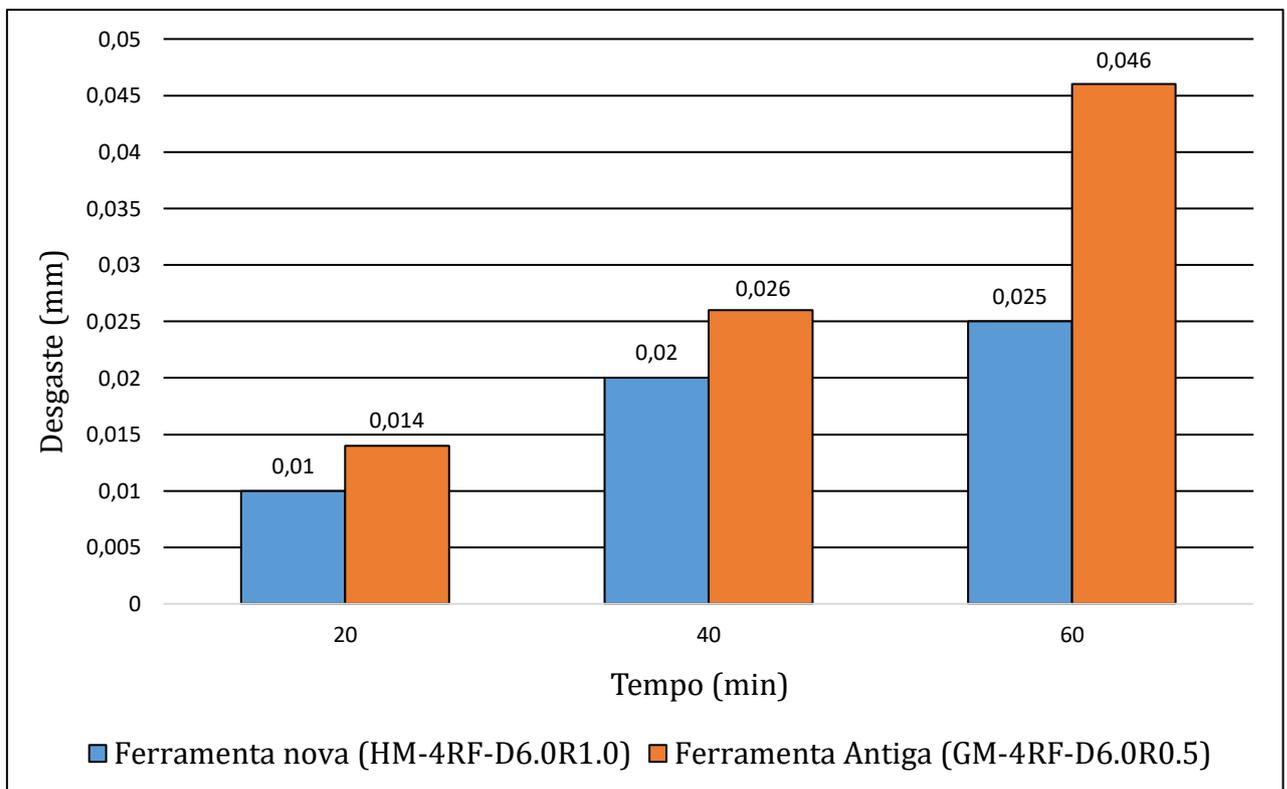
Figura 27 - Ferramenta GM-4RF-D6.0R0.5 após 60 minutos de corte e parâmetros utilizados.



Fonte: O Autor (2019).

Os valores de desgaste das ferramentas, obtidos através de medição digital, estão comparados entre os três tempos propostos para usinagem, no gráfico abaixo (Figura 28).

Figura 28 - Gráfico de comparação entre desgastes medidos no *preset* das ferramentas

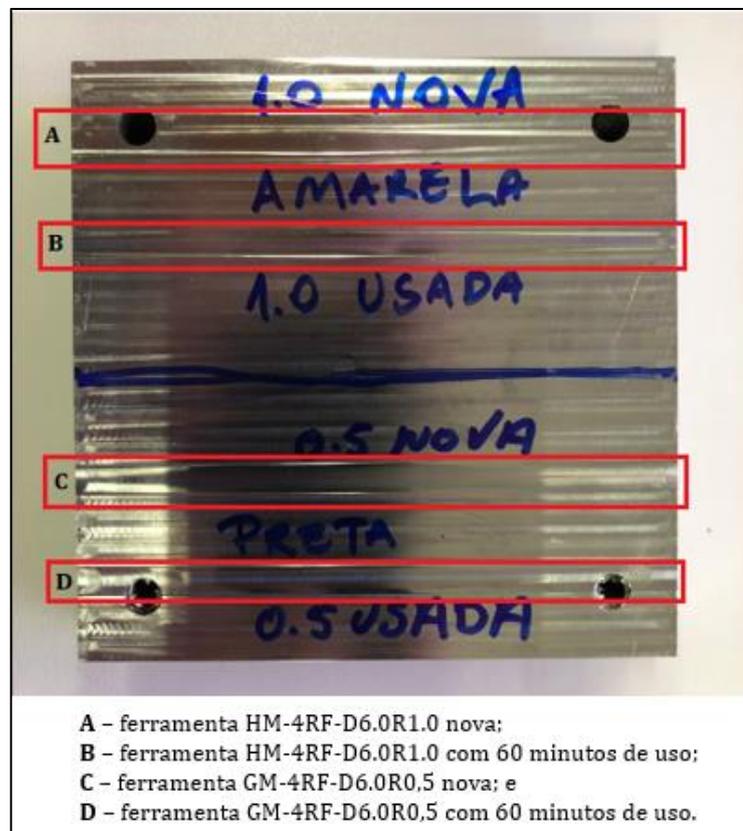


Fonte: O Autor (2019).

4.2.2 Rugosidade

Para a avaliação da rugosidade da peça usinada foram utilizadas ferramentas novas, sem nenhuma utilização prévia, e, ferramentas que foram utilizadas até o final do teste de desgaste, ou seja, que foram utilizadas durante 60 minutos de usinagem. Cada ferramenta foi utilizada em uma faixa do corpo de prova, como mostra a imagem abaixo (Figura 29).

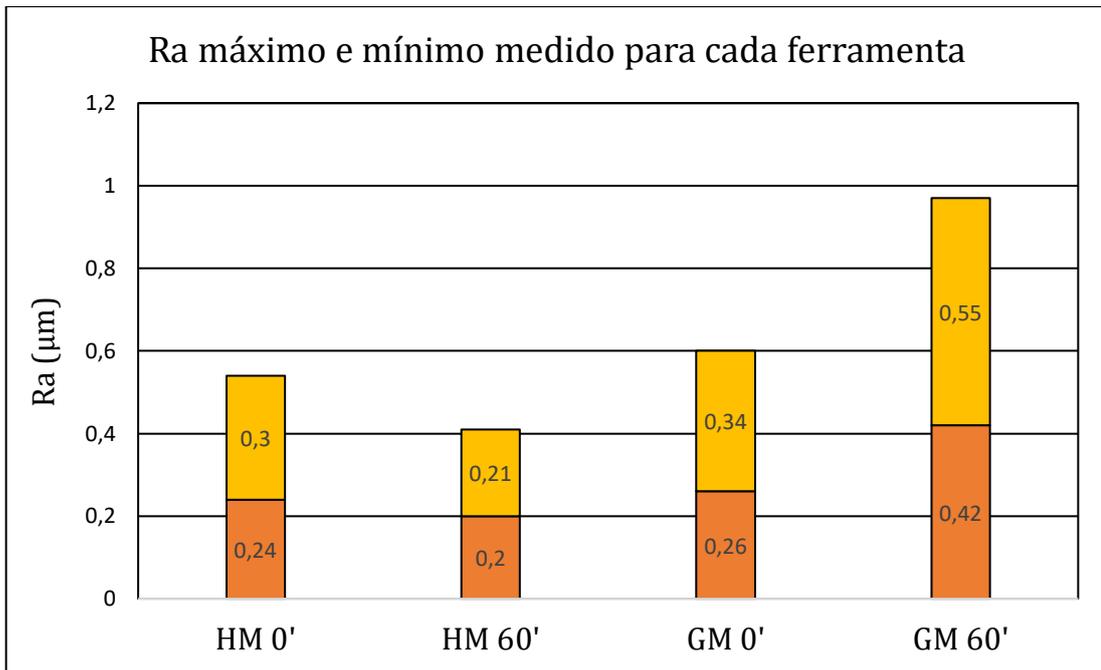
Figura 29 - Corpo de prova utilizado para os testes de rugosidade



Fonte: O Autor (2019).

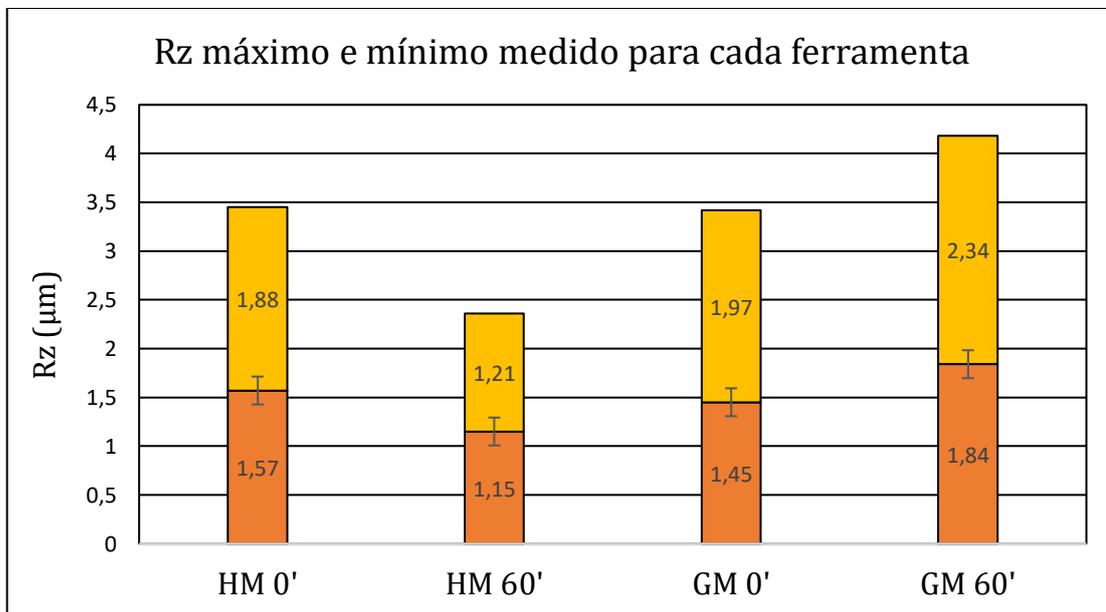
Para cada medição determinou-se valores de R_a , R_z e $R_{z\text{máximo}}$ juntamente com o perfil da rugosidade no trecho analisado. Nos gráficos (Figuras 30, 31 e 32) a seguir é possível visualizar as diferenças entre esses parâmetros de rugosidades em cada uma das faixas em destaque na figura 29, acima.

Figura 30 - R_a máximo e mínimo medido para cada ferramenta.



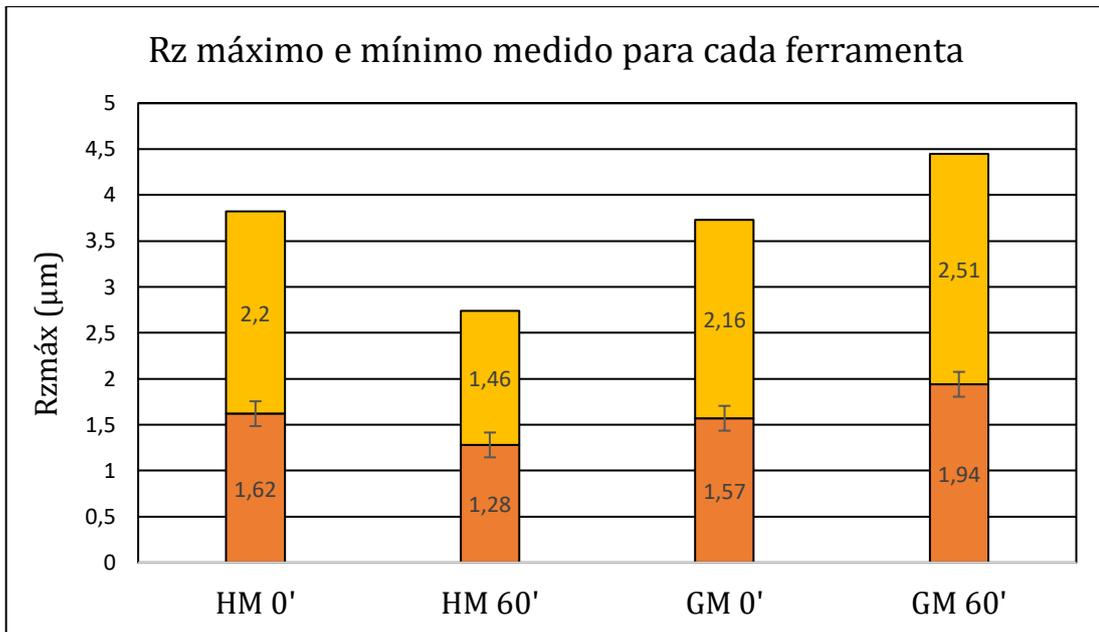
Fonte: O Autor (2019).

Figura 31 - R_z máximo e mínimo medido para cada ferramenta



Fonte: O Autor (2019).

Figura 32 - $R_{z\text{máximo}}$ máximo e mínimo medido para cada ferramenta.



Fonte: O Autor (2019).

Mais uma vez, assim como nas análises de desgastes das ferramentas em questão, percebe-se que a ferramenta atual apresentou os maiores valores em todos os critérios analisados, R_a , R_z e $R_{z\text{máximo}}$.

Não obstante, maiores ainda são os valores medidos na faixa usinada pela ferramenta atual com uso de 60 minutos. O desgaste da ferramenta ficou evidente em mais um parâmetro: a rugosidade superficial do corpo de prova.

Os valores dos parâmetros de rugosidade obtidos com a ferramenta proposta, sem nenhum uso, não demonstraram tanta diferença em relação aos valores obtidos com a ferramenta atual.

Ao analisar as ferramentas com 60 minutos de uso percebe-se uma grande diferença nos valores entre a ferramenta atual e a ferramenta proposta. A ferramenta atual, em todos os parâmetros analisados, mostrou-se inferior à ferramenta proposta. Nos parâmetros de R_a e R_z , por exemplo, a ferramenta atual apresentou valores duas vezes maiores aos valores apresentados pela ferramenta proposta.

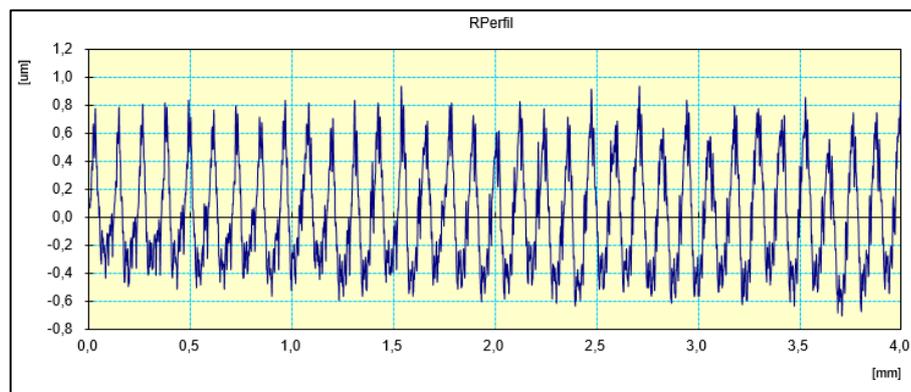
Dito isso é possível perceber como o desgaste da ferramenta tem grande influência sobre a rugosidade da peça usinada.

Além do desgaste da ferramenta, outro fator que pode ter sido importante para a geração desses resultados, é o comprimento da ferramenta. Como visto anteriormente

referenciando (VIEIRA E ALMEIDA, 2006), ferramentas de maior comprimento, sob altas velocidades, tendem a apresentar maior vibração durante o processo, colaborando para que haja uma maior rugosidade.

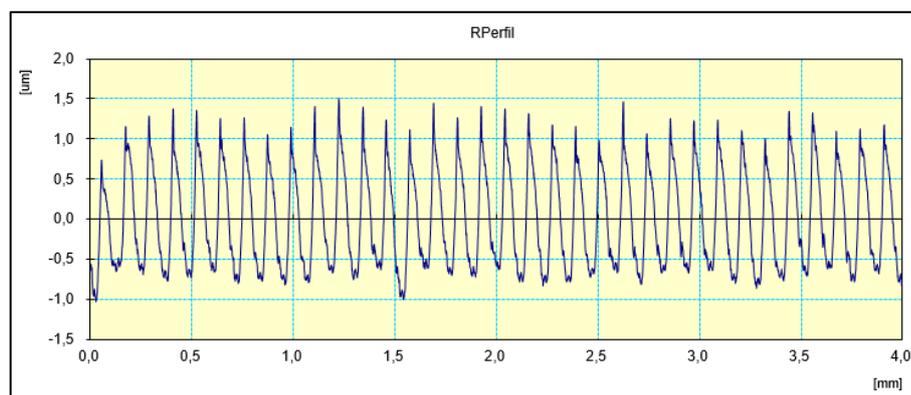
Nas imagens abaixo (Figuras 33, 34, 35 e 36) é possível observar os diferentes perfis de rugosidade medidos nas 4 faixas de análise que foram usinadas com as ferramentas novas e com as ferramentas com 60 minutos de uso, como foi exposto anteriormente.

Figura 33 - Perfil de rugosidade da ferramenta GM-4RF-D6,0R0,5 nova.



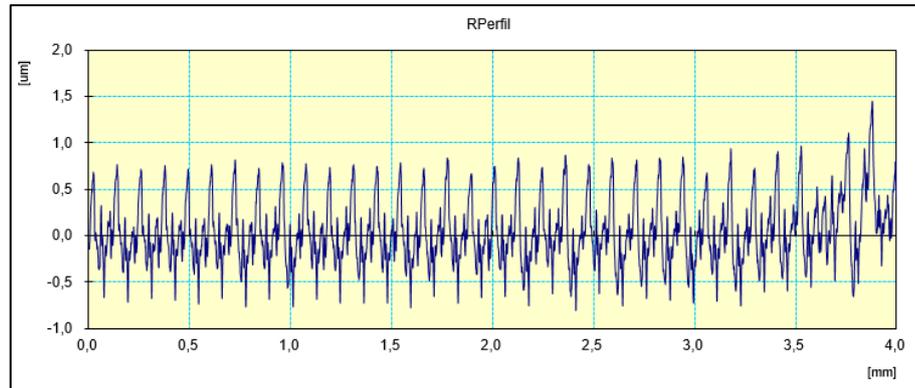
Fonte: O Autor (2019).

Figura 34 - Perfil de rugosidade da ferramenta GM-4RF-D6,0R0,5 com 60 minutos de uso.



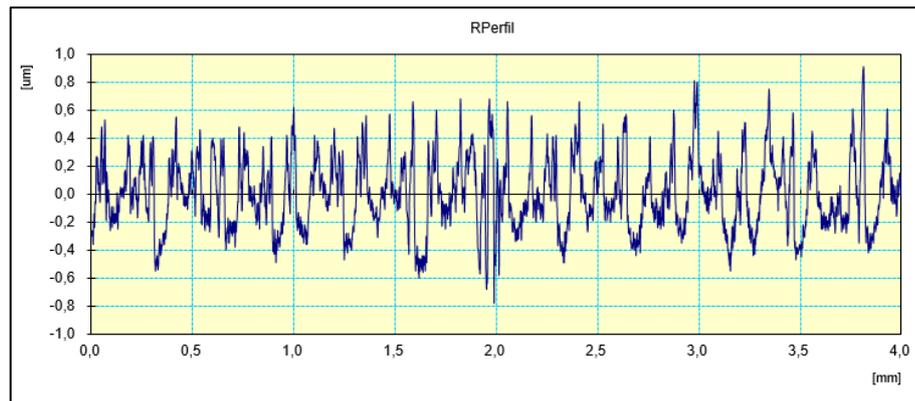
Fonte: O Autor (2019).

Figura 35 - Perfil de rugosidade da ferramenta HM-4RF-D6,0R1,0 nova.



Fonte: O Autor (2019).

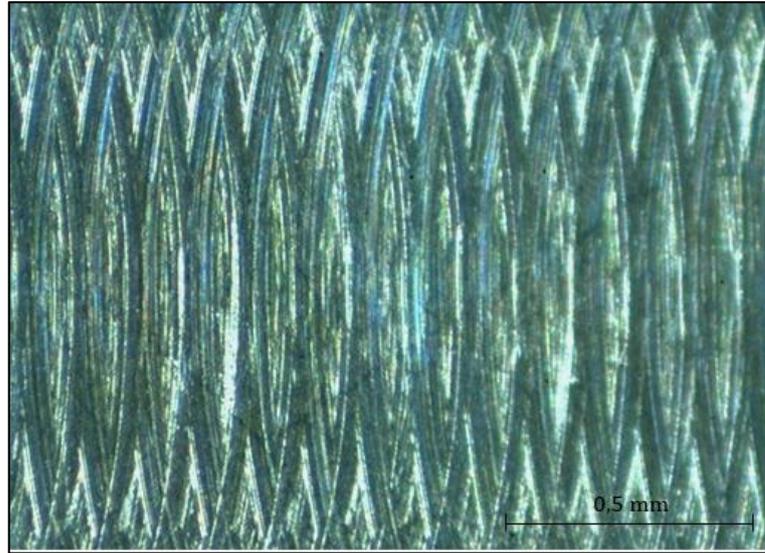
Figura 36 - Perfil de rugosidade da ferramenta HM-4RF-D6,0R1,0 com 60 minutos de uso.



Fonte: O Autor (2019).

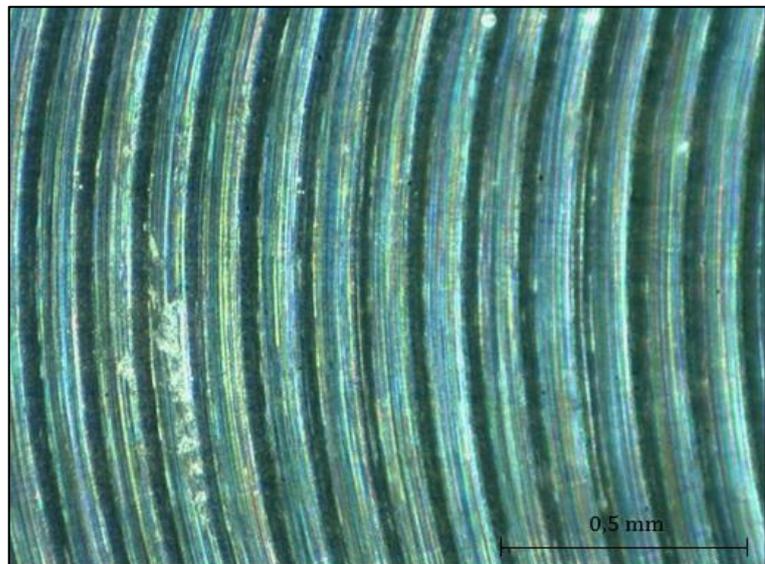
Após a verificação das diferentes rugosidades geradas pelo processo, o corpo de prova foi submetido a uma análise de superfície com a utilização de um microscópio. Nas imagens a seguir (Figuras 37, 38, 39 e 40) é possível visualizar os diferentes relevos superficiais resultantes da usinagem do material com ferramentas distintas, novas e usadas.

Figura 37 - Superfície usinada pela ferramenta GM-4RF-D6,0R0,5 nova.



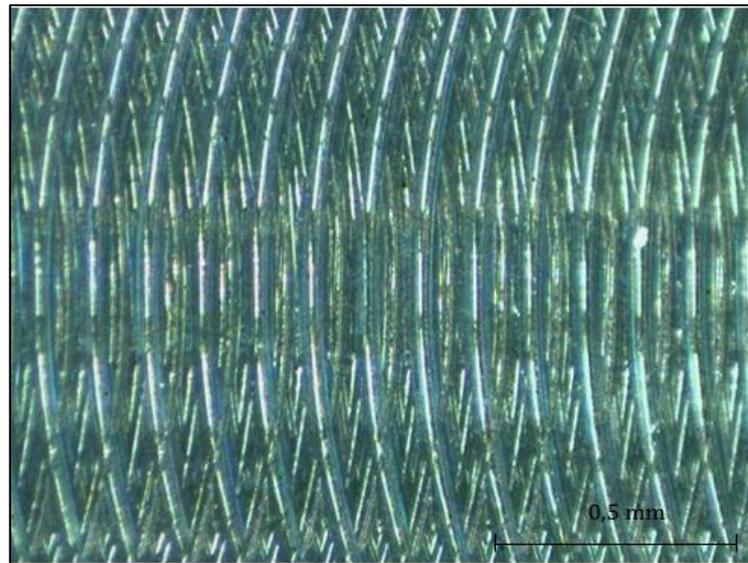
Fonte: O Autor (2019).

Figura 38 - Superfície usinada pela ferramenta GM-4RF-D6,0R0,5 com 60 minutos de uso.



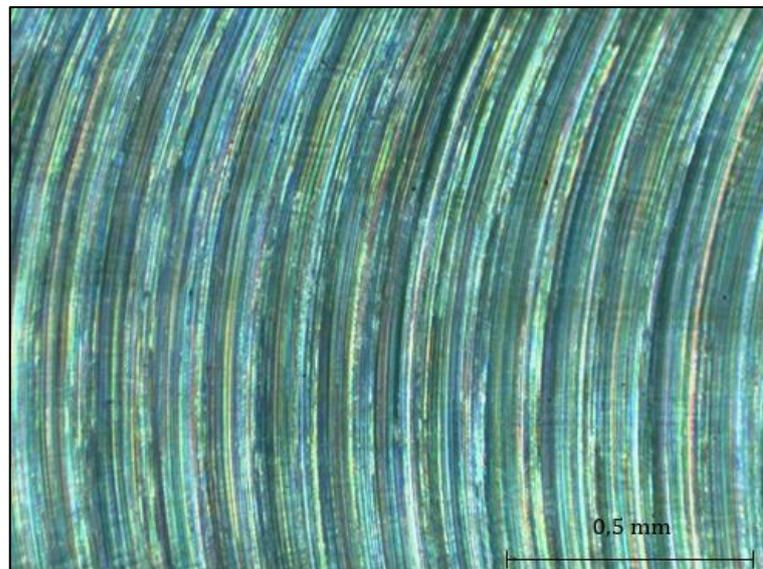
Fonte: O Autor (2019).

Figura 39 - Superfície usinada com a ferramenta HM-4RF-D6,0R1,0 nova.



Fonte: O Autor (2019).

Figura 40 - Superfície usinada com a ferramenta HM-4RF-D6,0R1,0 com 60 minutos de uso.



Fonte: O Autor (2019).

Analisando as imagens é possível concluir que as superfícies usinadas com as ferramentas sem uso não apresentam grandes diferenças entre si. A faixa usinada pela ferramenta proposta apresenta uma textura mais homogênea, não tão desgastado quanto a superfície final usinada pela ferramenta atual.

Por outro lado, observa-se que as superfícies que foram usinadas com a utilização das ferramentas com 60 minutos de uso, através da visualização das imagens 34, 36, 38 e 40, apresentam grande diferença entre si.

Nitidamente, a superfície gerada pela usinagem com a ferramenta proposta com 60 minutos de uso (Figura 40) é muito menos severa ao material, não se apresenta tão heterogênea em comparação à superfície gerada pela ferramenta atual com 60 minutos de uso (Figura 38).

Essas semelhanças e diferenças ficam ainda mais evidente se, juntamente com a análise visual, através das imagens acima, forem levados em consideração os valores de R_a , R_z , e $R_{z\text{máximo}}$ presentes nos gráficos das figuras 30, 31 e 32.

Em todos os parâmetros de medição da rugosidade, R_a , R_z e $R_{z\text{máximo}}$ os valores medidos na ferramenta atual foram superiores que os valores da ferramenta proposta, quando ambas com 60 minutos de uso. Na medição de R_a , por exemplo, a ferramenta GM teve um valor quase 3 vezes superior ao valor medido na ferramenta HM (Figura 30).

5 CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES SOBRE O DESGASTE DAS FERRAMENTAS

A análise dos dados obtidos nesse trabalho experimental, através das imagens captadas pelo microscópio, permite afirmar que, no que diz respeito ao desgaste das ferramentas de corte, a diferença das classes de metal-duro tem grande impacto no seu desempenho.

Evidentemente, era esperado que ambas as ferramentas fossem sofrer desgaste durante o processo de corte, porém a fresa proposta, de código HM-4RF-D6.0R1.0, constituída de uma classe de metal-duro de maior resistência, mostrou-se muito menos afetada pelo processo de corte e seus parâmetros e, mesmo com o aumento gradual dos tempos de usinagem, não demonstrou um desgaste que pudesse ser capaz de inutilizá-la após os 60 minutos propostos para os testes.

Já a fresa atual de código GM-4RF-D6.0R0.5, produzida com um metal-duro de classe com menor resistência ao desgaste, apresentou um grande desgaste de face de corte. A fragilidade dessa ferramenta ficou explícita quando, com apenas 20 minutos de usinagem, já apresentou lascamento em uma de suas faces (Figura 22).

Percebe-se que o desgaste de flanco V_b , um dos principais parâmetros de análise de desgaste de gume de corte, em ambas as ferramentas, segue uma tendência de aumento diretamente proporcional ao tempo. Pelas imagens é possível visualizar que, conforme o tempo aumenta, na ferramenta mais frágil, o V_b sofre uma grande expansão, enquanto na ferramenta mais dura esse parâmetro também apresenta crescimento de tamanho, porém sem grande expressão.

Conclui-se então que, após as comparações, testes e análises dos seus resultados, a ferramenta proposta, designada pelo fabricante especificamente para aplicações de usinagem de materiais endurecidos com altas velocidades, apresentou melhores resultados em relação à ferramenta atual no âmbito do desgaste da ferramenta e sua vida útil, quando ambas aplicadas ao mesmo processo com os mesmos parâmetros de corte.

5.2 CONCLUSÕES SOBRE A RUGOSIDADE SUPERFICIAL DO MATERIAL USINADO

Como concluído anteriormente, em relação ao desgaste das ferramentas, no âmbito da rugosidade superficial resultante desse processo de usinagem, a ferramenta HM-4RF-D6.0R1.0 mostrou-se amplamente superior à ferramenta GM-4RF-D6.0R0.5.

Os resultados dos ensaios com rugosímetro, expostos no capítulo anterior, através das imagens 30 a 40, deixam claro que ambas as ferramentas quando utilizadas novas não apresentaram uma diferença discrepante. A grande desigualdade de resultados, onde é possível comprovar a vantagem de uma ferramenta em relação à outra, está presente na análise da rugosidade com as ferramentas com 60 minutos de uso.

Essa diferença é ainda mais perceptível quando levamos em consideração a análise dos perfis de rugosidade medidos, figuras 34 e 36, e, nas imagens microscópicas das superfícies usinadas, figuras 38 e 40, onde a aparência da área usinada pela ferramenta HM é muito mais suave e homogênea do que na área usinada pela ferramenta GM.

Conclui-se então que, após a discussão e observações feitas acima, a ferramenta HM-4RF-D6.0R1.0 é a ferramenta mais indicada para esse processo de usinagem em comparação à ferramenta GM-4RF-D6.0R0.5.

REFERÊNCIAS

AMORIM, Heraldo José de. **ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE DE CORTE, DESGASTE DE FERRAMENTA, RUGOSIDADE E FORÇAS DE USINAGEM EM TORNEAMENTO COM FERRAMENTA DE METAL DURO**. 2002. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

Adaptado de: BALZARETTI, N. M.; PEREIRA, A. S.; CAMERINI, R. V.; SANTOS, S. I.; JORNADA, J. A. H.; **BONDING CVD DIAMOND TO WC-CO BY HIGH PRESSURE - HIGH TEMPERATURE PROCESSING**; *Materials Research Society Proceedings*, 2007.

BOING, Denis; **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CLASSE DA FERRAMENTA DE METAL-DURO NO TORNEAMENTO DO AÇO AISI 4340 ENDURECIDO**. Revista da UNIFEPE, Brusque, 2016.

Adaptado de: DEMIR, Halil; GÜNDÜZ, Süleyman; ERDEN, Mehmet Akir. **INFLUENCE OF THE HEAT TREATMENT ON THE MICROSTRUCTURE AND MACHINABILITY OF AISI H13 HOT WORK TOOL STEEL**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Londres, 1 dez. 2017.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **TECNOLOGIA DA USINAGEM DOS MATERIAIS**. São Paulo: Artliber, 2010.

FERRARESI, Dino. **FUNDAMENTOS DA USINAGEM DOS METAIS**. São Paulo: Afiliada, 1970.

Adaptado de: FIELD, Michael; KHALES, John F.; CAMMETT, John T. **A REVIEW OF MEASURING METHODS FOR SURFACE INTEGRITY**. Metcut Research Associates, Cincinnati, Ohio, Estados Unidos, 1972.

Adaptado de: FRITZ, Klocke. **MANUFACTURING PROCESSES 1: CUTTING**. Aachen, Alemanha: Springer, 2010.

GABARDO, João Fredolim. **ESTUDO DA TENACIDADE DO AÇO FERRAMENTA H13**. 2008. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

Adaptado de: Gille, G., Szesny, B., Dreyer, K., van den Berg, H., Schmidt, J., Gestrich, T., & Leitner, G.; **SUBMICRON AND ULTRAFINE GRAINED HARDMETALS FOR MICRODRILLS AND METAL CUTTING INSERTS**. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2002.

MARIN, Felipe. **ANÁLISE DE DESGASTE DE FERRAMENTAS NO PROCESSO DE FURAÇÃO DE COMPÓSITO POLIMÉRICO REFORÇADO COM FIBRAS DE VIDRO**. 2016. Trabalho de Conclusão (Engenharia Mecânica) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2016.

MIRRES, Sandro Pimentel. **IDENTIFICAÇÃO DE CHATTER NO FRESAMENTO DE TOPO**. 2013. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Federal de Educação Tecnológica, Rio de Janeiro, 2013.

MITSUBISHI. **O QUE É METAL DURO?**. 2019. Disponível em: <<http://www.mmbr-carbide.com.br/technical_information/tec_guide/tec_guide_carbide>>. Acesso em: 1 maio 2019.

NICOLA, Gerson Luiz. **ANÁLISE DE SUPERFÍCIES FRESADAS POR DIFERENTES ESTRATÉGIAS EM AÇO AISI H13 ENDURECIDO**. 2008. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2008.

OLIVEIRA, Juliano Marcon. **CARACTERIZAÇÃO DA INTEGRIDADE DE SUPERFÍCIES USINADAS PARA PRODUÇÃO DE MOLDES E MATRIZES**. 2006. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2006.

Adaptado de: ROBINSON, G. M.; JACKSON, M. J.; WHITFIELD, M. D.; **A REVIEW OF MACHINING THEORY AND TOOL WEAR WITH A VIEW OF DEVELOPING MICRO AND NANO MACHINING PROCESSES**; Journal of Material Science; 2007.

SÁ, Vinícius Maia de. **AVALIAÇÃO DO DESGASTE DA FERRAMENTA DE METAL DURO REVESTIDA COM TiN NO FRESAMENTO DO AÇO ABNT4140 TEMPERADO E REVENIDO, UTILIZANDO DUAS FRESAS DE DIÂMETROS DIFERENTES**. 2010. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

SANDVIK. **MATERIAIS DE FERRAMENTAS DE CORTE**, 2019. Disponível em: <<<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>>>. Acesso em: 1 maio 2019.

SCHROETER, Rolf Bertrand. **TECNOLOGIA DA USINAGEM COM FERRAMENTAS DE GEOMETRIA DEFINIDA**: Curso Tecnologia de Usinagem I, Florianópolis, 2002.

SCHWAIZER, Pedro Henrique. **ANÁLISE DA QUALIDADE SUPERFICIAL NO FRESAMENTO EM RAIOS COM FERRAMENTA DE PONTA ESFÉRICA**. 2018. Trabalho de Conclusão (Engenharia Mecânica) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2018.

SECCO, Daniel de Carvalho. **FRESAMENTO DE AÇO PARA MOLDES E MATRIZES EM CONDIÇÕES CRIOGÊNICAS**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2015.

SILVA, André Luis da Costa; MEI, Paulo Roberto. **AÇOS E LIGAS ESPECIAIS**. Editora Edgard Blücher, São Paulo, 2006.

STEMMER, Caspar Erich. **FERRAMENTAS DE CORTE I**. Santa Catarina: Editora da UFSC, 2001.

TANIO, Franco. Previsão de Crescimento de 5 a 6%. **Metal Mecânica**, São Paulo, fevereiro 2019. Disponível em: <<<https://pt.calameo.com/read/0021257071f76d7015d0e>>>. Acesso em: 17 mar. 2019.

TORRES, Camila dos Santos. **ESTUDO DA MOAGEM ALTA ENERGIA E SINTERIZAÇÃO DE METAL DURO WC-NI**. 2009. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

VILLARES METALS. **AÇOS PARA TRABALHO A QUENTE - VH13ISO**. [S. l.: s. n.], 2006.

Adaptado de: VERESHCHAKA, A. A.; BATAKO, A. D. L.; STOVA, E. S.; VERESHCHAKA, A. S. **NANOSTRUCTURED MULTILAYER COMPOSITE COATINGS ON CERAMIC CUTTING TOOLS FOR FINISHING TREATMENT OF HIGH-HARDNESS QUENCHED STEELS**. Metal Science and Heat Treatment, Londres, 25 jan. 2016.

VIEIRA, Gabriela Heimbach; ALMEIDA, Sérgio Francisco Muller de. **ANÁLISE DE VIBRAÇÃO LIVRE DE FERRAMENTAS PARA USINAGEM EM ALTA VELOCIDADE**. Anais do 12o Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XII ENCITA, São José dos Campos, 19 out. 2006.

XAVIER, Fábio Antônio. **ASPECTOS TECNOLÓGICOS DO TORNEAMENTO DO FERRO FUNDIDO VERMICULAR COM FERRAMENTAS DE METAL-DURO, CERÂMICA E CBN**. 2003. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

Adaptado de: XIAO, Dai-Hong; HE, Yue-hui; LUO, Wei-hong; SONG, Min. **EFFECT OF VC AND NBC ADDITIONS ON MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF ULTRAFINE WC-10CO CEMENTED CARBIDES**. Science Press, China, 2009.