

FRESAMENTO DO AÇO SAE 4340 ENDURECIDO COM FERRAMENTAS DE CERÂMICA

Nilson Rodrigues da Silva

Jose Vitor Candido de Souza

Manoel Cléber de Sampaio Alves

Marcos Valério Ribeiro

UNESP – Universidade Estadual Paulista – Campus Guaratinguetá. Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333 - Portal das Colinas - Guaratinguetá/SP - CEP 12.516-410.

e-mail : nilson.rodrigues@unesp.br, jvc.souza@unesp.br, manoel.alves@unesp.br, marcos.valerio@unesp.br.

Resumo. O estudo avaliou o desempenho de dois tipos de ferramentas de corte a base de óxido de alumínio com adição de óxido de magnésio ($Al_2O_3 + MgO$) e outra com adição de óxido de zircônio ($Al_2O_3 + ZrO_2$), para fresar o aço SAE 4340 endurecido com 56 HRC. Utilizou-se como parâmetros de corte (dados de entrada): três velocidades de corte (V_c) 200; 300; 400 m/min, três avanços (f) 0,05; 0,10; 0,15 mm/rev) e duas profundidades (a_p) 0,10 e 0,20 mm. Os fatores de respostas (dados de saída) foram, a potência consumida, a emissão acústica, a vibração, as rugosidades (R_a) e (R_t) da peça usinada, o desgaste (V_b) e ensaios de vida dos insertos de cerâmica. Os dados levantados foram tratados com auxílio do software MATLAB 7.8 (R2009a) e software Minitab17. Os resultados encontrados na usinagem por fresamento sem retificação do aço SAE 4340 endurecido, indicam que as ferramentas de corte de cerâmica tanto as de alumina com adição de óxido de magnésio ($Al_2O_3 + MgO$) quanto e com adição de zircônio ($Al_2O_3 + ZrO_2$), podem ser aplicadas pois a qualidade da superfície obtida com as duas ferramentas foram compatíveis com o esperado.

Palavras chave: 1. Usinagem 2. Rugosidade 3. Monitoramento 4. Aço endurecido 5. Ferramenta de corte

1. INTRODUÇÃO

Dentre os processos de fabricação a usinagem é amplamente utilizada para obtenção de peças e componentes com elevada qualidade e / ou grande precisão. Se entende por operação de usinagem a atividade para conferir a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda a combinação dos três itens, com remoção de material na forma de cavaco por uma determinada ferramenta e que é definido como sendo a porção de material da peça, retirada da ferramenta (FERRARESI, 2013, MACHADO et al., 2009). É difícil prever o que ocorre durante as operações de usinagem devido ao grande número de variáveis nelas envolvidas, fato este que nos leva continuamente a realizar estudos sobre os materiais empregados para fabricação das ferramentas de corte, buscando o prolongamento da sua vida, bem como obter melhoria econômica, estudando os parâmetros envolvidos, tais como as forças de corte, potência consumida e superfície final, entre outros (MACHADO et al. 2009 e SANTOS, 2010).

A maior parte dos produtos industrializados em alguma de suas etapas de produção passa por algum processo de usinagem e pode-se considerar que a usinagem é uma técnica muito utilizada para a fabricação de peças em geral, estando presente em vários segmentos industriais para obtenção de furos na indústria metal-mecânica, nos processos de melhoria da qualidade da superfície das peças, na fabricação de engrenagens para transmissão de potência, na confecção da maior parte dos componentes da indústria aeroespacial, na fabricação de pinos médico odontológicos e lentes de contatos intraoculares. As operações de usinagem podem ser aplicadas em diversos tipos de materiais além dos materiais metálicos, tais como polímeros, madeiras, cerâmicos e compósitos.

O estudo da usinagem de materiais é baseado nas propriedades mecânicas (atrito, deformação), na termodinâmica (calor) e nas características físicas, químicas e mecânicas dos materiais envolvidos e os parâmetros de usinagem são estabelecidos para cada tipo de material e ferramenta. As operações de usinagem são agrupadas de acordo com a máquina-ferramenta empregada, sendo estas subdivididas em desbaste e acabamento, no desbaste a principal preocupação é garantir elevada taxa de remoção do material e no acabamento a prioridade é a qualidade final do componente (MACHADO et al., 2009).

As propriedades de usinagem de um material são aquelas que expressam seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo, tais como vida da ferramenta, o acabamento da superfície da peça, os esforços e a temperatura de corte, a produtividade e as características do cavaco (VIGNEAU, 1997). De acordo com Pivetta (2005) os fatores a serem considerados para melhoria do desempenho econômico das operações de usinagem são vida da ferramenta, forças de corte, potência consumida e superfície final da peça. Dentre os processos de usinagem convencionais, os mais utilizados são: torneamento, fresamento, furação, aplainamento, mandrilamento, serramento, brochamento, roscamento e retificação, tendo como finalidade produzir peças dentro de especificações de forma, tamanho e acabamento ao menor custo possível.

De acordo com Ferraresi (2013) a seleção adequada do material para a ferramenta de corte influi na eficiência do processo de usinagem e o tipo de material a ser utilizado, depende de alguns fatores tais como: a natureza da operação de usinagem; o material a ser usinado; a forma e dimensões da própria ferramenta; condição da máquina ferramenta; custo do material para ferramenta; entre outros. Dos materiais utilizados para a fabricação de ferramentas de corte, muitas vezes, o que se sobressai em uma determinada propriedade é inferior nas outras, o que torna necessário buscar um equilíbrio entre elas. As características da ferramenta escolhida influenciam na quantidade de trocas de ferramentas, escolha das máquinas, tempos de fabricação, custo da mão de obra, entre outros fatores (XAVIER, 2003).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2008) as ferramentas podem ser classificadas de acordo com o material utilizado na sua fabricação sendo: aços-rápidos (HSS), aços-rápidos com cobertura, metal-duro, metal-duro com cobertura, cermet, cerâmica, nitreto cúbico de boro (CBN) e diamante (PCD). As primeiras ferramentas de material cerâmico são da década de 50, mas sua utilização se intensificou na década de 80, em decorrência do desenvolvimento de novos compostos cerâmicos, trazendo melhorias nas propriedades da cerâmica, que promoveu o desenvolvimento e fabricação de ferramentas com melhores propriedades em relação às anteriores (com maior tenacidade à fratura e menos frágeis) e mantendo sua boa resistência aos choques térmicos.

Em geral, as cerâmicas são caracterizadas e identificadas por algumas propriedades: são materiais refratários, capazes de suportar altas temperaturas sem perder resistência mecânica, possuem alta resistência ao desgaste em operações de usinagem, são materiais frágeis, têm baixa condutividade térmica, apresentam boa estabilidade química e térmica, possuem boa resistência à fluência, apresentam alta resistência à compressão e baixa resistência à tração. Graças estas propriedades as ferramentas cerâmicas destacam-se as como sendo uma solução promissora para redução dos custos nos processos de usinagem, principalmente nas indústrias aeronáuticas, aeroespaciais, petroquímica, automobilísticas e outras (MACHADO et al., 2009).

Entre as ferramentas de cerâmicas tem-se as constituídas basicamente de finos grãos de Al_2O_3 obtidos por sinterização com adição de MgO para inibir o crescimento dos grãos e outros materiais (aditivos) em quantidades pequenas, tais como como óxido de cromo, titânio e níquel, para aumentar a resistência mecânica e melhorar outras propriedades da cerâmica de alumina pura. Essas ferramentas possuem um alto grau de dureza, resistência ao desgaste e excelente estabilidade química e baixa tenacidade. Quando usadas na usinagem são, geralmente, no acabamento de materiais fundidos e em aços tratados superficialmente ou totalmente temperados. As primeiras ferramentas com adições apareceram nos anos 1970 e possuíam altos percentuais, podendo chegar a 30% de ZrO_2 e/ou TiC principalmente e ainda podendo conter TiN, TiO_2 e WC. Essas adições conferem à matriz de Al_2O_3 uma maior tenacidade e, às vezes, melhores propriedades térmicas para suportar maiores impactos mecânicos e choques térmicos, situações inerentes a certos processos de corte (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2008).

Um dos mais eficientes aditivos encontrados para sinterização do óxido de alumínio, que previne o crescimento descontínuo dos grãos e permite que o Al_2O_3 seja sintetizado até próximo de sua densidade teórica (ALVES, 2019). O efeito benéfico do MgO na sinterização da alumina, que em pequenos teores aumenta a taxa de sinterização devido a formação solução sólida pelo aumento da concentração dos defeitos pontuais. A densificação também é favorecida já que os coeficientes de autodifusão são proporcionais à concentração e a mobilidade dos defeitos. Ocorre a diminuição da mobilidade dos contornos de grãos e no tamanho dos grãos de alumina sintetizada, mas é importante salientar, não inibe o crescimento normal dos grãos, ele inibe o crescimento descontínuo dos grãos. A adição de zircônia (ZrO_2) no compósito de alumina, permite o aumento da tenacidade à fratura e consequentemente a ampla aplicação como ferramentas de corte em usinagens de materiais de usinabilidade baixa (ALVES, 2019).

Na usinagem dos materiais, um dos grandes desafios tem sido a usinagem dos materiais endurecidos e/ou pouco convencionais e as ferramentas de materiais cerâmicos tem contribuído para e melhoria dos processos de usinagem deste tipo de material, pois estas permitem o uso de parâmetros de usinagem com velocidades de corte altas, tendo como resultado um bom acabamento da superfície da peça. As Ferramentas cerâmicas de alumina podem ser consideradas como uma alternativa para o uso de ferramentas de metais duros, também utilizados na usinagem de aços em condições endurecidas (TONELO, 2009). Define-se aço no estado endurecido como sendo todo aço cuja dureza seja superior a 45 HRC, sendo que no caso do aço essa dureza é obtida geralmente com tratamentos térmicos objetivando obter alterações de características mecânicas dos materiais devido a finalidades pré especificadas (ELBESTAWI et al., 1996).

Segundo Anazawa et al. (2012), o aço SAE 4340 é denominado aço elevada temperabilidade, cuja dureza seja superior a 45 HRC (ELBESTAWI et al., 1996). Foi desenvolvido para estruturas de grande porte e componentes que exigem elevada resistência mecânica e tenacidade e não apresenta aumento de peso nas construções, quando comparado com outros aços de menor resistência. O aço SAE 4340 endurecido é também utilizado na indústria automobilística, aeronáutica para a fabricação de componentes com elevada solicitação e que exigem boa combinação de resistência e tenacidade, com valores relativamente uniformes em toda a seção, tais como, engrenagens de transmissão, eixos, acoplamentos, trens de pouso, virabrequins de automóveis, caminhões tratores, eixos, engrenagens, engrenagens planetárias, bielas, mangas, cilindros, entre outros. Essas propriedades são obtidas através do beneficiamento através de têmpera e revenimento (ANAZAWA et al., 2012).

Segundo Vivancos et al. (2004) para se obter condições de usinagem satisfatórias, é necessário que se tenha um bom conhecimento da microestrutura dos materiais envolvidos, dos efeitos sobre o comportamento das ferramentas de corte e sobre a eficiência dos processos de usinagem empregados. As propriedades de usinagem de um material são aquelas que

expressam seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo, tais como vida da ferramenta, o acabamento da superfície da peça, os esforços e a temperatura de corte, a produtividade e as características do cavaco (VIGNEAU, 1997).

Conhecer o processo e entender os mecanismos de desgaste das ferramentas é fundamental para que se chegue a uma ótima escolha, que representará economia e para tal deve-se adotar uma solução prática fundamentada em muitas experiências, ao invés de se procurar o impossível (MACHADO; SILVA, 2004). Estudos para desenvolvimento de ferramentas produzidas de cerâmicas de corte avançadas ainda é reticente, embora existam expectativas de ganhos na forma de redução significativa de tempos de usinagem e aumento da eficiência econômica (GARCIA, 2016).

Esta pesquisa é uma contribuição para o desenvolvimento de duas ferramentas de corte em material cerâmico a base de óxido de alumínio (Al_2O_3) uma delas com adição de óxido de magnésio ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$) e outra com adição de óxido de zircônio ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$) que foram criadas em escala não industrial, pelo grupo de pesquisa do Departamento de Materiais e Tecnologia. No estudo, foi avaliado o desempenho das ferramentas no fresamento de corpos de prova de aço SAE 4340 endurecidos, em condições de acabamento da superfície sem retificação, de geometria e custo – benefício mais próximas ou superiores às aquelas obtidos atualmente. O planejamento experimental adotado foi o arranjo ortogonal completo. No fresamento a seco, foram utilizados como fatores de entrada: 2 tipos de insertos ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$) e ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$), três velocidades de corte (200; 300; 400 m/min), três avanços (0,05; 0,10; 0,15 mm/rev), duas profundidades de usinagem (0,10 e 0,20 mm). Os fatores de resposta adotados (variáveis de saída) foram a rugosidade superficial (R_a e R_t), potência consumida (W), Vibração (mm/s), Emissão (V) e o desgaste da ferramenta (V_b).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Na Figura 1 é apresentado o fluxograma das atividades desenvolvidas durante esta pesquisa.

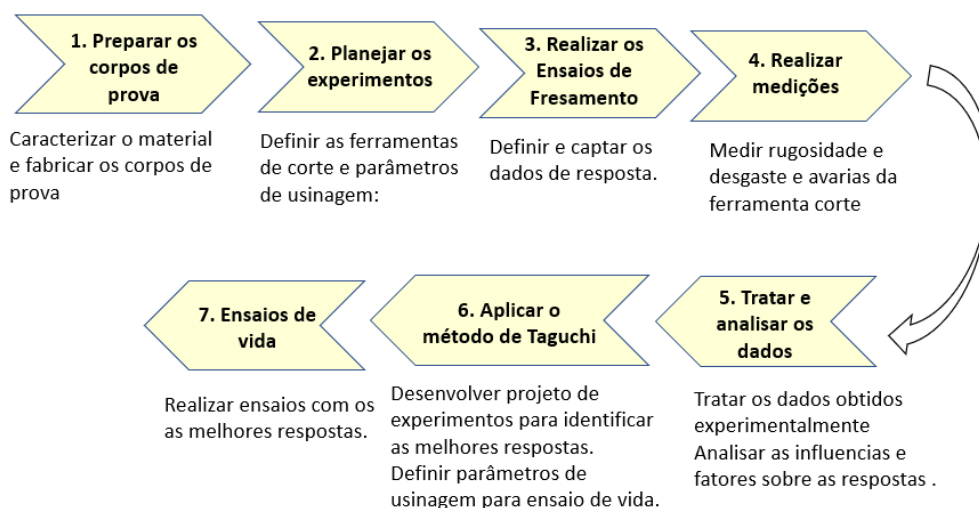


Figura 1 - Fluxograma das etapas de trabalho.

Os equipamentos utilizados pertencem ao Laboratório de Estudo da Usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia, sendo que para usinagem, utilizou-se um centro de usinagem marca DMG modelo DMU50ECO série DMG Ecoline com rotação máxima do fuso de 8000 rpm e potência de 17 kW (Fig. 2). Para fixação das ferramentas de corte, foi utilizado suporte SECO R217.29-1632 RE 063A com diâmetro de 50 mm (Fig. 2). Juntamente ao centro de usinagem instalou-se um sistema de aquisição de dados para captar os sinais de potência de corte, emissão acústica e vibração durante os processos de fresamento. O Sistema de aquisição de dados é composto de um módulo de canais acoplado a uma placa de aquisição de dados, modelo NI PCI 62220. Com o auxílio do software LABVIEW® 7.1 da National Instruments montou-se um programa supervisor, para adquirir os dados.

Para a aquisição da potência consumida do motor do centro de usinagem foram utilizados sensores de efeito Hall marca LEM modelo AT 100 B10. Na captação do sinal de emissão acústica foi utilizado o sensor modelo R15A e o amplificador de sinal modelo 1272-1000 com saída retificada em RMS (valor quadrático médio) do fabricante PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION. Para a aquisição dos sinais da vibração foi usado um módulo de vibração composto por um sensor piezelétrico (acelerômetro) e um amplificador de sinal com saída retificada em RMS, marca VIBRO CONTROL, modelo TV100.

Na medição da rugosidade, utilizou-se um rugosímetro portátil da marca Mahr modelo MarSurf M300, que era aferido e calibrado antes do início das medições.



Figura 2 – Centro de Usinagem e suporte de fixação dos insertos

Para avaliação e medição do desgaste e a avaria que a ferramenta sofreu, esta foi fixada em um suporte metálico para facilitar a visualização das superfícies de saída e de corte e foi utilizado um microscópio óptico de medição da Mahr modelo MarVision MM200), com deslocamento micrométrico. Para medição do desgaste (V_b/l_c em mm/mm) foi adotada a razão entre o desgaste de flanco e o comprimento de corte, pois foram utilizados avanços diferentes, permitindo compararmos os valores obtidos. As avarias encontradas foram medidas através da fixação da linha de referência no início do desgaste e em seguida esta mesma linha foi movida até o final do desgaste, e assim, a sua extensão foi determinada em milímetros. A cada ciclo efetuado no processo de usinagem foi determinado o desgaste e a avaria que a fresa sofreu durante o processo.

A captura de imagens e a verificação do tipo de desgaste ocorrido na ferramenta de corte, foi realizado utilizando um microscópio óptico da Zeiss modelo Stemi 2000, com sistema de captura e tratamento de imagem Image J. As imagens das superfícies de corte e de saída foram fotografadas e armazenadas. Para obtenção dos corpos de prova o aço SAE 4340, foi usinado para obter dimensões nominais de 25x70x100 mm e em seguida foi temperado e revenido com dureza pré-estabelecida de 56 HRC (615 HV).

Foram utilizados dois tipos de insertos de cerâmica experimentais à base de óxido de alumínio (Al_2O_3), criados pelo grupo de pesquisa do Departamento de Materiais e Tecnologia. A composição dos insertos eram para de $Al_2O_3 + MgO$: 99,75% em peso de Al_2O_3 , a partir de um pó de alumina α , e 0,25% em peso de óxido de magnésio (MgO) com partículas entre 0,40 - 0,60 μm de tamanho. A densidade relativa destas pastilhas é de 98,50 % (3,9242 g/cm³), resistência de 19,28 GPa, dureza de 1928,367 Vickers e $K_{ic} = 3,65 \pm 0,14$ % MPa.m^{1/2}, retração linear de $20,41 \pm 0,16$ % e peso de 4,0 g. Para o inserto de $Al_2O_3 + ZrO_2$: Composta de 99,00 % em peso de Al_2O_3 , a partir de um pó de alumina α , e 1,00 % em peso de óxido de zircônio (ZrO_2) com partículas entre 0,40-0,60 μm de tamanho. A densidade destas pastilhas é de 3,9488 g/cm³, resistência de 16,75 GPa, dureza de 1675,03 Vickers e $K_{ic} = 4,20 \pm 0,08$ % MPa.m^{1/2}, retração linear de $21,4 \pm 0,10$ %.

O procedimento experimental adotado resultou em 18 ensaios e 36 monitoramentos e medições nas duas trajetórias do percurso da ferramenta, 18 na ida (da esquerda para a direita) e 18 na volta (da direita para a esquerda). Os parâmetros de corte (fatores de entrada) escolhidos vieram de testes preliminares realizados com ferramentas de cerâmica experimentais para usinagem de material endurecido para obter qualidade da superfície por fresamento sem retificação posterior. Na Figura 3 esta apresentado os parâmetros do fresamento (fatores de entrada), sendo eles três velocidades de corte, três avanços e duas profundidades de corte e os fatores de resposta (variáveis de saída), sendo rugosidade superficial, potência (W), vibração (mm/s), emissão (V) e desgaste (V_b/l_c em mm/mm). O comprimento de amostragem (cut-off) adotado foi de 0,250 mm e o percurso de medição (lm) de 1,25 mm. Na Figura 4 está indicado os percursos da ferramenta de corte, a fixação do corpo de prova, a fixação e a posição dos sensores para aquisição dos sinais de emissão acústica e potência.

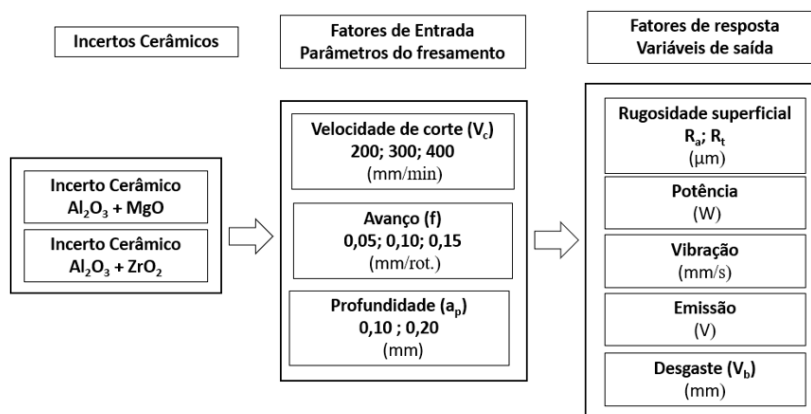


Figura 3 - Procedimento experimental com os fatores de entrada (parâmetros do fresamento) e os fatores de saída



Figura 4 - Fixação do corpo de prova e percurso da ferramenta e fixação e posição dos sensores

Depois de cada ensaio foi medida a qualidade superficial ao longo do comprimento da região fresada, tanto no percurso de ida quanto no percurso de volta da ferramenta de corte, por meio da rugosidade R_a (Rugosidade média) e R_t (Rugosidade Total). A medição dos desgastes de flanco foi realizada depois de cada ensaio com auxílio do microscópio da MAHR modelo MarVision MM200, com deslocamento micrométrico onde verificou-se por medição direta o desgaste de flanco máximo (VB máx.). Com o uso de um microscópio modelo Stemi 2000 da marca Zeiss contendo um sistema de captura de imagens e software do equipamento, possibilitando o registro do aspecto do desgaste e a realização de medidas e verificação de diversos pontos da superfície da ferramenta, foram realizadas capturas de imagens dos desgastes. Os dados foram tratados com programas desenvolvidos nos softwares LABVIEW® e MATLAB® R2015b student, criados grupo de pesquisa do Laboratório de Usinagem do Departamento de Materiais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Potência de usinagem

Considerou-se estatisticamente significativo os valores com nível de significância de 5% (Pvalue, menor que 0,05). Para a potência de usinagem, os níveis de significância para o tipo de ferramenta, velocidade de corte, avanço e profundidade foram significativos. O valor de potência de 241,4W para o inserto de $Al_2O_3 + MgO$ foi inferior ao de 279,2W para o fresamento com o inserto de $Al_2O_3 + ZrO_2$. A potência consumida é maior com o aumento da velocidade, do avanço e da profundidade de corte. Na Figura 5 estão ilustradas as médias das médias dos valores de potência de acordo com os parâmetros de corte utilizados e a combinação adequada para o menor consumo de potência no fresamento do aço SAE 4340 endurecido.

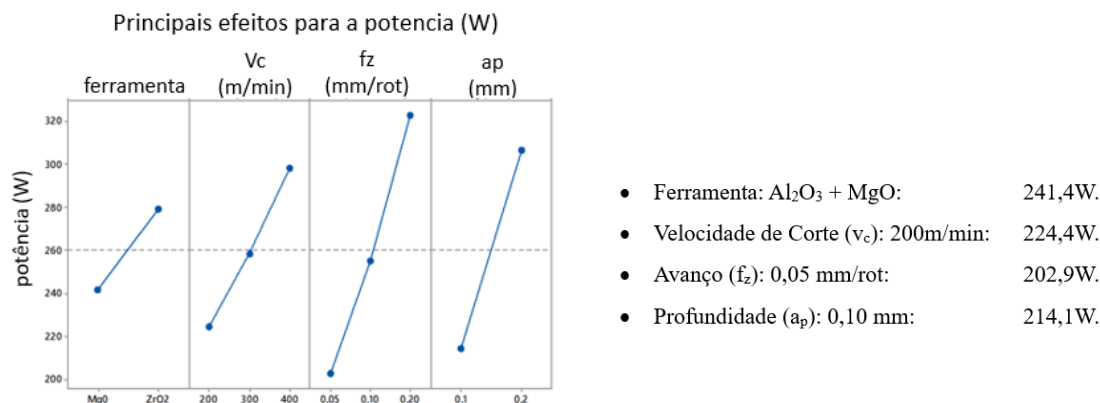


Figura 5 - Efeitos principais dos fatores na média das médias e o menor consumo de potência de corte (ANOM)

3.2 Emissão Acústica (V)

O nível de significância foi inferior a 5% apenas para a variável tipo de ferramenta. O valor de emissão para o inserto de $Al_2O_3 + ZrO_2$ foi de 0,150V e inferior ao valor de 0,156V para o inserto de $Al_2O_3 + MgO$. Os valores de emissão

acústica diminuíram com o aumento da velocidade de corte. Quanto ao avanço, o menor valor foi de 0,05 mm/rot com 0,149 V e o maior valor foi de 0,10mm/rot com 0,161V e de 0,153V para 0,20mm/rot. Verificou-se que aumentando a profundidade de corte ocorre o aumento dos valores de emissão. Na Figura 6 estão ilustradas as médias das médias dos valores de emissão acústica de acordo com os parâmetros de corte utilizados e a combinação adequada para o menores valores de emissão no fresamento do aço SAE 4340 endurecido.

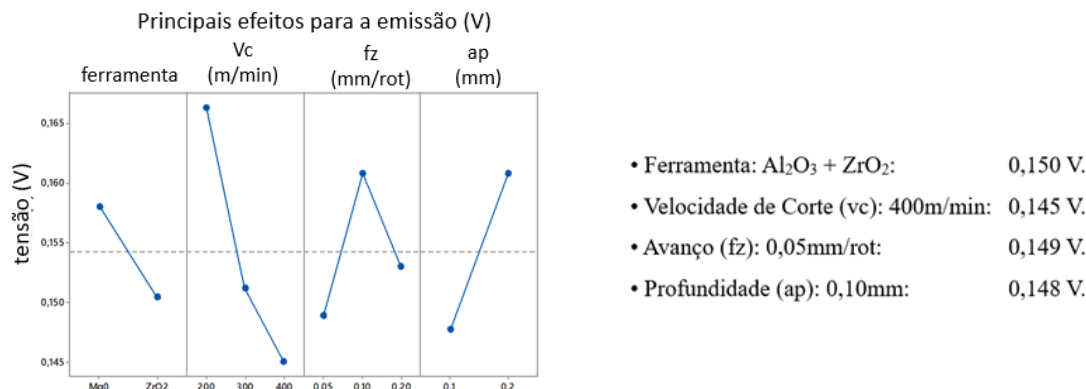


Figura 6 - Efeitos principais dos fatores na média das médias e os menores valores de emissão acústica (ANOM).

3.3 Vibração (mm/s)

O nível de significância foi inferior a 5% apenas para as variáveis tipo de ferramenta, avanço e profundidade de corte. O valor de vibração com o inserto de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$ foi de 3.780,5 mm/s e com o inserto de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ foi mais elevado com 5.047,4 mm/s. Com a aumento da velocidade de corte, do avanço e da profundidade, os valores de vibração diminuíram como pode ser observado na Figura 7.

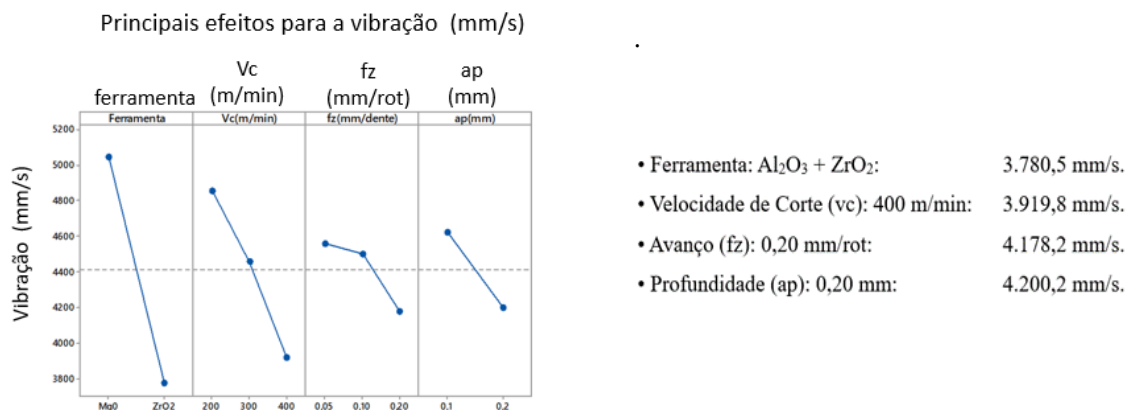


Figura 7 - Efeitos principais dos fatores na média das médias e a combinação adequada da vibração (ANOM)

3.4 Qualidade da superfície - rugosidade (Ra e Rt)

O nível de significância foi inferior a 5% apenas para as variáveis avanço e profundidade de corte tanto para os valores médios de rugosidade (Ra) quanto para a rugosidade (Rt). Os valores da rugosidade aumentaram com o aumento do avanço (fz) e profundidade de corte (ap). A rugosidade (Ra) com o inserto de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ foi de 0,753 μm e inferior ao de 0,957 μm obtido com o inserto de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$. Para a velocidade de corte de 300 m/min obteve-se o menor valor de rugosidade (Ra) que foi de 0,811 μm , para 200 m/min foi de 0,863 μm e para 400m/min o valor médio foi de 0,892 μm . A rugosidade (Rt) com o inserto de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ foi de 5,57 μm e inferior ao de 6,88 μm obtido com o inserto de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$. Os valores médios da rugosidade (Rt) aumentaram com a aumento das velocidades, do avanço e da profundidade de corte. Os valores médios de Ra e Rt obtidos para os menores valores de rugosidade (Ra) no fresamento do aço SAE 4340 endurecido, estão presentes na Figura 8.

A combinação adequada para os menores valores de rugosidade (Ra) no fresamento do aço SAE 4340 endurecido, ocorre quando se tem:

- Ferramenta: $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$: Ra: 0,753 μm e Rt: 5,570 μm .
- Velocidade de Corte (vc): 200 e 300 m/min: Ra: 0,811 μm e Rt: 5,780 μm .

- Avanço (f_z): 0,05 mm/rot:
- Profundidade (a_p): 0,10 mm:

Ra: 0,689 μm e Rt: 4,975 μm .
Ra: 0,736 μm e Rt: 5,270 μm .

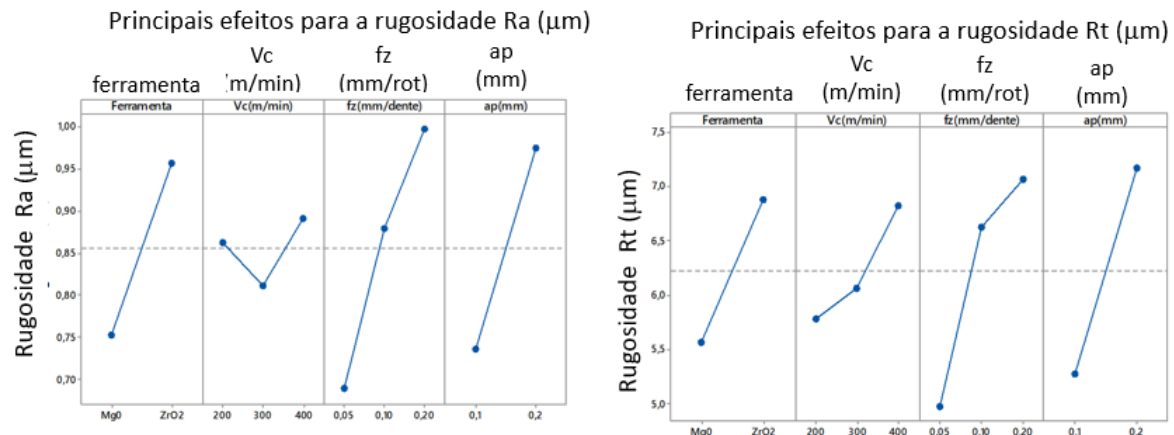


Figura 8 - Efeitos principais dos fatores na média das médias das rugosidades e combinação adequada Ra e Rt

3.5 Desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte (V_b/l_c)

O nível de significância foi inferior a 5% para todas as variáveis de entrada, tipo de ferramenta, velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Na Figura 9 estão os valores obtidos. O inserto de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ apresentou desgaste de 0,012mm/m e inferior a 0,016mm/m obtido com o inserto de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$. Os valores médios de desgastes aumentaram com a elevação da velocidade de corte, do avanço e da profundidade de corte, como pode ser verificado na Figura 9

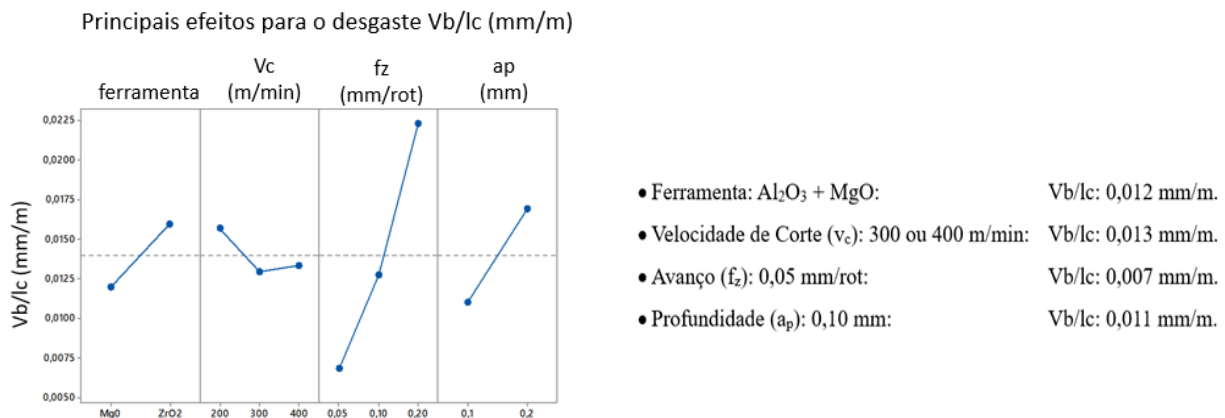


Figura 9 - Efeitos principais dos fatores na média das médias e a combinação adequada para o desgaste V_b/l_c

A potência consumida no fresamento do aço SAE 4340 endurecido com o inserto de alumina com adição de óxido de magnésio ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$) foi 13% inferior a consumida com o inserto de alumina com adição de zircônio ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$). Os valores de emissão para os dois tipos de insertos, alumina com adição de zircônio e alumina com adição de óxido de magnésio foram próximos com uma diferença entre eles de 3,8 %. O valor de vibração com o inserto de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$ foi 25,1 % inferior ao valor do fresamento com o inserto de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$.

Os menores valores de rugosidade (Ra) foram de 0,753 μm no fresamento com o inserto de alumina com adição de óxido de magnésio $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ e de 0,957 μm com o inserto de alumina com adição de óxido de zircônio ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$). Estes valores estão compatíveis com as indicadas para aplicação de peças retificadas que é entre 1,6 – 0,2 μm (Seco Tools AB, 2016).

O inserto de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ apresentou desgaste 25% inferior ao do inserto de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$.

4. CONCLUSÃO

Os resultados encontrados na usinagem por fresamento sem retificação do aço SAE 4340 endurecido, indicam que as ferramentas de corte de cerâmica tanto as de alumina com adição de óxido de magnésio ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$) quanto e com adição de zircônio ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$), podem ser aplicadas, pois as rugosidades (Ra) obtidas com a ferramenta de alumina

com adição de óxido de magnésio e com a ferramenta de alumina com adição de zircônio estão compatíveis com as indicadas. A rugosidade (R_t) com o inserto de alumina com adição de óxido de magnésio foi de $5,57\text{ }\mu\text{m}$ e inferior ao de $6,88\text{ }\mu\text{m}$ obtido com o inserto de alumina com óxido de zircônia.

O valor de potência de $241,4\text{ W}$ para o inserto de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ foi inferior ao de $279,2\text{ W}$ para o fresamento com o inserto de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$. A potência consumida é maior com o aumento da velocidade de corte, do avanço e da profundidade. Quanto a emissão, o valor de $0,150\text{ V}$ para o fresamento com o inserto de alumina com adição de óxido de zircônio foi ligeiramente inferior ao obtido com o inserto de alumina com adição de óxido de magnésio ($0,156\text{ V}$). Os valores de emissão diminuíram com o aumento da velocidade de corte.

Para a vibração o inserto de alumina com adição de óxido de zircônio ($3.780,5\text{ mm/s}$) foi inferior ao observado com a inserto de alumina com adição de óxido de magnésio ($5.047,4\text{ mm/s}$). Com a aumento da velocidade de corte, do avanço e da profundidade, os valores de vibração diminuíram.

O inserto de alumina com adição de óxido de magnésio, apresentou desgaste de $0,012\text{ mm/m}$ e inferior a $0,016\text{ mm/m}$ obtido com o inserto de alumina com adição de óxido de zircônio. Os valores médios de desgastes aumentaram com a elevação da velocidade de corte, do avanço e da profundidade de corte.

Serão realizados análises e estudos mais detalhados para determinar a vida das ferramentas com relação ao tempo e comprimento de corte, para caracterizar os desgastes das arestas de corte.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a ALMATIS, a VILLARES METALS e a SECO TOOLS pelos insumos doados. O presente trabalho foi realizado com apoio da FAPESP e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001.

6. REFERÊNCIAS

- Alves M.C.S., 2019. Análise do processo de torneamento do aço AISI 4340 temperado e revenido através de ferramentas cerâmicas de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ experimentais. Departamento de Materiais e tecnologia - UNESP
- Anazawa M. R., Abdala J. A., Hashimoto T., Pereira S. M. 2012. Estudo comparativo das propriedades mecânicas em aços 4340 e 300M submetidos a tratamentos térmicos isotérmicos e intercríticos. Artigo Doi: 10.17563/rbav.v31i1-2.918. Revista Brasileira de Aplicações Vácuo, v.31 n.1-2, 2012 32-37.
- Diniz, A. E., Coppini, N. L. E.; Marcondes, F. C., 2008. Tecnologia da usinagem dos materiais. 6ª edição Editora M.M, São Paulo, 262f.
- Elbesrawi, M. A., Gao D., Wardaby TI EI., 1996. Tool condition monitoring in drilling using vibration signature analysis. International Journal of Machine Tools. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(95\)00058](https://doi.org/10.1016/0890-6955(95)00058).
- Ferraresi, D., 2013. Fundamentos da usinagem dos metais. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 16ª reimpressão, p. 751.
- Garcia, U. e Ribeiro, M.V., 2016. *Ti6Al4V titanium alloy end milling with minimum quantity of fluid technique use. Journal of Materials and Manufacturing Processes*, v.31,n.7,pp. 905-918. <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1048367>
- Machado A. R., Silva. M., 2004 Usinagem dos Metais, 8ª. edição., Publicação interna Universidade Federal de Uberaba – UFU. Departamento de Engenharia Mecânica 258p.
- Pivetta, C. S., 2005. Uma contribuição ao estudo do fresamento do aço endurecido com fresa de topo esférico. 110f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade de Campinas – UNICAMP, 2005.
- Machado, A. R.; Abrão, A. M; Coelho, R.T.; Silva, M. B., 2009 Teoria da usinagem dos materiais. 1ª. edição Editora Blucher, São Paulo, 371p.
- Santos, J. C., 2010. Estudo do uso de ferramentas cerâmicas na usinagem de Inconel 718. 65f. Dissertação (Mestrado) Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.
- Seco Tool AB. Tecnologia de Fresamento. Sorocaba, 2016.
- Vigneau, J., 1997. Obtendo alta produtividade na usinagem de ligas de titânio e superligas. Revista Máquinas e Metais, v. 32 (380), p. 16 – 32.
- Xavier, A. F., 2003. Torneamento do ferro fundido vermicular com ferramentas de metal duro, cerâmica e cbn. 144f. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina – Engenharia Mecânica,