

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FELIPE BERTOLOTTI SAVELLA

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DINÂMICAS DE
USINAGEM NO TORNEAMENTO SOBRE A
INTEGRIDADE SUPERFICIAL DE UM AÇO
ENDURECIDO

SÃO CARLOS -SP

2021

FELIPE BERTOLOTTI SAVELLA

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DINÂMICAS DE USINAGEM NO TORNEAMENTO
SOBRE A INTEGRIDADE SUPERFICIAL DE UM AÇO ENDURECIDO

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de São Carlos
para obtenção do título de mestre em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Armando Ítalo
Sette Antonialli

São Carlos-SP

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Felipe Bertolotti Savella, realizada em 17/03/2021.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Armando Ítalo Sette Antonialli (UFSCar)

Prof. Dr. Gustavo Franco Barbosa (UFSCar)

Prof. Dr. Daniel Iwao Suyama (UNICAMP)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado à minha mãe Sílvia, meu pai Francisco e meu irmão Fabiano, pelo apoio incondicional e pela confiança em minha jornada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me proporcionar saúde e permitir me desenvolver e ao Padre Donizetti, por sempre interceder em meus pedidos e agradecimentos.

Ao meu grande orientador, professor, mestre, chefe e principalmente amigo Dr. Armando Ítalo Sette Antonialli, pelos ensinamentos e pela leveza invejável de uma trajetória de mestrado tranquila e de qualidade.

Ao Prof. Dr. Bruce, pela paciência, pelo apoio, por toda disponibilidade e criatividade em planejar os ambientes de estudo.

Ao professor e coordenador Dr. Carlos Eiji Hirata Ventura e a todos os envolvidos no programa de mestrado pela oportunidade de estudo.

Aos funcionários da instituição Leonildo, Djalma, Rover e José, pela ajuda nos processos do estudo.

Aos companheiros de turma Bruno, Aristóteles, Denny, Michele, Tiago e Leones, por sempre apoiar a continuidade dos estudos e participarem das discussões de desenvolvimento e criatividade.

Aos meus amigos Mateus de Paula, Josmar Medrado, Eder Zampar, Lucas Flória, Viviane Ribeiro, Luza Bernart e Larissa Gonçalves, pelo apoio e confiança em todos os processos do curso.

Às empresas Villares Metals e Tecplus Ferramentas (distribuidor autorizado da Sandvik Coromant), pelo fornecimento de insumos e apoio técnico-financeiro.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

“Ticking away the moments that make up a dull day
You fritter and waste the hours in an offhand way
Kicking around on a piece of ground in your home town
Waiting for someone or something to show you the way”

Pink Floyd – Time

RESUMO

Diversos autores têm se dedicado a investigar a dinâmica de operações de usinagem a partir de diferentes escopos. Esse tipo de estudo é especialmente valioso em se tratando de condições de acabamento, pois as vibrações em processo podem afetar significativamente a integridade superficial dos componentes usinados. O torneamento de aços no estado endurecido tem ganhado espaço na indústria metalmeccânica como substituição a processos abrasivos. Nesse caso, de fato, o monitoramento de vibrações e o controle de diferentes parâmetros de rugosidade são extremamente importantes, pois podem influenciar inclusive o comportamento mecânico dos componentes em questão. Este trabalho contém uma investigação acerca da influência de algumas condições de usinagem sobre a vibração da ferramenta e a integridade superficial da peça em torneamento duro. Para isso, foi confeccionado um corpo de prova de aço ferramenta para trabalho a quente tipo H13 no estado temperado e revenido segmentado em colos. Os procedimentos experimentais estão divididos em duas etapas: fase 1 e fase 2. Na primeira, utilizou-se um torno convencional, ferramenta negativa e, como fatores de influência, a rotação do eixo-árvore, o avanço e a posição do colo em usinagem. Os sinais de vibração, medidos por pastilhas piezoelétricas, não foram capazes de inferir qualquer influência; por outro lado, o acelerômetro triaxial indicou a influência do avanço. Os parâmetros de rugosidade, avaliados em microscópio confocal, por sua vez, denotaram a influência da posição do colo em usinagem. Nos ensaios da Fase 2, foi empregado um torno CNC, ferramenta positiva e acelerômetros piezoelétricos, que apontaram para uma maior influência da rotação e do avanço sobre a vibração da ferramenta. Os parâmetros de rugosidade mostraram efeito da rotação e da posição do colo em usinagem. Em razão dos resultados obtidos, conclui-se que essa abordagem pode contribuir de forma consistente no aprimoramento do planejamento de processos envolvendo a usinagem de aços endurecidos. Como sugestões para trabalhos posteriores, destacam-se o estudo da influência das condições dinâmicas de usinagem sobre o comportamento mecânico dos componentes usinados e a avaliação dos sinais de vibração no domínio da frequência para possibilitar a identificação da ocorrência do fenômeno de *chatter*.

Palavras-chave: Processos de fabricação. Torneamento duro. Aço ferramenta. Vibração. Rugosidade.

ABSTRACT

Several authors have dedicated themselves to investigating the dynamics of machining operations from different scopes. This type of study is especially valuable when it comes to finishing conditions, as the vibrations in process can significantly affect the surface integrity of the machined components. Turning of steels in the hardened state has gained ground in the metalworking industry as a substitute for abrasive processes. In this case, in fact, monitoring vibrations and controlling different roughness parameters are extremely important, as they can even influence the mechanical behavior of the components in question. This work contains an investigation about the influence of some machining conditions on the vibration of the tool and the surface integrity of the part in hard turning. For this, a specimen of tool steel for hot working type H13 was quenched and tempered made in segmented laps. The experimental procedures are divided into two stages: preliminary tests and new tests. In the former, a conventional lathe was used, a negative tool and, as influencing factors, the rotation of the spindle, the feed and the position of the lap in machining. The vibration signals, measured by piezoelectric tablets, were not able to infer any influence; on the other hand, the triaxial accelerometer indicated the influence of the advance. The roughness parameters, evaluated in a confocal microscope, in turn, showed the influence of the lap in machining. In the new tests, a CNC lathe, positive tool and piezoelectric accelerometers were used, which pointed to a greater influence of rotation and feed on the vibration of the tool. The roughness parameters show the effect of rotation and the position of the lap when machining. In view of the results obtained, it is concluded that this approach can consistently contribute to the improvement of process planning involving the machining of hardened steels. As suggestions for further work, we highlight the study of the influence of dynamic machining conditions on the mechanical behavior of machined components and the evaluation of vibration signals in the frequency domain to enable the identification of the occurrence of the chatter phenomenon.

Keywords: *Manufacturing processes. Hard turning. Tool steel. Vibration. Roughness.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquemas dos tipos de vibrações. (a) Livre; (b) Forçada; (c) Autoexcitada.	16
Figura 2. Representação das rugosidades (a) Ra , (b) Rz , (c) Rsk e (d) Rku	22
Figura 3. (a) Esboço (b) Corpo de prova.	28
Figura 4. (a) Porta-ferramentas DSSNL 2020 K12 (b) Inserto SNMG 120404-PM GC4225.	29
Figura 5. Posições definidas para o corpo de prova.	29
Figura 6. (a) Transdutor piezoelétrico (b) Acelerômetro triaxial.	31
Figura 7. Fixação dos transdutores piezoelétricos e do acelerômetro triaxial.	31
Figura 8. (a) Chassi cDAQ-9178 (b) Módulo de tensão elétrica NI-9201.	31
Figura 9. Corpo de prova atualizado para Fase 2.	33
Figura 10. (a) Insertos VCGT 160404EN-SF TCM407 (b) Porta-ferramentas Ceratizit SVJCR 2525 M16.	34
Figura 11. (a) PCB 333B30 (b) Acelerômetros instalados.	35
Figura 12. Módulo de entrada de som e vibração NI-9234.	36
Figura 13. Exemplo de sinais coletados: (a) pelos PZT e (b) pelo acelerômetro triaxial.	37
Figura 14. Exemplo de superfície do material após usinagem: (a) projeção e (b) aspecto tridimensional.	38
Figura 15. RMS x para (a) 475 rpm (b) 600 rpm e (c) 750 rpm.	41
Figura 16. RMS y para (a) 475 rpm (b) 600 rpm e (c) 750 rpm.	42
Figura 17. Modelo de viga biapoiada.	44
Figura 19. Ra para (a) 475 rpm (b) 600 rpm e (c) 750 rpm.	46
Figura 20. Rz para (a) 475 rpm (b) 600 rpm e (c) 750 rpm.	47
Figura 21. (a) Sinais de vibração do processo #2_2 (b) Superfície de corte.	49
Figura 22. $A1$ (RMS) para (a) 200 rpm e (b) 250 rpm.	51
Figura 23. $A2$ (RMS) para (a) 200 rpm e (b) 250 rpm.	52
Figura 24. Ra para (a) 200 rpm e (b) 250 rpm.	53
Figura 25. Rz para (a) 200 rpm e (b) 250 rpm.	54
Figura 26. Rsk para (a) 200 rpm e (b) 250 rpm.	55
Figura 27. Rku para (a) 200 rpm e (b) 250 rpm.	56
Figura 28. Ponta do inserto do ensaio (a) #1, (b) #2, (c) #3 e (d) #4.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classes de rugosidade (Ra).....	23
Tabela 2. Composição química H13 (% em massa).	27
Tabela 3. Planejamento experimental fatorial 3^3 completo.....	30
Tabela 4. Dados típicos para um experimento de fator único.	32
Tabela 5. Variáveis do planejamento fatorial aplicadas em dois níveis.....	34

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. ANOVA PZT1 (Fase 1).....	38
Quadro 2. ANOVA PZT2 (Fase 1).....	39
Quadro 3. ANOVA Acel. X (Fase 1).	39
Quadro 4. ANOVA Acel. Y (Fase 1).	40
Quadro 5. ANOVA Acel. Z (Fase 1).	40
Quadro 6. ANOVA Ra (Fase 1).....	44
Quadro 7. ANOVA Rz (Fase 1).	44
Quadro 8. ANOVA Rsk (Fase 1).	45
Quadro 9. ANOVA Rku (Fase 1).	45
Quadro 10. ANOVA A1 (Fase 2).	57
Quadro 11. ANOVA A2 (Fase 2).	57
Quadro 12. ANOVA Ra (Fase 2).	58
Quadro 13. ANOVA Rz (Fase 2).	58
Quadro 14. ANOVA Rsk (Fase 2).	58
Quadro 15. ANOVA Rku (Fase 2).	59

SUMÁRIO

1. Introdução.....	13
1.1. Justificativas	14
1.2. Objetivos	14
2. Revisão da literatura.....	15
2.1. Vibrações de sistemas mecânicos	15
2.2. Integridade superficial	20
2.2.1. Rugosidade	21
2.2.2. Tensões residuais	23
2.2.3. Propriedades mecânicas.....	24
3. Materiais e métodos.....	27
3.1. Fase 1	27
3.2. Fase 2	32
4. Resultados e discussão	37
4.1. Fase 1	37
4.2. Fase 2	49
5. Conclusões	61

1. INTRODUÇÃO

Diversos autores dedicados ao estudo da dinâmica de usinagem destacam o efeito danoso de vibrações excessivas sobre desgastes e avarias da ferramenta, além da qualidade dos componentes produzidos. Antonialli, Diniz e Pederiva (2010) verificaram que vibrações associadas a frequências entre 400 e 1000 Hz produziam microlascamento e reduziam drasticamente a vida de ferramenta no fresamento frontal da liga de titânio Ti-6Al-4V, empregada comumente na indústria aeroespacial.

Galarza *et al.*, (2020) desenvolveram uma ferramenta com um sistema de amortecimento por impacto e verificam a eficácia desse sistema aplicado à ferramenta de corte em operações de fresamento de alta velocidade em aço temperado e revenido. Os resultados de rugosidade da peça e variação das forças de corte mostraram diferenças significativas ao usar a ferramenta com e sem o amortecedor de impacto. A principal conclusão foi que o uso do sistema de amortecimento foi realmente eficaz para diminuir a vibração. Totis *et al.*, (2014) desenvolveram um algoritmo inovador para avaliação de estabilidade capaz de agilizar o monitoramento da vibração em operações de fresamento, sendo muito útil para viabilizar a prevenção de avarias da ferramenta inclusive em ambiente industrial.

No entanto, também é reportada a influência benéfica de processos de acabamento caracterizados por condições dinâmicas sobre a resistência à fadiga dos produtos. Yasuoka *et al.*, (2013), por exemplo, verificaram o aumento da resistência à fadiga do aço inoxidável SUS304 utilizando um processo ultrassônico com nanocristal (UNSM, do inglês *ultrasonic nanocrystal surface modification*) e aplicando diferentes cargas estáticas para encontrar a condição de tratamento ideal em que a vibração do processo produziu a transformação martensítica por deformação plástica nessa camada nanocristalina.

Neste trabalho, propõe-se investigar a influência da dinâmica de usinagem sobre a integridade superficial do componente usinado em acabamento, considerando o torneamento de um aço endurecido, levando em consideração o efeito das condições de usinagem sobre esse contexto.

Na sequência desta primeira seção, denominada “Introdução”, são apresentadas “Justificativas” pertinentes ao trabalho, bem como “Objetivos” geral e

específicos. A segunda seção versa sobre a “Revisão da literatura”, contemplando definições importantes sobre “Vibrações de sistemas mecânicos”, com ênfase em trabalhos envolvendo dinâmica de usinagem, e também as diferentes concepções no que se refere à “Integridade superficial”: rugosidade, tensões residuais e propriedades mecânicas.

1.1. JUSTIFICATIVAS

Com o intuito de analisar a influência da vibração no processo de torneamento em um corpo de prova segmentado em 9 colos, notou-se uma maior variabilidade de resultados nos testes da fase 1 em razão da variação da posição em que cada colo se encontrava. Após esses resultados, ficou clara a necessidade de um estudo focado primeiramente no efeito da distância de corte em relação a placa fixadora da peça no torno. Dessa forma, o plano de estudo definitivo passou a ser a análise da influência dessa distância, juntamente com a vibração de cada processo, em relação à rugosidade da peça.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral desta dissertação de mestrado é avaliar a relação entre a resposta vibratória em processo durante uma operação de torneamento em condições de acabamento sobre a integridade superficial de aços ferramenta endurecidos. Tais materiais são de importância estratégica na indústria de moldes e matrizes. Motivado pela oportunidade da criação de um conteúdo científico relevante para a área de engenharia e otimização da ferramentaria, o estudo tem como objetivos específicos:

- Investigar o efeito das condições de usinagem sobre a vibração do sistema complexo constituído de máquina operatriz, ferramenta de corte, dispositivos de fixação e peça;
- Comparar o desempenho de diferentes sensores de vibração; e
- Verificar a influência dessas mesmas condições sobre o estado de superfície dos componentes fabricados, com destaque para parâmetros de rugosidade.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Esta seção contempla o estado da arte envolvendo trabalhos na área de usinagem relacionados a “Vibrações de sistemas mecânicos” e “Integridade superficial”.

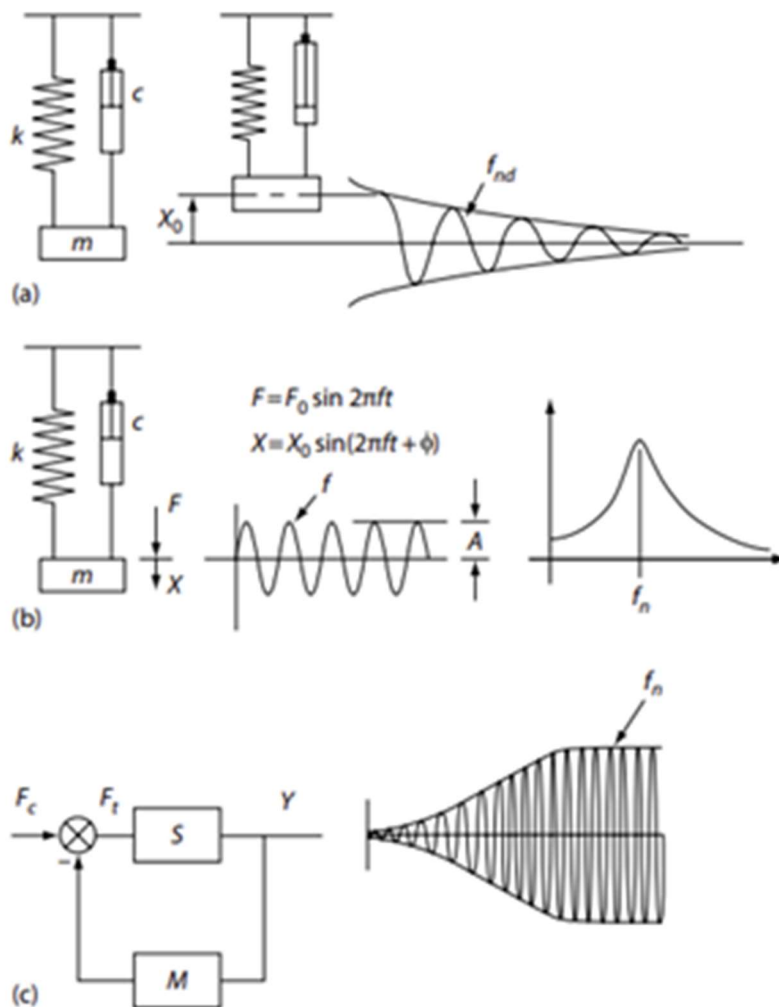
2.1. VIBRAÇÕES DE SISTEMAS MECÂNICOS

As máquinas-ferramenta estão sujeitas a três tipos básicos de vibração: vibrações livres, forçadas e autoexcitadas (Agapiou *et al.* 2016). Segundo esses autores, vibrações livres ou naturais ocorrem quando o sistema estável é deslocado de sua posição de equilíbrio por choque; neste caso, o sistema vibrará e retornará à sua posição original conforme suas características estruturais.

Uma vibração forçada (Figura 1) ocorre quando uma força de excitação dinâmica é aplicada à estrutura. Essas forças são comumente induzidas por

- forças de corte alternadas, como aquelas induzidas por falta de homogeneidade no material da peça (ou seja, pontos duros, superfícies fundidas, etc.), borda superior (que se forma e quebra periodicamente), forças de corte que variam periodicamente devido a mudanças na seção transversal do cavaco ou variações de força no corte interrompido (ou seja, no fresamento ou torneamento de uma peça não arredondada ou ranhurada);
- fontes internas de vibrações, tais como distúrbios na peça de trabalho e acionamentos da ferramenta de corte (causados por componentes desgastados, ou seja, falhas de rolamento, defeitos nas engrenagens e instabilidade do fuso ou corredeiras), desbalanceamento de componentes rotativos (membros rotativos desequilibrados, ou seja, massas no fuso ou transmissão), cargas dinâmicas geradas pela aceleração/desaceleração ou reversão do movimento de componentes móveis massivos; ou
- distúrbios externos transmitidos pela fundação da máquina.

Figura 1. Esquemas dos tipos de vibrações. (a) Livre; (b) Forçada; (c) Autoexcitada.



Fonte: Agapiou *et al.* (2016).

Vibrações autoexcitadas, também denominadas *chatter*, são um fenômeno anômalo decorrente da realimentação do mecanismo formador de cavaco durante o processo de usinagem, de maneira que um dos modos estruturais da máquina-operatriz, da ferramenta ou da peça seja excitado pela dinâmica de usinagem (Altintas, 1982). Esse tipo de vibração, conhecido como trepidação, é mais frequentemente induzido por variações na força de usinagem (causadas por mudanças na velocidade de corte ou na seção transversal do cavaco), que aumenta em amplitude ao longo do tempo em razão do circuito fechado de efeito regenerativo (Agapiou *et al.* 2016). *Chattering* é o tipo de vibração menos desejável, porque a estrutura entra em uma condição de vibração instável. A rigidez de ferramenta, fuso, peça de trabalho, peça e fixação são fatores importantes na definição da estabilidade do processo. A rigidez de corte do material da peça também é um fator importante;

por exemplo, os aços têm uma tendência maior do que o alumínio para causar trepidação. As condições de corte e parâmetros de entrada afetam muito o início da vibração. Além disso, por ser um fenômeno complexo e tipicamente não linear, a vibração pode ocorrer apenas sob certas condições aparentemente aleatórias e pode ir e vir esporadicamente. A eliminação de uma vibração específica em um processo de usinagem pode ser um exercício trabalhoso e, frequentemente, só pode ser realizada reduzindo a produtividade em se tratando de fusos convencionais.

Se nenhuma energia for perdida ou dissipada por atrito ou outra resistência durante a oscilação, a vibração é conhecida como vibração não amortecida. Todavia, se qualquer energia for perdida dessa maneira, ela é denominada vibração amortecida. Em muitos sistemas físicos, a quantidade de amortecimento é tão pequena que pode ser desprezada para a maioria das finalidades de engenharia. Contudo, considerar o amortecimento torna-se extremamente importante na análise de sistemas vibratórios próximos à ressonância. (Rao, 2009).

Com isso, é sabido que as vibrações podem causar avarias no material usinado ou na ferramenta de corte. O desgaste da ferramenta de corte é um fenômeno crítico que influencia a qualidade da peça usinada. Para simular o desgaste da ferramenta, Chelladurai, Jain e Vyas (2008) criaram um desgaste de flanco artificial usando o processo de eletroerosão (EDM, do inglês *electrical discharge machining*) e os testes foram realizados com insertos de metal duro revestidos. Para analisar a resposta do sistema, foram utilizadas combinações variáveis de velocidades de corte, profundidades de usinagem e avanço, e os dados de vibração e deformação durante o processo de corte foram registrados usando dois acelerômetros. A análise da influência de cada parâmetro na qualidade superficial da peça foi feita através da análise de variância (ANOVA) e concluíram que o monitoramento de vibração e deformação durante a operação de torneamento pode ser útil para prever o desgaste do flanco com as diferentes combinações desses parâmetros.

Aguiar, Diniz e Pederiva (2013) estudaram como minimizar a vibração no fresamento de aços endurecidos ANSI H13 para produzir moldes com cavidades profundas e/ou com pequeno raio de canto utilizando ferramentas inteiriças ou de insertos intercambiáveis com diferentes diâmetros e ainda assim obter uma boa rugosidade e maior vida útil da ferramenta. Foi medido o desgaste da ferramenta, a rugosidade da peça e a força de usinagem. A ferramenta não foi danificada de forma

crítica, seu desgaste foi mínimo. Correlacionando esses parâmetros com a função de resposta em frequência (FRF) obtida com as ferramentas fixadas no eixo-árvore da máquina-operatriz, os autores concluíram que a ferramenta resistiu as vibrações do processo com uma longa vida útil e uma rugosidade esperada para a peça.

Analisando o amortecimento no torneamento interno de materiais endurecidos, Thomas *et al.*, (2019) destacaram que para torneiar furos profundos é importante encontrar um método que mantenha o corte estável e que reduza ao máximo os danos causados pelo desgaste da ferramenta, a fim de obter uma boa rugosidade da peça. Os corpos de prova foram confeccionados em aço AISI 4340 temperado e revenido com dureza variando de 54 a 59 HRC, enquanto a ferramenta consistia de insertos de nitreto cúbico de boro (CBN). A vibração da ferramenta foi medida por meio de um acelerômetro piezoelétrico preso ao porta-ferramenta posicionado de forma a medir a vibração na direção radial em relação à peça. Durante esses experimentos, o corte foi interrompido a cada 3 minutos de tempo de corte para realizar medições de desgaste de flanco da ferramenta e rugosidade da superfície da peça. Após o torneamento, os autores concluíram que à medida que o balanço da ferramenta aumenta, a rugosidade da superfície da peça e a vibração da ferramenta se mantiveram quase constantes até o ponto onde aumentavam repentinamente (limite de estabilidade). Observou-se que a vibração da ferramenta obtida com a barra amortecedora de impacto foi muito menor do que a vibração obtida com a barra sólida, mesmo quando o corte era estável. Mesmo com essa diferença, as rugosidades superficiais obtidas com os dois tipos de barras foram semelhantes, comprovando que, até certo nível de vibração da ferramenta, ela não influenciava na rugosidade superficial. Concluíram também que a utilização do amortecedor de impacto da ferramenta com esferas viabilizava a usinagem de furos mais longos do que quando se utilizava uma barra maciça, sem prejudicar a rugosidade superficial e a vida útil da ferramenta, devido à sua capacidade de amortecimento e que o amortecedor de impacto de ferramenta testado apresentou-se como uma forma simples e barata de mitigar a vibração da ferramenta e, portanto, possibilitar um melhor torneamento interno de furos profundos.

O método de transformação de “wavelet packet” (ou WPT) decompõe um sinal de vibração em sinais independentes de frequência (Plaza e López, 2018). Esse método permite a localização de eventos transitórios que ocorrem durante o

monitoramento dos processos de corte, o que é vantajoso no diagnóstico de falhas. Os autores monitoraram a rugosidade média (R_a) utilizando um único sensor de controle numérico de baixo custo, aplicada aos componentes do sinal de vibração ortogonais (a_x , a_y , a_z), que foi acoplado na máquina-ferramenta, a fim de analisar a qualidade do acabamento superficial da peça. Os melhores resultados foram encontrados nas faixas de média frequência (6250 a 9375 Hz) e de alta frequência (9375 a 12500 Hz), e o componente de aceleração de alimentação a_y foi a principal fonte dessa informação. Finalmente, o WPT provou ser um método útil no processamento do sinal de vibração para monitorar a rugosidade e forneceu resultados satisfatórios, com uma melhoria significativa no monitoramento do acabamento da superfície.

Kumabe e Hachisuka (1984) combinaram vibrações ao mecanismo de corte usando um sistema de eixo principal com mancal aerodinâmico, de forma que a usinagem envolve uma força de corte pulsante contínua e sistemática. Como resultados das experiências, os autores desenvolveram um novo processo de usinagem cilíndrica e, adicionalmente, foi realizado um processo de acabamento ultrassônico, o que possibilitou o aprimoramento da usinagem e acabamento.

Ding *et al.* (2010) estudaram uma melhoria para a vibração na usinagem de aços endurecidos, com dureza entre 55 e 58 HRC, por meio de um método de controle de vibração bidimensional (VAMEM 2d) no fresamento. Concluíram que o referido método podia melhorar a superfície do material e reduzir o desgaste da fresa em comparação com o fresamento tradicional; sendo eficaz e passível de ser aplicado na fabricação de moldes e matrizes com eficiência.

Hessainia *et al.* (2013) analisaram o estado de superfície de um aço 42CrMo4 temperado e revenido torneado com uma ferramenta cerâmica mista de Al_2O_3/TiC levando em consideração combinações de três níveis diferentes dos parâmetros velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem. Os autores desenvolveram um modelo capaz de prever os parâmetros de rugosidade R_a e R_t do produto final a partir de ANOVA e da metodologia de superfície de resposta (ou RSM, do inglês *Response Surface Methodology*), concluindo que o avanço e a velocidade de corte são os principais fatores que afetam a rugosidade e que não foram observadas amplitudes de vibrações que exercesse influência sobre a superfície do material. Com base no RSM, os parâmetros ideais de torneamento para 42CrMo4 foram os

seguintes: velocidade de corte de 180 m/min, avanço de 0,08 mm e profundidade de corte de 0,15 mm.

Österlind, Daghini e Archenti (2017) destacaram os problemas das vibrações excessivas entre a máquina-ferramenta e ferramentas de corte nos processos de usinagem, fazendo uma comparação de fresamento entre dois corpos de prova com ligas diferentes e mesma geometria. Foram conduzidos testes de impacto, ensaios de usinagem e avaliação integridade da superfície. Como conclusão, mostraram que ferramentas semelhantes podem ter um desempenho diferente, dependendo do material usinado e sua microestrutura, e que o desempenho da usinagem pode ser significativamente melhorado ao selecionar materiais adequados ao processo.

Já, Vashisht e Peng (2019) destacaram as limitações que o fator de rigidez das barras de mandrilar impõe sobre a profundidade de corte e as possíveis vibrações do processo de usinagem. Os autores apresentaram uma modelagem dinâmica do processo de mandrilamento considerando três graus de liberdade, usando equações diferenciais de atraso com coeficientes periódicos de tempo. A estabilidade do sistema foi aprimorada com técnicas de controle ativo. Os autores destacaram que as vibrações transitórias também podem ser extintas em um período limitado de tempo usando este controlador. Concluíram que a aplicação do controle ativo possibilitou reduzir significativamente a vibração, de forma que a taxa de remoção de material podia ser aumentada e a profundidade crítica de usinagem podia ser aumentada de 0,2 mm, no controle em malha aberta, e para 0,6 mm, no controle em malha fechada.

Yuan *et al.* (2019) destacaram os problemas na usinagem de aço temperado e revenido pelas limitações impostas pela existência de vibrações no processo. Dessa forma, é estudada uma melhoria no processo de corte através de um processo de contra-vibração em um sistema de controle. Por fim, foi proposta uma estratégia de geração da vibração da ferramenta, de forma que as superfícies usinadas apresentaram alta consistência com os resultados da simulação.

2.2. INTEGRIDADE SUPERFICIAL

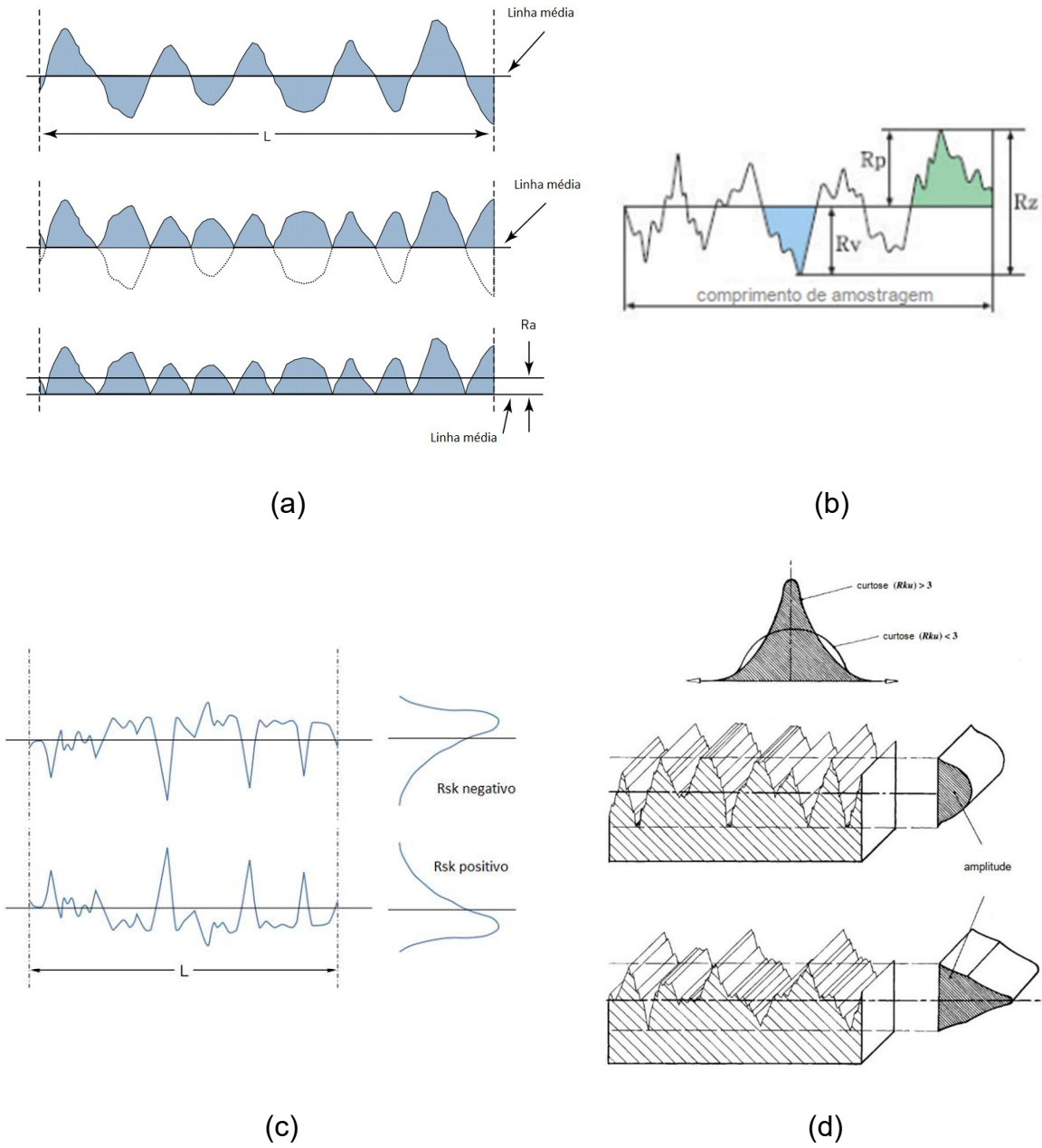
O estudo da integridade superficial do material usinado tornou-se objeto de intenso interesse porque os métodos tradicionais, não tradicionais e de pós-

tratamento usados para a fabricação em geral podem alterar as propriedades do material (Black & Kohser, 2008). Os autores relatam que a integridade superficial deve ser uma preocupação conjunta da fabricação e da engenharia, a fabricação deve equilibrar custo e a produtividade com os requisitos de cada projeto. É válido ressaltar que os vários processos de fabricação e acabamento conferem, cada um, propriedades distintas aos materiais que influenciarão o desempenho do produto. No próximo tópico falaremos de rugosidade que, segundo Neto (2012) consiste em erosões microscópicas deixadas pela ferramenta de corte após os processos de usinagem, por exemplo. Em razão dos avanços tecnológicos, torna-se cada vez mais importante o controle dos parâmetros de corte a fim de minimizar problemas ligados a atrito, ajuste e tolerâncias, que podem prejudicar o desempenho e diminuir a vida útil de uma peça. A análise da rugosidade é importante, pois contribui para verificar a integridade superficial do material, garantindo se a peça usinada pode apresentar falha durante sua utilização e fornece um parâmetro qualitativo do desempenho da ferramenta.

2.2.1. RUGOSIDADE

De acordo com Dagnall (2011) e representado na Figura 2, Ra é o valor médio aritmético do perfil da linha de referência ao longo do comprimento da amostra e é o parâmetro mais comumente utilizado na análise da textura superficial. Já, Rz consiste na medição de dez pontos dentro do comprimento de amostragem; os cinco picos mais altos e os cinco vales mais baixos são avaliados e o resultado é a altura média desses dez pontos. Grosseiramente, Rsk é descrito por um valor numérico que representa a assimetria da superfície, de forma que valores positivos significam vales largos, e valores negativos significam picos largos. Rku (curtose) fornece uma medida da nitidez da superfície, de forma que uma superfície com grande repetibilidade em relação ao comprimento de picos e vales é descrita com um alto valor de Rku e, uma superfície com grande variabilidade, com um baixo valor de Rku .

Figura 2. Representação das rugosidades (a) Ra , (b) Rz , (c) Rsk e (d) Rku .



Fonte: (a), (b) e (c) Dagnall (2011) e (d) Smith (1992).

Destacado na Tabela 1, temos uma tabela da ISO 1302 que apresenta valores determinando as classes de rugosidade média (Ra), sendo possível, dessa forma, determinar intervalos relevantes para estudos.

Tabela 1. Classes de rugosidade (Ra).

Valor de rugosidade (Ra)		Classe de rugosidade
μm	μin	
50	2000	N 12
25	1000	N 11
12,5	500	N 10
6,3	250	N 9
3,2	125	N 8
1,6	63	N 7
0,8	32	N 6
0,4	16	N 5
0,2	8	N 4
0,1	4	N 3
0,05	2	N 2
0,025	1	N 1

Fonte: ISO 1302 (2002).

E, para destacar a rugosidade cinemática, Machado *et al.* (2009) apontam que em uma operação de usinagem na qual a ferramenta é nova, existe pouco contato entre as superfícies. Através do exemplo da equação a seguir do cálculo da rugosidade média (Ra) no processo de torneamento, notamos a grande influência teórica do avanço no resultado superficial do material usinado, onde f é o valor de avanço e r_ϵ o raio de ponta da ferramenta.

$$R_a = \frac{f^2}{18\sqrt{3} \cdot r_\epsilon}$$

Os autores ainda afirmam que não ocorre vibração e não há formação de aresta postiça de corte, então, a rugosidade será, teoricamente, formada pelas marcas de avanço deixadas na peça pela ferramenta. Dessa forma, a análise da vibração com novas ferramentas passa a ser relevante.

2.2.2. TENSÕES RESIDUAIS

Rech *et al.* (2008) realizaram uma abrangente caracterização das tensões residuais das peças produzidas no torneamento sem fluido de corte de um aço para rolamento endurecido AISI 52100 usando ferramentas de CBN seguido de usinagem

abrasiva para o acabamento. As avaliações das tensões residuais foram feitas por meio da difração de raios-X. Os autores concluíram que o processo de acabamento melhora significativamente a integridade da superfície pela indução de fortes tensões residuais compressivas na camada externa e por uma grande melhoria da rugosidade.

Segundo Xueping, Erwei e Richard Liu (2009), o torneamento duro tem sido reconhecido como um substituto para processos abrasivos em razão de sua flexibilidade, benefício econômico e baixo impacto ambiental. É citado também que o mesmo pode induzir tensões residuais de compressão, que aumentam a vida em fadiga da peça. Neste artigo, foram investigados os parâmetros velocidade de corte, profundidade de usinagem e avanço na indução de tensão residual compressiva. Os parâmetros do processo foram definidos usando um planejamento experimental baseado na metodologia de Taguchi e as tensões residuais resultantes foram examinadas e avaliadas por difração de raios-X, com isso, foi determinado que a velocidade de corte tem o impacto mais significativo sobre a tensão residual, seguida pela profundidade de usinagem e, finalmente, pela taxa de avanço, concluindo que o controle desses parâmetros aumenta a vida útil da ferramenta e a qualidade superficial do material torneado.

Sharma e Pandey (2016) destacaram as variações de tensões residuais decorrentes da variação de avanço, profundidade de usinagem, velocidade de corte e intensidade da potência ultrassônica no processo de torneamento assistido por ultrassom em um aço AISI 4340. Utilizando ANOVA, o estudo mostrou que o avanço e a intensidade percentual da vibração ultrassônica, diretamente relacionada à amplitude da vibração do processo, foram os parâmetros significativos para a geração de tensão residual.

2.2.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS

Rech e Moisan (2003) estudaram a influência do avanço, da velocidade de corte e do desgaste da ferramenta em torneamento sobre a integridade superficial de engrenagens de aço endurecido 27MnCr5, tendo avaliado rugosidade e tensões residuais. Os autores apontam as limitações técnicas na produção em massa, destacando que engrenagens e peças de rolamentos, necessitam de precisão ao serem produzidas. Os processos de corte exercem uma influência direta na

integridade da superfície, esse processo de torneamento é interessante por produzir uma baixa rugosidade da superfície durante um longo tempo de corte e também para induzir tensões residuais de compressão ao usinar à baixa taxa de avanço e baixa velocidade de corte. O avanço é o principal parâmetro que influencia a rugosidade, enquanto a velocidade de corte é o principal parâmetro que influencia o nível de tensão residual.

Abrão e Aspinwall (1996) compararam várias condições de acabamento em torneamento com a retificação de aço temperado em termos de rugosidade, alterações microestruturais, alterações na microdureza, distribuição de tensões residuais e vida útil em fadiga. Os resultados sugerem que, para os parâmetros operacionais testados, as alterações microestruturais observadas foram confinadas a camada martensítica. Tensões residuais de compressão foram observadas após a retificação e a melhor resistência à fadiga foi obtida ao usinar utilizando insertos de CBN; em segundo lugar, torneamento usando ferramentas de alumina mista e, finalmente, a retificação.

Ding *et al.* (2010) analisaram experimentalmente os efeitos dos parâmetros de corte nas forças de corte e rugosidade no fresamento de aço AISI H13 com ferramentas de metal duro revestido. Empregaram o método de Taguchi na combinação dos parâmetros velocidade de corte, avanço, profundidade de corte radial e profundidade de corte axial. Através da ANOVA, verificaram que a profundidade axial de corte e o avanço são os dois fatores dominantes que afetam as forças de corte. Finalmente, concluem que as forças mínimas de corte podem ser obtidas sob a seguinte combinação de parâmetros: $v = 140$ m/min, $f = 0,04$ mm, $a_e = 0,5$ mm e $a_p = 1,0$ mm. A rugosidade média (R_a) fresada pode atingir menos de $0,25 \mu\text{m}$, o que justifica que o fresamento nessas condições pode ser utilizado como um processo de semi-acabamento, pelo menos.

Kumar e Pradhan (2018) apontaram os problemas de acabamento no torneamento de peças de aço com dureza superior a 45 HRC. Os autores destacaram que os principais parâmetros do processo para torneamento duro são velocidade de corte, avanço, profundidade de usinagem, baixo ângulo de cisalhamento, dureza da peça, diâmetro da peça e raio da ponta da ferramenta, sendo que os parâmetros de saída são rugosidade, taxa de remoção de material e consumo de energia. Relataram também que técnicas numéricas, como o método dos elementos finitos, podem ser

usadas para realizar análises térmicas e de vibração em torneamento duro.

Com ênfase nas vibrações no processo de torneamento, Panda *et al.* (2018) estudaram a qualidade do material da peça, a precisão das peças acabadas, a rugosidade e o desgaste da ferramenta. Os autores monitoraram o desgaste de flanco da ferramenta e a rugosidade para um aço AISI 52100 com uma ferramenta de metal duro revestido, sem fluido de corte, considerando diversos parâmetros do processo. Os autores concluíram que a velocidade de corte é fator predominante para desgaste do flanco, rugosidade e amplitude de aceleração da vibração. Por fim, observaram que os modelos de regressão linear desenvolvidos no trabalho, incluindo parâmetros do processo e sinais de vibração, são considerados significativos, pois seus valores apresentam confiabilidade, diminuição nos danos e permitindo que as respostas do processo fossem previstas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Buscando uma análise de resultados mais significativa, foram conduzidas duas etapas de ensaios sobre uma mesma geometria de corpo de prova. Seus respectivos processos foram descritos nos tópicos “3.1. Fase 1” e “3.2. Fase 2” a seguir.

3.1. FASE 1

Para que os objetivos propostos pudessem ser atingidos a contento, foi produzido um corpo de prova de aço ferramenta para trabalho a quente tipo H13 a partir do material como recebido. A Tabela 2 apresenta a composição química do material de acordo com a ASTM International A681 - 08 (2005) e do material utilizado, recebido pela Villares Metals. A norma também apresenta valores como as de dureza máxima de 235 HB.

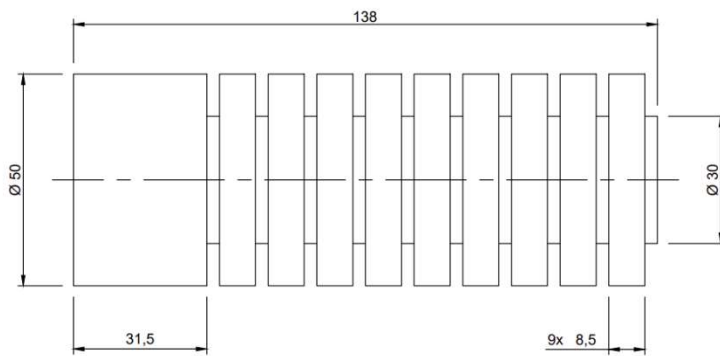
Tabela 2. Composição química H13 (% em massa).

Designação T20813; Tipo H13											
Carbono		Manganês		Silício		Cromo		Vanádio		Molibdênio	
min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
0,32	0,45	0,2	0,6	0,8	1,25	4,75	5,5	0,8	1,2	1,1	1,75
Certificado Villares Metals											
0,40		0,35		1,00		5,20		0,90		1,50	

Fontes: ASTM International A681 - 08 (2005) e Villares Metals (2006).

O referido corpo de prova foi desbastado por faceamento, torneamento cilíndrico externo e sangramento para que ficasse segmentado com nove colos para os testes (e outros três dedicados à fixação na placa do torno), conforme apresentado na Figura 3. Após o desbaste do corpo de prova, o mesmo passou pelo tratamento térmico de têmpera e revenimento para obtenção de dureza de aproximadamente 50 HRC conforme Villares Metals (2006). Na sequência, foram realizados dois passes de torneamento para remoção da camada descarbonetada do corpo de prova.

Figura 3. (a) Esboço (b) Corpo de prova.



(a)



(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os ensaios de acabamento da fase 1 foram conduzidos no Laboratório de Processos de Fabricação do Núcleo de Laboratórios de Ensino de Engenharia (NuLEEn/UFSCar), mais especificamente no torno mecânico convencional Imor prn-320, que dispõe de rotação máxima de 1.500 rpm no eixo-árvore. Utilizaram-se um porta-ferramentas DSSNL 2020 K12 e um inserto Sandvik Coromant SNMG 120404-PM da classe GC4225 (ISO HC P25), um metal duro com cobertura CVD ($\text{TiCN}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$) (Figura 4). Segundo Machado *et al.* (2009), os carbonetos de titânio e tântalo são mais estáveis e impedem o enfraquecimento da ferramenta de corte; isso explica a maior resistência das ferramentas da classe P na usinagem de aço e, portanto, espera-se um bom desempenho na usinagem de aços endurecidos. É importante destacar que se trata de uma ferramenta negativa e, portanto, associada a esforços de usinagem mais intensos. A profundidade de usinagem foi fixada em 0,5 mm. Não foi empregado qualquer fluido de corte durante o processo.

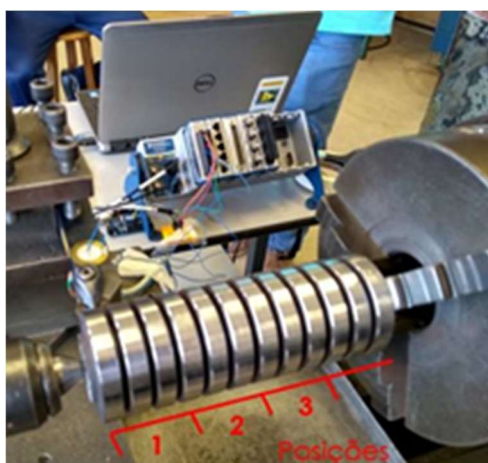
Figura 4. (a) Porta-ferramentas DSSNL 2020 K12 (b) Inseto SNMG 120404-PM GC4225.



Fonte: Sandvik Coromant, (2015).

Foi seguido um planejamento experimental fatorial 3^3 completo contemplando como variáveis a rotação do eixo-árvore (n), aplicada nos níveis 475, 600 ou 750 rpm; o avanço (f), aplicado nos níveis 0,103; 0,207 ou 0,297 mm; e a posição do colo em torneamento (1, 2 ou 3), conforme mostrado na Figura 5, sendo que a posição 1 é aquela mais distante da placa, e a posição 3, a mais próxima. É válido ressaltar que os parâmetros foram selecionados, primeiramente, levando em consideração as recomendações do fabricante visando garantir melhor desempenho da ferramenta utilizada e, após análise do intervalo de valores recomendados, foram selecionados os parâmetros disponibilizados pela máquina operatriz, respeitando seus limites de trabalho. Em relação à fixação das rotações, a velocidade de corte variou de acordo com que o diâmetro do corpo de prova diminuía devido à retirada do material após cada passe. Assim, foram realizados vinte e sete passes distintos, conforme detalhado na Tabela 3.

Figura 5. Posições definidas para o corpo de prova.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 3. Planejamento experimental fatorial 3³ completo.

n (rpm)	f (mm)	#	n (rpm)	f (mm)	#	n (rpm)	f (mm)	#
475	0,103	1	600	0,103	1	750	0,103	1
	0,207			0,207			0,207	
	0,297			0,297			0,297	
	0,103	2		0,103	2		0,103	
	0,207			0,207				
	0,297			0,297				
	0,103	3		0,103	3		0,103	
	0,207			0,207				
	0,297			0,297				

Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram analisados dois grupos de variáveis de resposta: a vibração da ferramenta durante o processo e a rugosidade dos corpos de prova. As medidas foram replicadas duas vezes para cada combinação.

Para a coleta de dados de vibração, foram acoplados dois transdutores piezoelétricos nas faces normais às direções de corte e avanço do porta-ferramentas e um acelerômetro triaxial ADXL335 (Figura 6 e Figura 7). De acordo com Zhang *et al.* (1992), os transdutores piezoelétricos são sensores que trabalham por meio da transformação da deformação do material cerâmico em tensão elétrica, apresentando boa confiabilidade em frequências de até 5000 Hz. Já, o acelerômetro triaxial ADXL335 trabalham com uma faixa de 0,5 Hz a 1600 Hz para os eixos X e Y, e uma faixa de 0,5 Hz a 550 Hz para o eixo Z (Analog Devices ADXL335, 2009). O piezoelétrico PZT1 está posicionado na direção de corte, ao passo que o PZT2 está na direção de avanço. As direções X, Y e Z do acelerômetro correspondem às direções de profundidade, corte e avanço respectivamente. Uma característica relevante desses equipamentos é seu baixo custo e que acabou apresentando bons resultados.

A aquisição foi conduzida utilizando o chassi cDAQ-9178 e o módulo de tensão elétrica NI-9201 (Figura 8), bem como o recurso computacional LabVIEW 2013, sendo os resultados analisados utilizando MATLAB R2018b. Os dados foram comparados

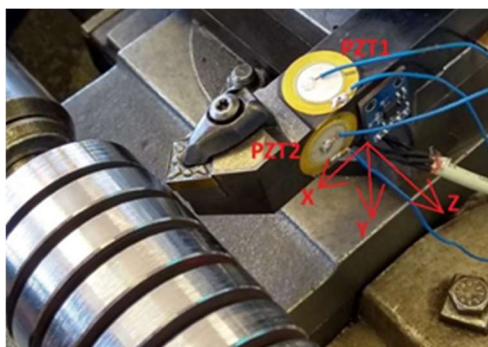
em termos da raiz do valor quadrático médio (ou RMS, do inglês *root mean square*) que, segundo Vargas (2013), é uma medida estatística de magnitude de um certo sinal que pode ser calculada para uma série de valores discretos ou para uma função variável contínua.

Figura 6. (a) Transdutor piezoelétrico (b) Acelerômetro triaxial.



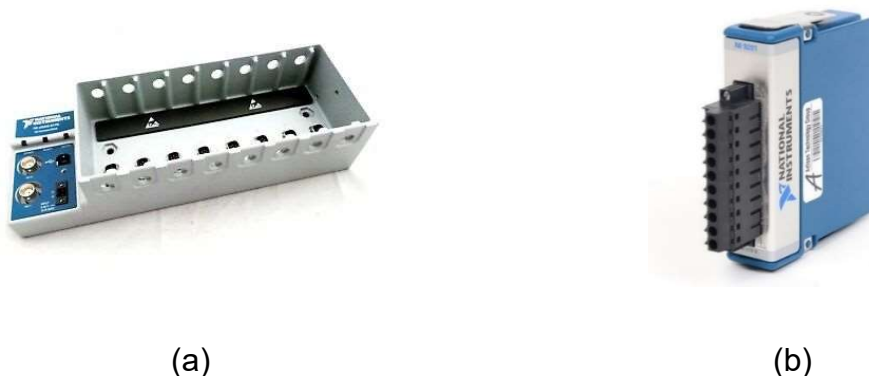
Fonte: (a) Imagine Eletrônica (2020) e (b) Analog Devices ADXL335 (2009).

Figura 7. Fixação dos transdutores piezoelétricos e do acelerômetro triaxial.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 8. (a) Chassi cDAQ-9178 (b) Módulo de tensão elétrica NI-9201.



Fonte: Engineer Ambitiously – NI (2021).

Decidiu-se investigar quatro parâmetros de rugosidade: Ra , Rz , Rsk e Rku . A rugosidade foi avaliada utilizando o microscópio para análise de imagens tridimensionais Alicona InfiniteFocus SL, também disponível no NuLEEn/UFSCar.

Por meio da análise de variância (frequentemente abreviada como ANOVA), foi possível identificar a influência dos fatores rotação, avanço e de sua interação sobre as diversas variáveis de resposta e, assim, determinar as combinações capazes de otimizar os resultados. Como descrito por Larson e Farber (2015), a ANOVA é uma técnica de teste de hipóteses utilizada para comparar três ou mais resultados.

De acordo com Montgomery & Runger (1998), muitos experimentos de fator único requerem que mais de dois níveis do fator sejam considerados. Na Tabela 4 a seguir, é demonstrado como a ANOVA pode ser usada para comparar médias quando há mais de dois níveis de um único fator. Também é discutida a randomização das execuções experimentais e o papel importante que esse conceito desempenha na estratégia geral de experimentação.

Tabela 4. Dados típicos para um experimento de fator único.

Processo	Combinações				Totais	Médias
1	y_{11}	y_{12}	...	y_{1n}	$y_{1\cdot}$	$\bar{y}_{1\cdot}$
2	y_{21}	y_{22}	...	y_{2n}	$y_{2\cdot}$	$\bar{y}_{2\cdot}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
a	y_{a1}	y_{a2}	...	y_{an}	$y_{a\cdot}$	$\bar{y}_{a\cdot}$
					$y_{\cdot\cdot}$	$\bar{y}_{\cdot\cdot}$

Fonte: Montgomery & Runger (1998).

Os resultados dessa análise seguem no tópico “5.1 Fase 1”. Por razão deles, os ensaios da segunda fase foram planejados com outra roupagem, como apresentado na sequência.

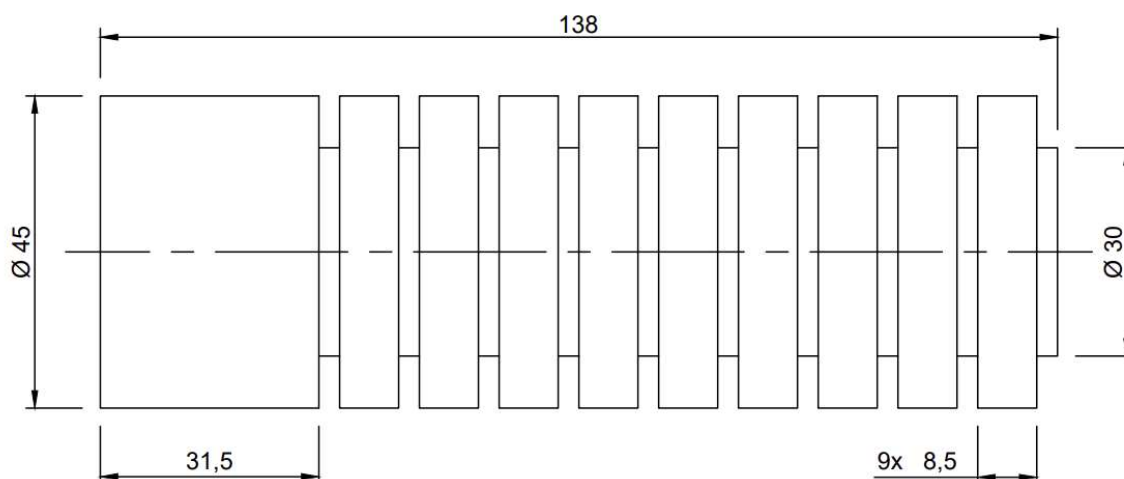
3.2. FASE 2

Após a análise dos resultados da primeira fase, ficou clara a interferência da posição na qualidade da produção, impedindo o estudo propriamente dito da vibração

do processo sobre a rugosidade da peça. Dessa forma, optou-se pelo estudo da posição em relação a vibração do processo e suas consequências na rugosidade.

Para iniciar os testes da Fase 2 o mesmo corpo de prova teve seu diâmetro ajustado para 45 mm (Figura 9), afim de padronizar o novo processo.

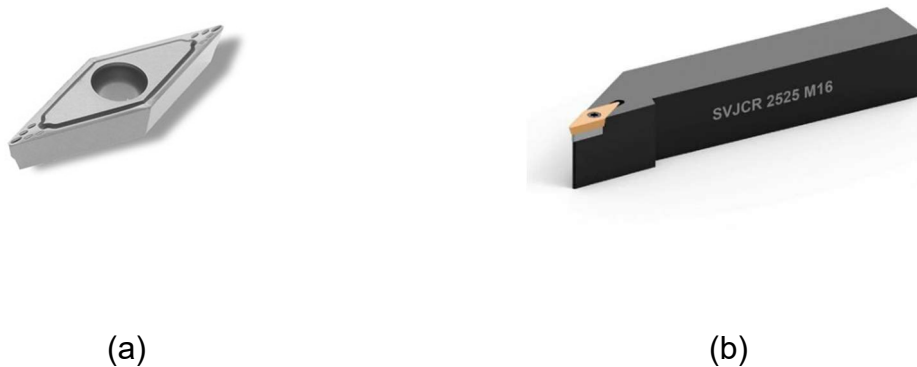
Figura 9. Corpo de prova atualizado para Fase 2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os ensaios, ditos Fase 2, de torneamento em acabamento foram realizados, também no NuLEEn/UFSCar, em um torno CNC Romi Centur 30D, que dispõe de 12,5 cv e 4.000 rpm no eixo-árvore. Trata-se de uma máquina-operatriz significativamente mais rígida do que aquela empregada nos ensaios Fase 1. O porta-ferramentas empregado foi o Ceratizit SVJCR 2525 M16, considerando a escolha pelos insertos VCGT 160404EN-SF, classe TCM407 (ISO HT P10), um cermet sem cobertura (Figura 10). Vale ressaltar que esta é uma ferramenta positiva e que, portanto, deve estar associada a esforços de usinagem reduzidos em relação àqueles verificados nos ensaios da primeira fase. Novamente, não foi utilizado fluido de corte.

Figura 10. (a) Insertos VCGT 160404EN-SF TCM407 (b) Porta-ferramentas Ceratizit SVJCR 2525 M16.



Fonte: Ceratizit (2019).

Com relação ao planejamento experimental, decidiu-se implementar um fatorial com uma variável aplicada em nove níveis e outras duas variáveis aplicadas em dois níveis. A primeira variável refere-se a cada um dos nove colos do corpo de prova em usinagem, que serão apresentados nos resultados na forma de “distância da placa”. Os outros fatores são a rotação (n , rpm) e o avanço (f , mm), ambos empregados em dois níveis. A profundidade de usinagem (ap) continuou fixa em 0,5 mm para todo processo. Os níveis desses parâmetros foram escolhidos considerando as limitações da máquina-operatriz e as recomendações do fabricante de ferramentas (Ceratizit, 2019) e estão expostos na Tabela 5. Vale destacar que a redução significativa da rotação e do avanço, em comparação aos ensaios da fase 1, deve-se ao fato de que a nova ferramenta é positiva e, portanto, apresenta um ângulo de cunha reduzido; isso requer um menor carregamento termomecânico para compensar a diminuição da seção resistente. Como nos ensaios anteriores, as medidas foram replicadas duas vezes para cada combinação.

Tabela 5. Variáveis do planejamento fatorial aplicadas em dois níveis.

n (rpm)	200	250
f (mm)	0,05	0,10

Fonte: Elaborada pelo autor.

Dessa forma, as combinações dos parâmetros foram denominadas da seguinte forma:

- #1: $n = 250$ rpm; $f = 0,10$ mm;
- #2: $n = 250$ rpm; $f = 0,05$ mm;
- #3: $n = 200$ rpm; $f = 0,10$ mm; e
- #4: $n = 200$ rpm; $f = 0,05$ mm.

Nota-se que esse novo planejamento compreende parâmetros mais amenos, respeitando a opção por uma ferramenta positiva e que, portanto, apresenta um ângulo de cunha reduzido em comparação a uma ferramenta negativa.

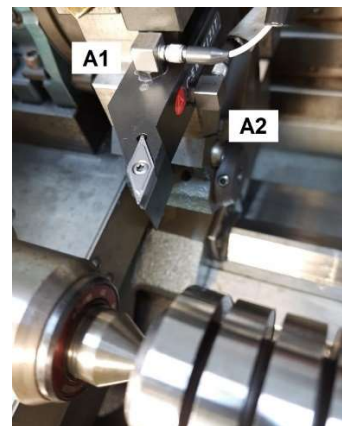
Como nos ensaios da primeira fase, também nos ensaios da Fase 2 foram analisados dois grupos de variáveis de resposta: a vibração da ferramenta durante o processo e a rugosidade dos corpos de prova.

Para a coleta de dados de vibração, foram acoplados dois acelerômetros piezoelétricos PCB 333B30 nas faces normais às direções de corte (A1) e avanço (A2) do porta-ferramentas (Figura 11). Esses acelerômetros apresentam sensibilidade de tensão fixa, independentemente do tipo ou comprimento do cabo e seu sinal de saída é de baixa impedância, que pode ser transmitido por cabos longos em ambientes adversos, praticamente sem perda na qualidade do sinal. A sensibilidade de aquisição é de aproximadamente $10,2$ mV/(m/s²), seu alcance de medida de aceleração é de no máximo 490 m/s² (50 g) e a faixa de frequência aceita pelo acelerômetro varia entre $0,5$ e 3000 Hz.

Figura 11. (a) PCB 333B30 (b) Acelerômetros instalados.



(a)



(b)

Fonte: (a) PCB Piezotronics an MTS Company (2021) (b) Elaborada pelo autor.

A aquisição dos resultados foi conduzida utilizando o mesmo chassi cDAQ-9178 e o módulo de entrada de som e vibração da Série C NI-9234 (Figura 12) que tem 5 V, 51.2 kS/s/canal, 4 canais e que pode medir sinais de sensores piezoelétricos com eletrônica embarcada (IEPE) e outros tipos de sensores, como acelerômetro, tacômetro e sondas de proximidade. Será utilizado também o recurso computacional LabVIEW 2013 para a captação dos dados, sendo os resultados analisados utilizando MATLAB R2018b.

Figura 12. Módulo de entrada de som e vibração NI-9234.



Fonte: Engineer Ambitiously – NI (2021).

Foram mantidos os mesmos quatro parâmetros de rugosidade (R_a , R_z , R_{sk} e R_{ku}) e, conforme cada combinação de corte nos nove colos chegavam ao fim, como por exemplo os nove processos de #1, utilizando o microscópio Alicona InfiniteFocus SL para análise de imagens tridimensionais de rugosidade e, novamente com a ANOVA, foi possível identificar a influência dos fatores rotação, avanço, posição e de suas interações sobre as diversas variáveis de resposta e, assim, determinar as combinações capazes de otimizar os resultados. No fim de cada processo, foi trocada a ponta do inserto para que não houvesse interferência no caso de danos causados à ferramenta. Após os passes, os insertos também foram analisados no microscópio.

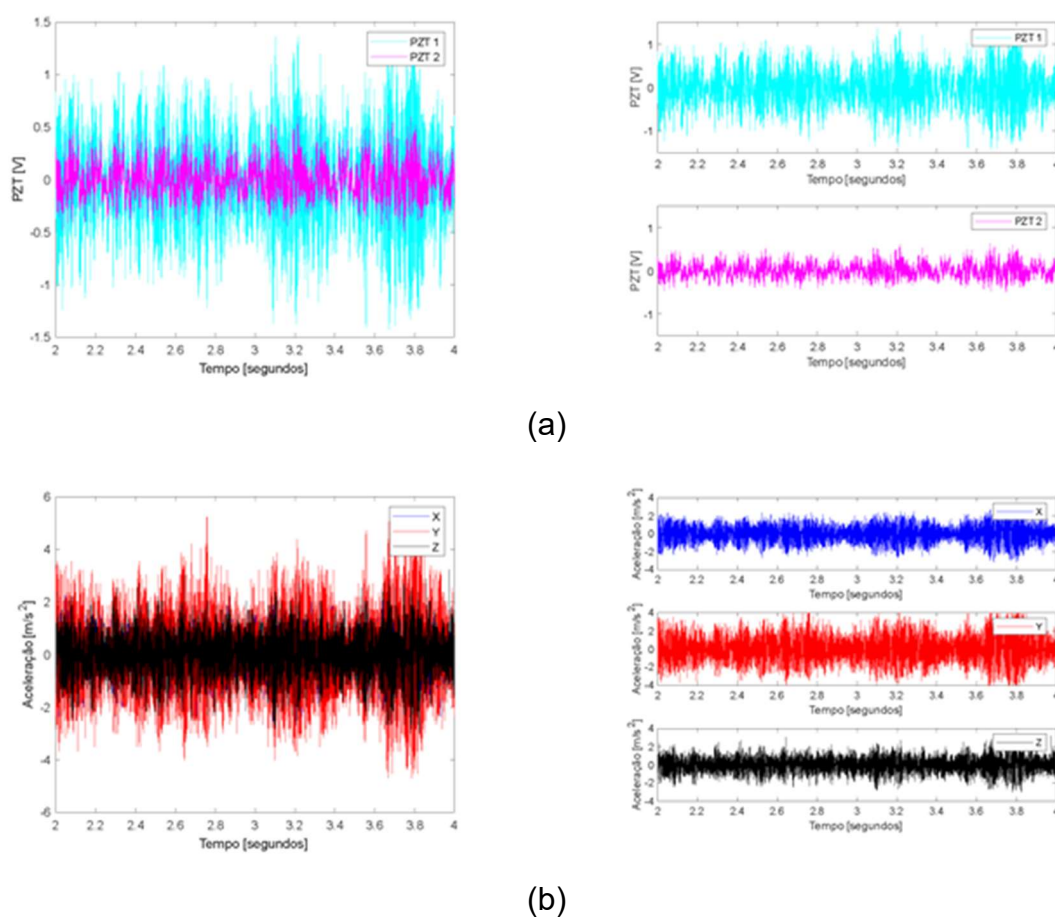
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como no tópico anterior, os resultados também foram separados em duas categorias, sendo elas: “4.1. FASE 1” e “4.2. FASE 2”.

4.1. FASE 1

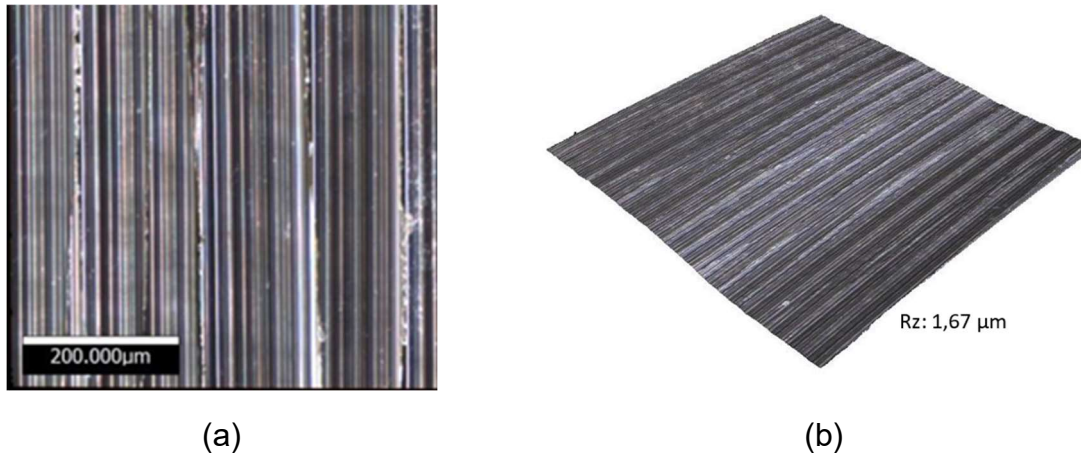
Após a aquisição dos dados e análise gráfica feita no Matlab, foram obtidos resultados como os da Figura 13 que ilustra as leituras dos PZT e do acelerômetro durante um passe inespecífico. Por sua vez, a Figura 14 contém um exemplo da superfície do corpo de prova visualizada no microscópio.

Figura 13. Exemplo de sinais coletados: (a) pelos PZT e (b) pelo acelerômetro triaxial.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 14. Exemplo de superfície do material após usinagem: (a) projeção e (b) aspecto tridimensional.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após calculados os valores RMS dos referidos sinais de vibração, os mesmos foram sujeitos à análise de variância (ANOVA) utilizando planilhas do Excel. Os parâmetros de rugosidade adquiridos em microscópio após cada passe completo no corpo de prova seguiram o mesmo tratamento. São apresentados, nos Quadros 1 e 2, os resultados da ANOVA referente aos sinais dos transdutores piezoelétricos PZT1 e PZT2 e nos Quadros 3, 4 e 5, referente aos sinais x, y e z do acelerômetro triaxial. Finalmente, os Quadros 6, 7, 8 e 9 contém os resultados da ANOVA referente aos parâmetros de rugosidade Ra, Rz, Rsk e Rku.

Quadro 1. ANOVA PZT1 (Fase 1).

		GL	MS	F0	pvalor	F0,05	F0,10	F0,20
SStotais	0,661	80						
SSrotacao	0,013	2	0,006	0,535	0,589	3,168	2,404	1,658
SSavanço	0,000	2	0,000	0,020	0,980	3,168	2,404	1,658
SSposição	0,001	2	0,000	0,025	0,975	3,168	2,404	1,658
SSrot.av	0,002	4	0,000	0,038	0,997	2,543	2,052	1,553
SSrot.pos	0,004	4	0,001	0,078	0,989	2,543	2,052	1,553
SSav.pos	0,002	4	0,000	0,039	0,997	2,543	2,052	1,553
SSrot.av.pos	0,003	8	0,000	0,029	1,000	2,115	1,787	1,444
SSerro	0,637	54	0,012					

Quadro 2. ANOVA PZT2 (Fase 1).

		GL	MS	F0	pvalor	F0,05	F0,10	F0,20
SStotais	1,631	80						
SSrotacao	0,009	2	0,005	0,170	0,844	3,168	2,404	1,658
SSavanço	0,058	2	0,029	1,094	0,342	3,168	2,404	1,658
SSposição	0,039	2	0,020	0,741	0,482	3,168	2,404	1,658
SSrot.av	0,010	4	0,003	0,097	0,983	2,543	2,052	1,553
SSrot.pos	0,052	4	0,013	0,488	0,745	2,543	2,052	1,553
SSav.pos	0,016	4	0,004	0,150	0,962	2,543	2,052	1,553
SSrot.av.pos	0,017	8	0,002	0,081	1,000	2,115	1,787	1,444
SSerro	1,430	54	0,026					

Pode-se verificar que, no caso dos sinais dos piezoelétricos PZT1, na direção de corte (Quadro 1), e PZT2, na direção de avanço (Quadro 2), nenhum dos fatores de influência (isto é, as variáveis de entrada rotação, avanço e posição) foram verificadas como significativas. Isso porque as referidas funções F0, calculadas como o quociente entre os quadrados médios (MS) de cada variável (ou interação) e do erro, apresentaram valores inferiores ao da distribuição F para um intervalo de confiança de 95 % (F0,05), ou mesmo flexibilizando a análise para 90 % de confiança (F0,10) ou 80 % (F0,20).

Quadro 3. ANOVA Acel. X (Fase 1).

		GL	MS	F0	pvalor	F0,05	F0,10
SStotais	0,014	80					
SSrotacao	0,000	2	0,000	0,031	0,969	3,168	2,404
SSavanço	0,001	2	0,001	2,446	0,096	3,168	2,404
SSposição	0,000	2	0,000	0,134	0,875	3,168	2,404
SSrot.av	0,000	4	0,000	0,089	0,986	2,543	2,052
SSrot.pos	0,000	4	0,000	0,546	0,702	2,543	2,052
SSav.pos	0,000	4	0,000	0,409	0,801	2,543	2,052
SSrot.av.pos	0,000	8	0,000	0,270	0,973	2,115	1,787
SSerro	0,011	54	0,000				

Quadro 4. ANOVA Acel. Y (Fase 1).

		GL	MS	F0	pvalor	F0,05
SStotais	0,067	80				
SSrotacao	0,002	2	0,001	1,332	0,273	3,168
SSavanço	0,008	2	0,004	4,523	0,015	3,168
SSposição	0,001	2	0,001	0,578	0,565	3,168
SSrot.av	0,001	4	0,000	0,240	0,914	2,543
SSrot.pos	0,002	4	0,000	0,405	0,804	2,543
SSav.pos	0,001	4	0,000	0,263	0,900	2,543
SSrot.av.pos	0,001	8	0,000	0,127	0,998	2,115
SSerro	0,051	54	0,001			

Quadro 5. ANOVA Acel. Z (Fase 1).

		GL	MS	F0	pvalor	F0,05	F0,10	F0,20
SStotais	0,00743	80						
SSrotacao	0,00001	2	0,00001	0,051	0,950	3,168	2,404	1,658
SSavanço	0,00009	2	0,00004	0,349	0,707	3,168	2,404	1,658
SSposição	0,00000	2	0,00000	0,011	0,989	3,168	2,404	1,658
SSrot.av	0,00008	4	0,00002	0,155	0,960	2,543	2,052	1,553
SSrot.pos	0,00021	4	0,00005	0,402	0,807	2,543	2,052	1,553
SSav.pos	0,00007	4	0,00002	0,135	0,969	2,543	2,052	1,553
SSrot.av.pos	0,00010	8	0,00001	0,097	0,999	2,115	1,787	1,444
SSerro	0,00687	54	0,00000					

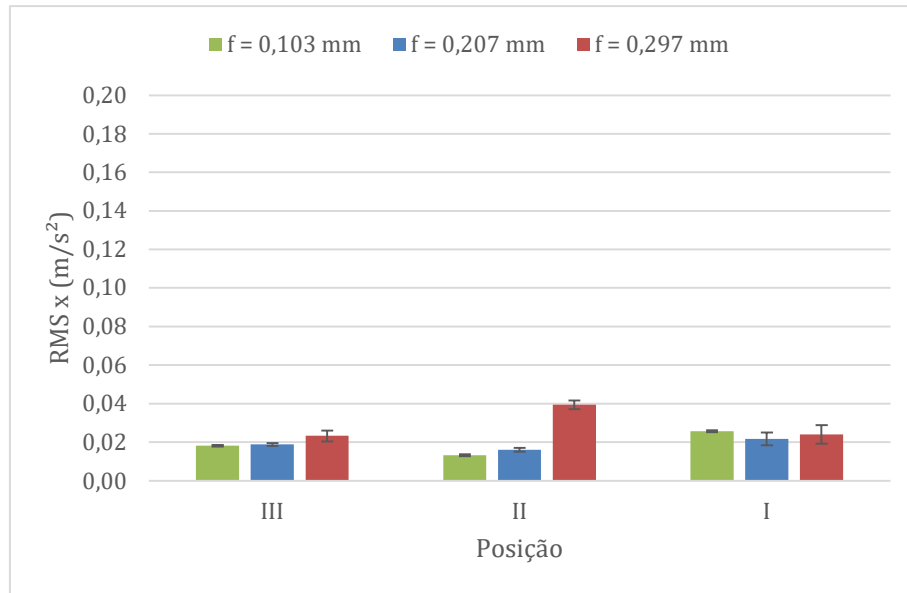
Com relação aos sinais do acelerômetro triaxial, o avanço se mostra significativo naquele da direção X, de profundidade, flexibilizando a abordagem para 90 % de confiança (Quadro 3), e naquele da direção Y, de corte, com 95 % de confiança (Quadro 4). Por outro lado, nenhum fator se mostra relevante no sinal da direção Z, de avanço (Quadro 5).

Na comparação entre os sinais dos PZT e do acelerômetro, fica evidente que o segundo demonstrou uma melhor capacidade de aferir a vibração. Considerando, em especial PZT1 e direção Y do acelerômetro, relacionados com a direção de corte e, portanto, aquela de maior tendência à vibração, a ANOVA só indicou influência do avanço no segundo caso. Como o acelerômetro apresenta maior eficiência em medir frequências inferiores à 1600 Hz, é de se esperar que boa parte da energia vibracional se concentre nessa faixa.

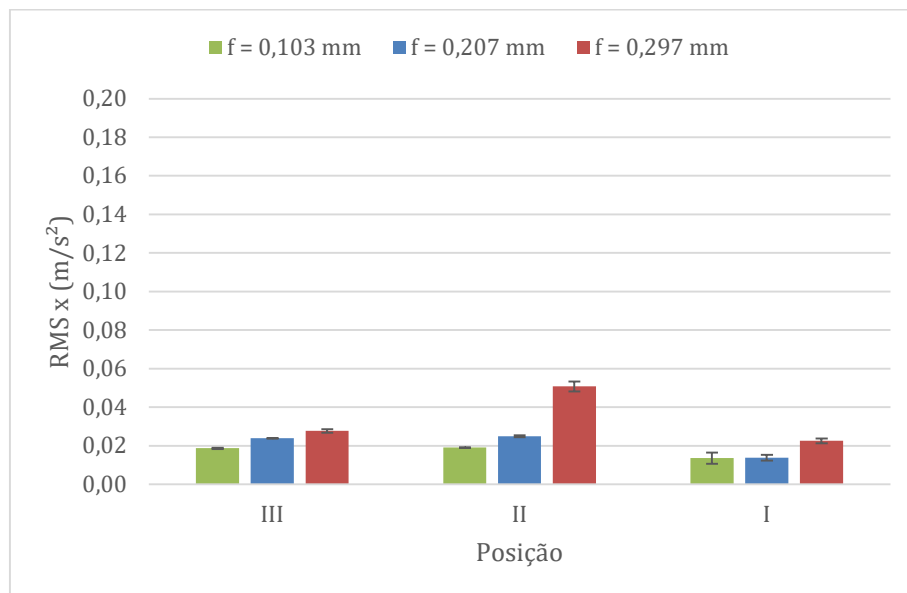
Levando em consideração a relevância apenas nos sinais X e Y do acelerômetro,

foram criados seus respectivos gráficos para uma análise da variação de cada ensaio, apresentados na Figura 15 (RMS de X) e na Figura 16 (RMS de Y).

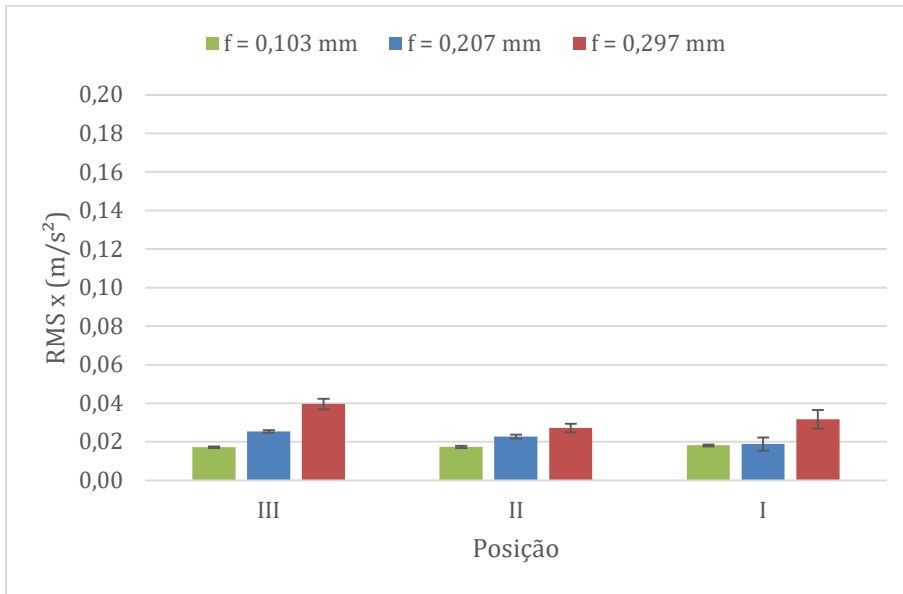
Figura 15. RMS x para (a) 475 rpm (b) 600 rpm e (c) 750 rpm.



(a)

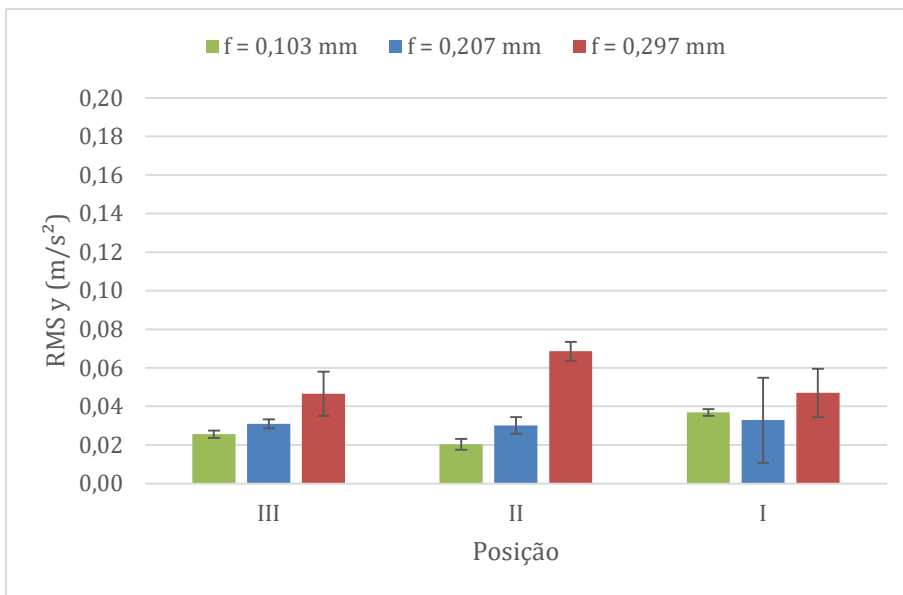


(b)

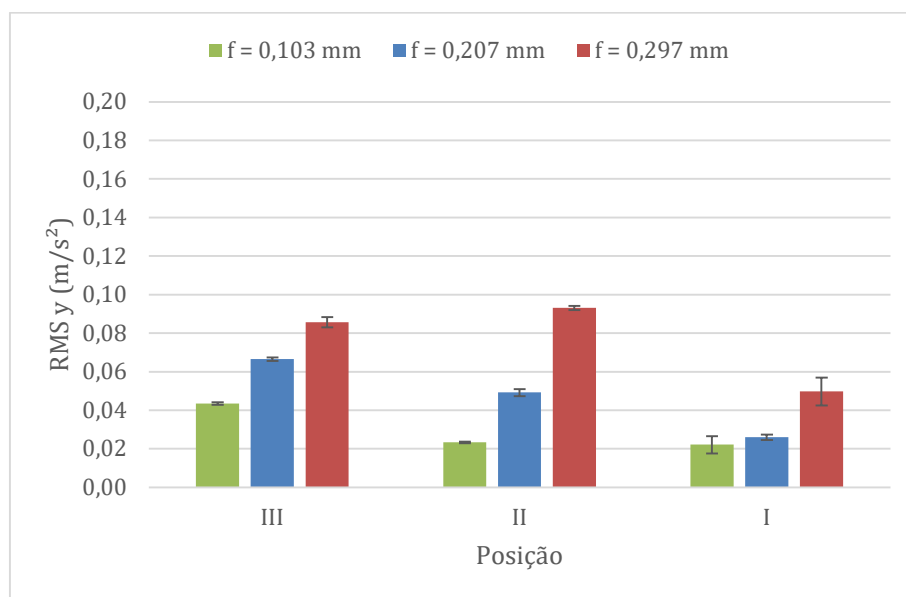


(c)

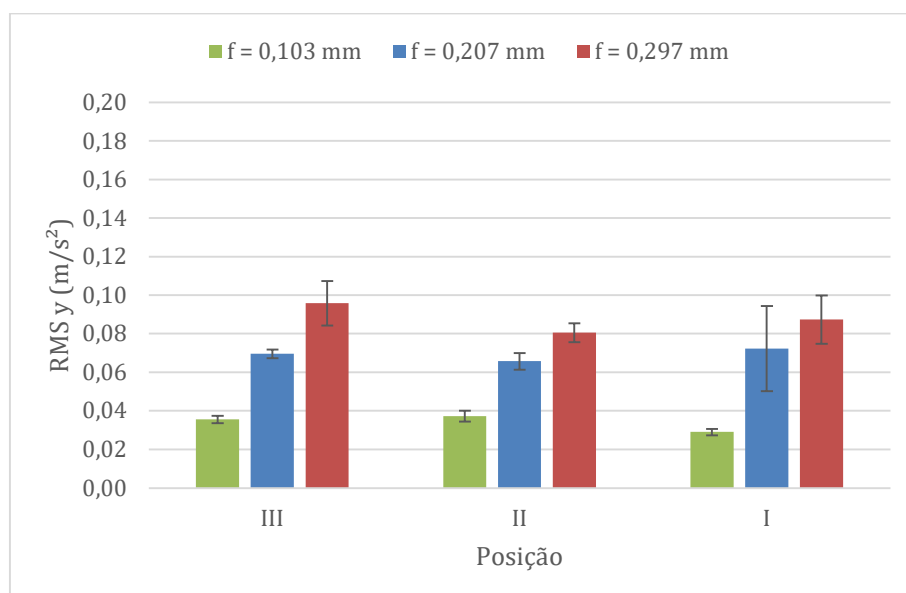
Figura 16. RMS y para (a) 475 rpm (b) 600 rpm e (c) 750 rpm.



(a)



(b)

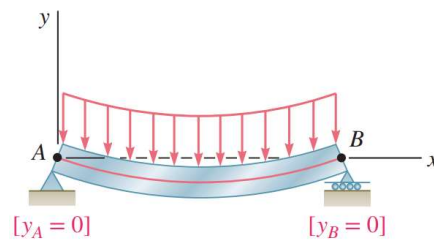


(c)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Vê-se, portanto, que a imensa variabilidade verificada nesses ensaios da primeira fase dificultou significativamente a observação da influência das variáveis de estudo sobre os diferentes sinais de vibração. A maior variação dos sinais na posição II em comparação as demais é justificável em se considerando o modelo de viga biapoiada (Beer e Johnston, 2020), em que a flexa é maximizada no meio da viga, como mostra a Figura 17.

Figura 17. Modelo de viga biapoiada.



Fonte: Beer e Johnston (2020).

Na sequência, discutem-se os resultados da primeira fase acerca da rugosidade.

Quadro 6. ANOVA Ra (Fase 1).

		GL	MS	F0	pvalor	F0,05	F0,10	F0,20
SStotais	0,906	80						
SSrotacao	0,004	2	0,002	0,168	0,846	3,168	2,404	1,658
SSavanço	0,028	2	0,014	1,138	0,328	3,168	2,404	1,658
SSposição	0,049	2	0,025	1,959	0,151	3,168	2,404	1,658
SSrot.av	0,007	4	0,002	0,131	0,970	2,543	2,052	1,553
SSrot.pos	0,066	4	0,017	1,322	0,274	2,543	2,052	1,553
SSav.pos	0,015	4	0,004	0,299	0,877	2,543	2,052	1,553
SSrot.av.pos	0,060	8	0,008	0,599	0,774	2,115	1,787	1,444
SSerro	0,676	54	0,013					

Quadro 7. ANOVA Rz (Fase 1).

		GL	MS	F0	Pvalor	F0,05	F0,10
SStotais	31,352	80					
SSrotacao	0,065	2	0,033	0,075	0,928	3,168	2,404
SSavanço	1,245	2	0,623	1,430	0,248	3,168	2,404
SSposição	2,141	2	1,070	2,459	0,095	3,168	2,404
SSrot.av	0,207	4	0,052	0,119	0,975	2,543	2,052
SSrot.pos	1,659	4	0,415	0,953	0,441	2,543	2,052
SSav.pos	0,680	4	0,170	0,391	0,814	2,543	2,052
SSrot.av.pos	1,845	8	0,231	0,530	0,829	2,115	1,787
SSerro	23,510	54	0,435				

O parâmetro de rugosidade Ra (Quadro 6) se mostra influenciado pela posição do colo em usinagem a partir da flexibilização do intervalo de confiança para 80 %. Com relação ao parâmetro Rz (Quadro 7), a influência do mesmo fator posição é sensível para um intervalo de confiança de 90 %. Por outro lado, nada pode ser dito

acerca dos parâmetros Rsk (Quadro 8) e Rku (Quadro 9), ainda que o intervalo de confiança fosse flexibilizado até 80 %.

Quadro 8. ANOVA Rsk (Fase 1).

		GL	MS	F0	pvalor	F0,05	F0,10	F0,20
SStotais	16,076	80						
SSrotacao	0,085	2	0,042	0,153	0,859	3,168	2,404	1,658
SSavanço	0,149	2	0,074	0,268	0,766	3,168	2,404	1,658
SSposição	0,031	2	0,016	0,057	0,945	3,168	2,404	1,658
SSrot.av	0,148	4	0,037	0,134	0,969	2,543	2,052	1,553
SSrot.pos	0,098	4	0,025	0,089	0,986	2,543	2,052	1,553
SSav.pos	0,157	4	0,039	0,142	0,966	2,543	2,052	1,553
SSrot.av.pos	0,428	8	0,054	0,193	0,991	2,115	1,787	1,444
SSerro	14,979	54	0,277					

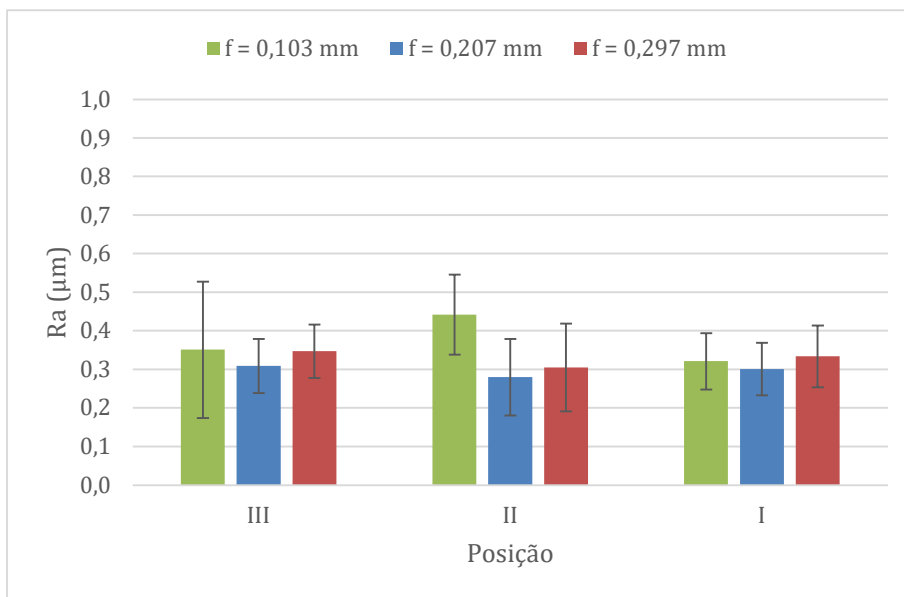
Quadro 9. ANOVA Rku (Fase 1).

		GL	MS	F0	pvalor	F0,05	F0,10	F0,20
SStotais	411,944	80						
SSrotacao	1,032	2	0,516	0,078	0,925	3,168	2,404	1,658
SSavanço	13,139	2	6,569	0,998	0,375	3,168	2,404	1,658
SSposição	10,212	2	5,106	0,776	0,465	3,168	2,404	1,658
SSrot.av	3,342	4	0,835	0,127	0,972	2,543	2,052	1,553
SSrot.pos	10,356	4	2,589	0,393	0,813	2,543	2,052	1,553
SSav.pos	5,027	4	1,257	0,191	0,942	2,543	2,052	1,553
SSrot.av.pos	13,386	8	1,673	0,254	0,978	2,115	1,787	1,444
SSerro	355,450	54	6,582					

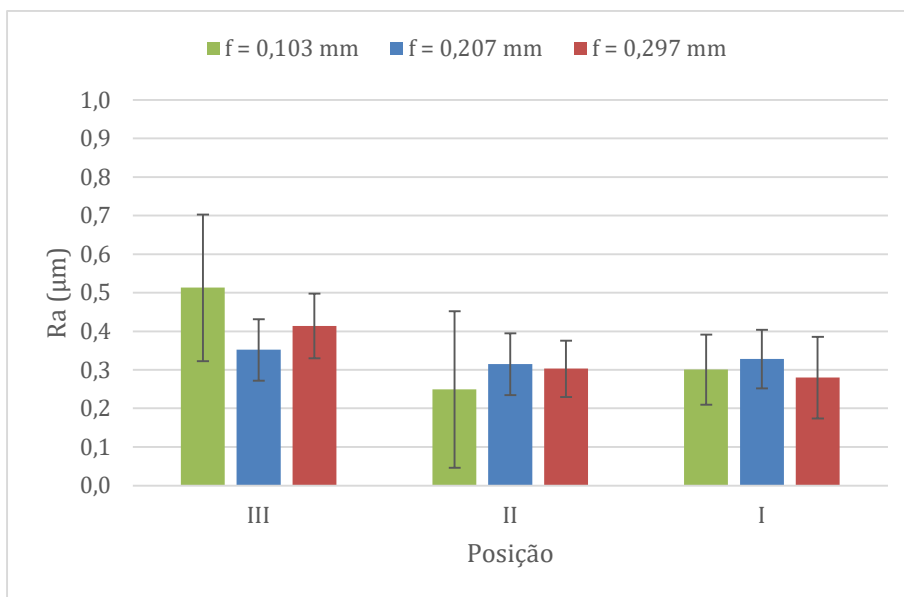
Fonte: Elaborada pelo autor.

Em síntese, os resultados em termos da vibração mostram que a posição do colo em usinagem é a única variável de real influência sobre a rugosidade média (Ra e Rz). Construímos então os gráficos de Ra (Figura 18) e Rz (Figura 19) para cada processo de corte.

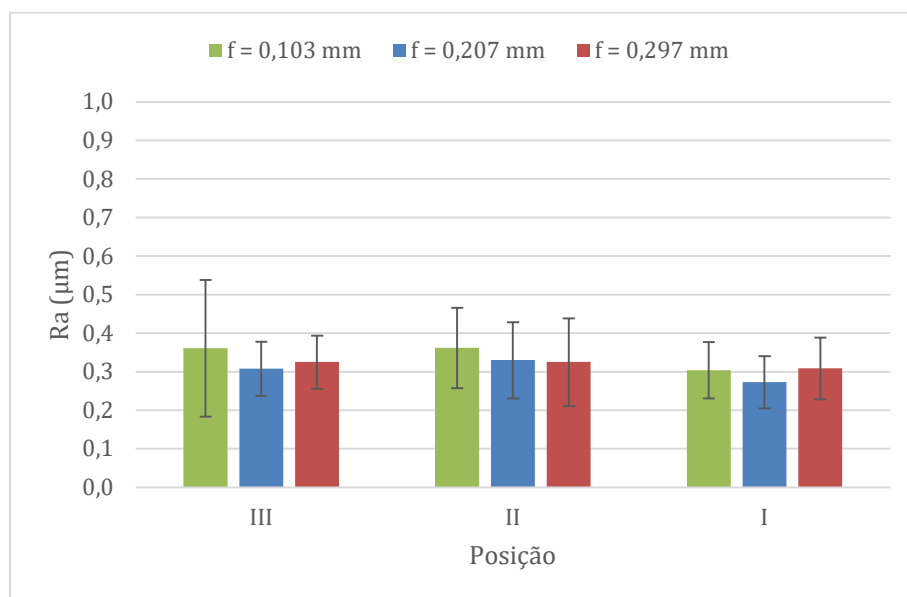
Figura 18. Ra para (a) 475 rpm (b) 600 rpm e (c) 750 rpm.



(a)

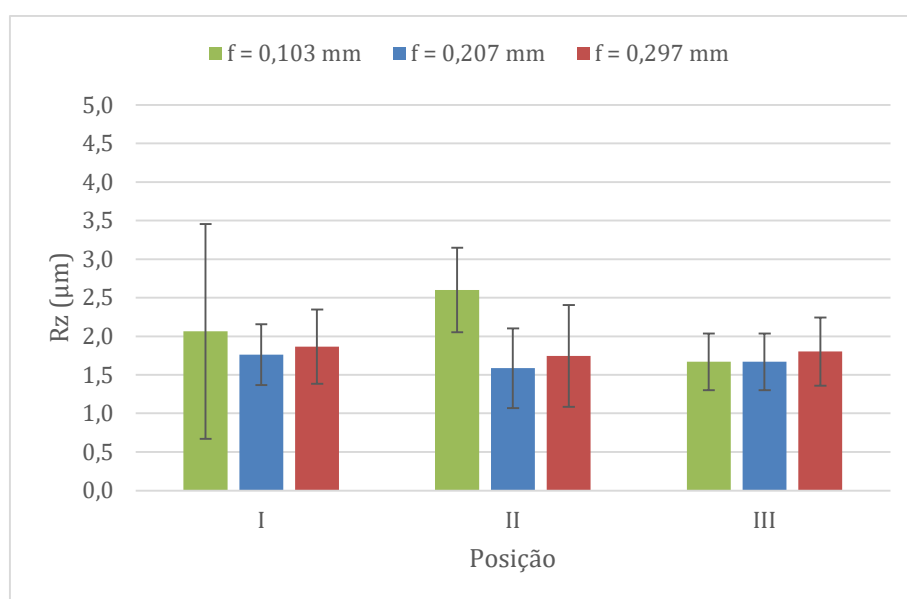


(b)

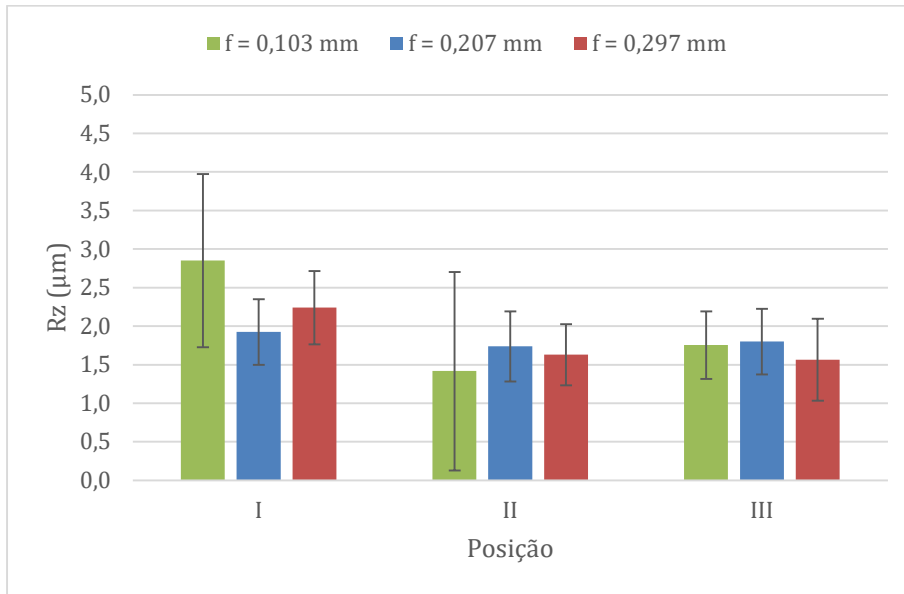


(c)

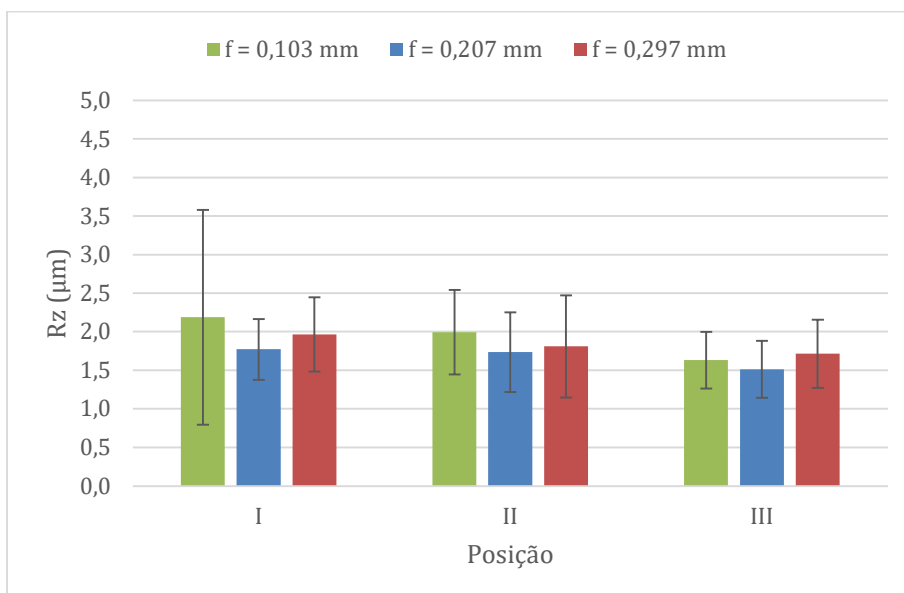
Figura 19. Rz para (a) 475 rpm (b) 600 rpm e (c) 750 rpm.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Por sua vez, como seria até de se esperar, o avanço se destaca na avaliação do sinal de X e Y do acelerômetro, onde X é medido perpendicularmente ao plano de trabalho, e Y medido na direção de corte. Nesse caso, embora a influência posição do colo em usinagem mereça alguma atenção, nada pode ser dito com relação aos parâmetros Rsk, Rku, PZT1, PZT2 e ao sinal Z do acelerômetro.

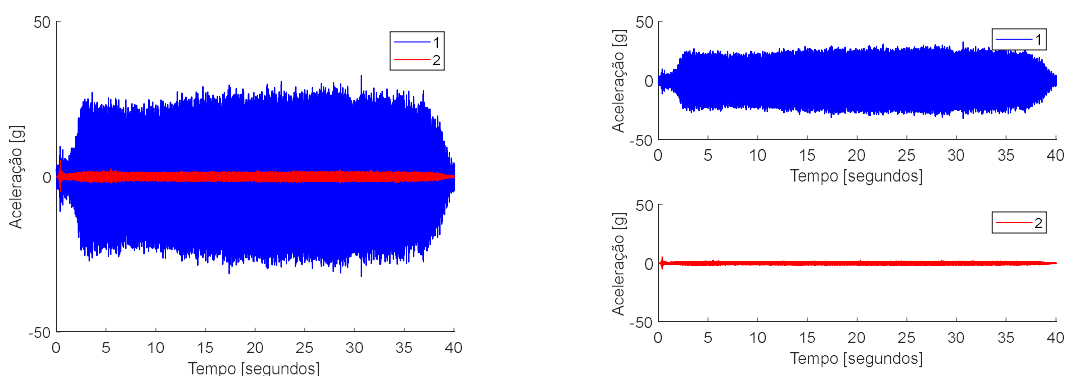
Dessa forma, um estudo mais minucioso foi planejado, conforme descrito na seção Materiais e métodos, e os resultados da Fase 2 são apresentados a seguir.

4.2. FASE 2

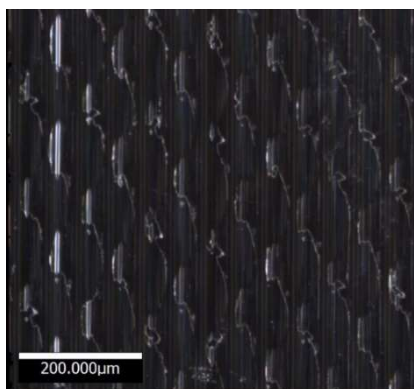
Tendo em vista a significativa variabilidade obtida nos primeiros ensaios, manifestada pela dificuldade de grandes inferências a partir da ANOVA, diversas alternativas metodológicas foram admitidas, como já apresentado. O emprego de equipamentos aprimorados para a aquisição dos resultados do torneamento permitiu uma maior precisão para a análise de variância sobre as influências de cada parâmetro de corte em relação a vibração do processo.

Dessa forma, foram obtidos sinais de vibração mais relevantes para o estudo, juntamente com imagem da sua superfície torneada, como os do exemplo da Figura 20 a seguir, equivalente ao processo de corte nº 11 (referente à segunda combinação “#2” com 250 rpm e avanço de 0,05 mm).

Figura 20. (a) Sinais de vibração do processo #2_2 (b) Superfície de corte.



(a)



(b)

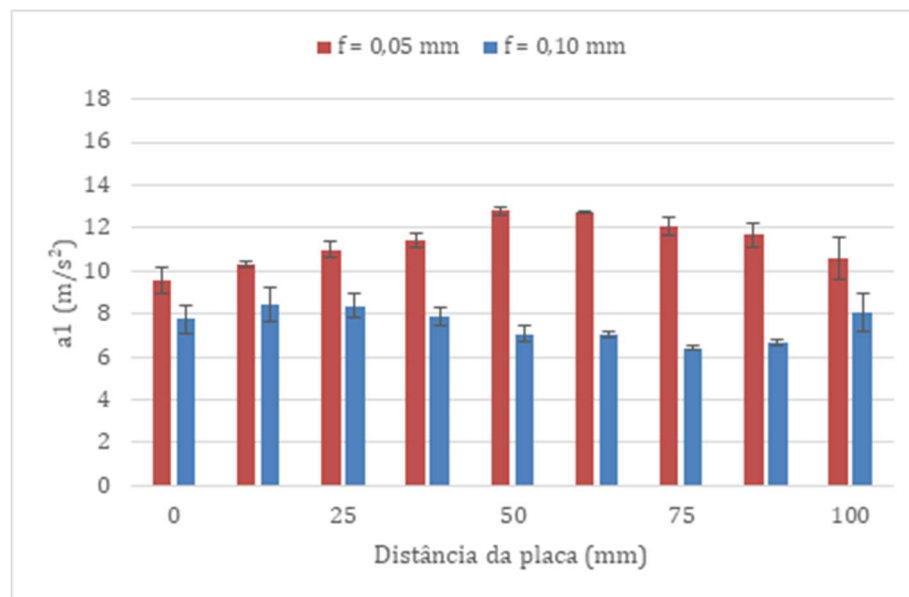
Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesse caso, em especial, foram obtidos os seguintes resultados de aceleração RMS (A1, na direção de corte, e A2 na direção de avanço) e Rugosidades (Ra, Rz, Rsk e Rku) para o referido ensaio:

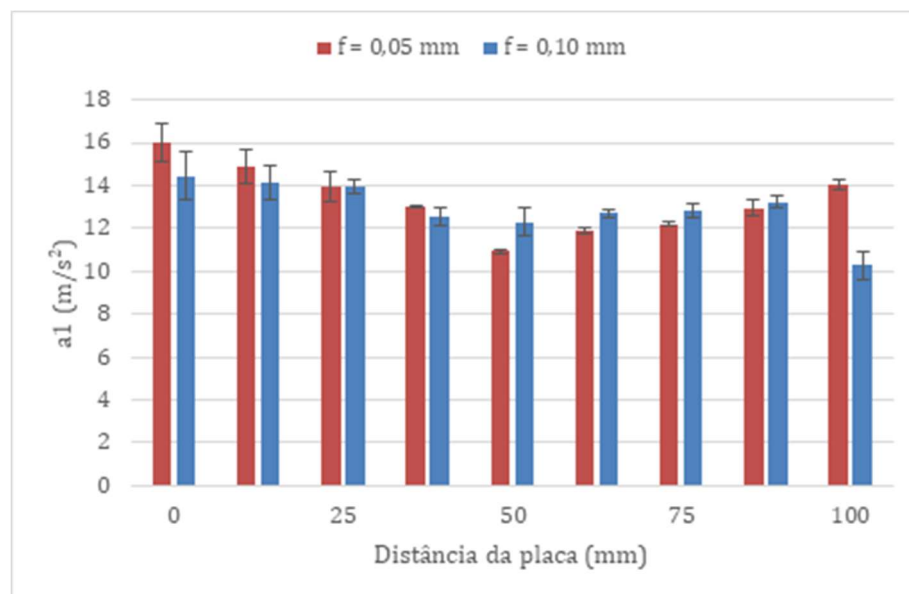
- RMS:
 - A1: Valor médio = 12,9586 m/s² e Desvio Padrão = 0,8026 m/s²
 - A2: Valor médio = 0,5101 m/s² e Desvio Padrão = 0,0148 m/s²
- Rugosidade:
 - Ra: Valor médio = 0,9235 μm e Desvio Padrão = 0,1025 μm
 - Rz: Valor médio = 4,5690 μm e Desvio Padrão = 0,4115 μm
 - Rsk: Valor médio = 0,8925 μm e Desvio Padrão = 0,1577 μm
 - Rku: Valor médio = 2,64 μm e Desvio Padrão = 0,0827 μm

Sendo assim, com a aquisição de cada ensaio, foi possível construir a Figura 21 e a Figura 22 para os sinais de vibração de A1 e A2 respectivamente. Nessas figuras, os fundos de escala foram intencionalmente iguais para evidenciar a precedência do sinal de A1 sobre o sinal de A2. De qualquer forma, a análise de variância é capaz de declarar a influência de cada um dos fatores sobre ambos os sinais.

Figura 21. A1 (RMS) para (a) 200 rpm e (b) 250 rpm.



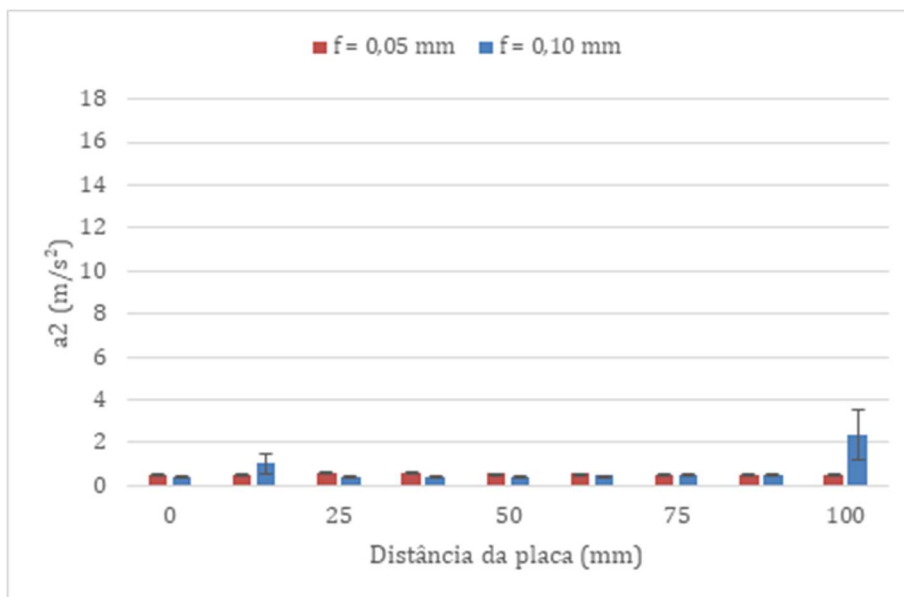
(a)



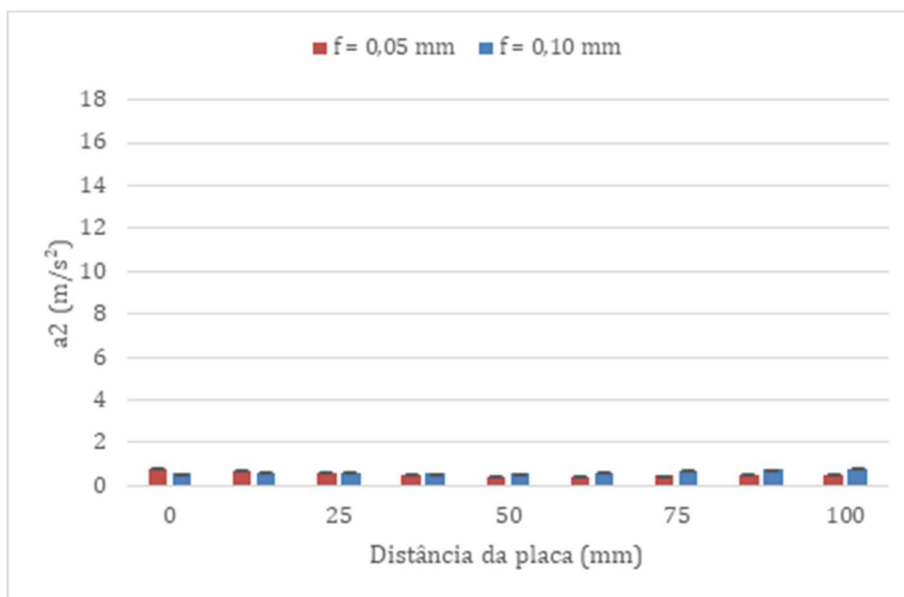
(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 22. A2 (RMS) para (a) 200 rpm e (b) 250 rpm.



(a)



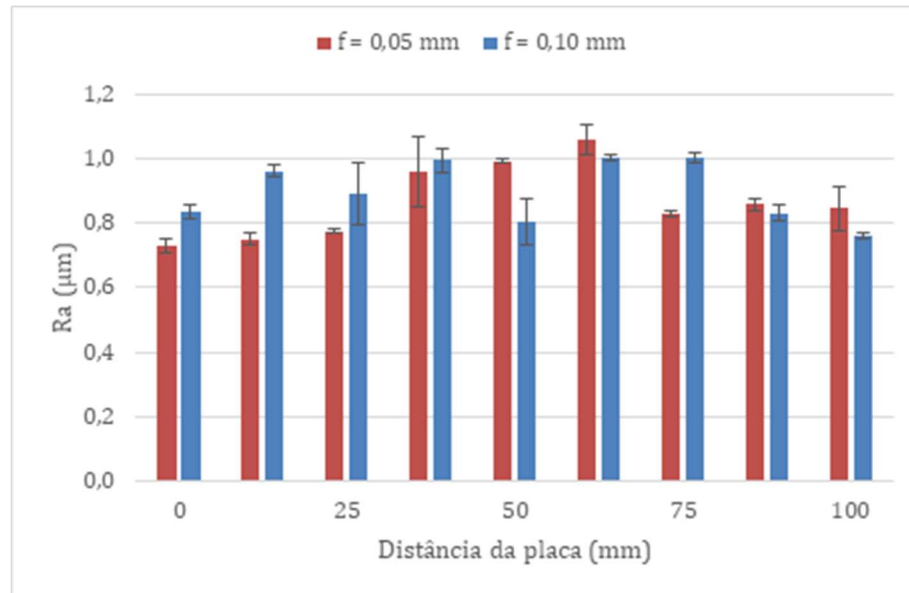
(b)

Fonte: Elaborada pelo autor

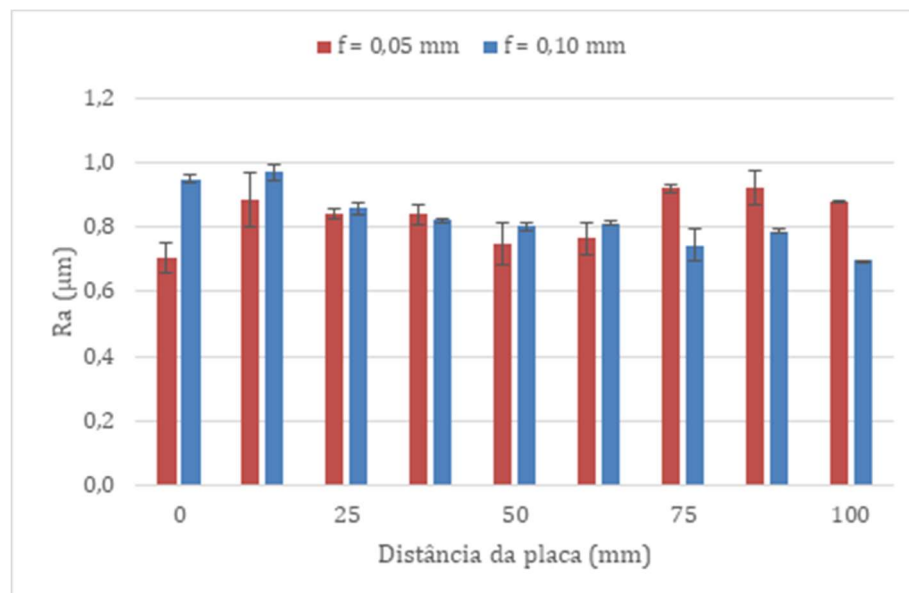
A grande variação de valores da Figura 21 (A1) para a Figura 22 (A2) mostra a diferença significativa na amplitude de vibração do processo na direção de corte (medida por A1) em relação a de avanço (medida por A2). Diferenças que podem ser notadas também nas próximas figuras das análises de variância de cada um dos RMS desses acelerômetros.

A seguir, foi apresentado na Figura 23, Figura 24, Figura 25 e Figura 26 os valores de rugosidade.

Figura 23. Ra para (a) 200 rpm e (b) 250 rpm.



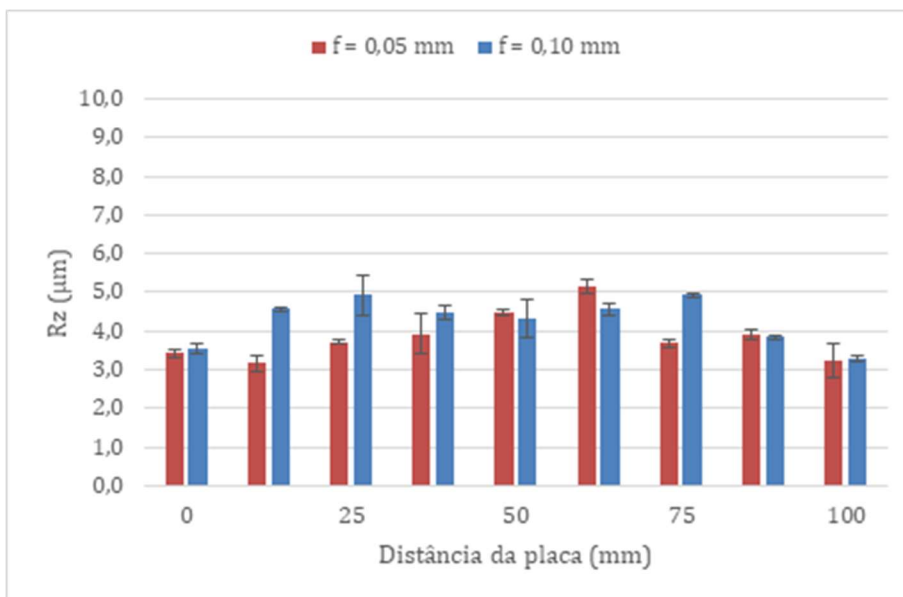
(a)



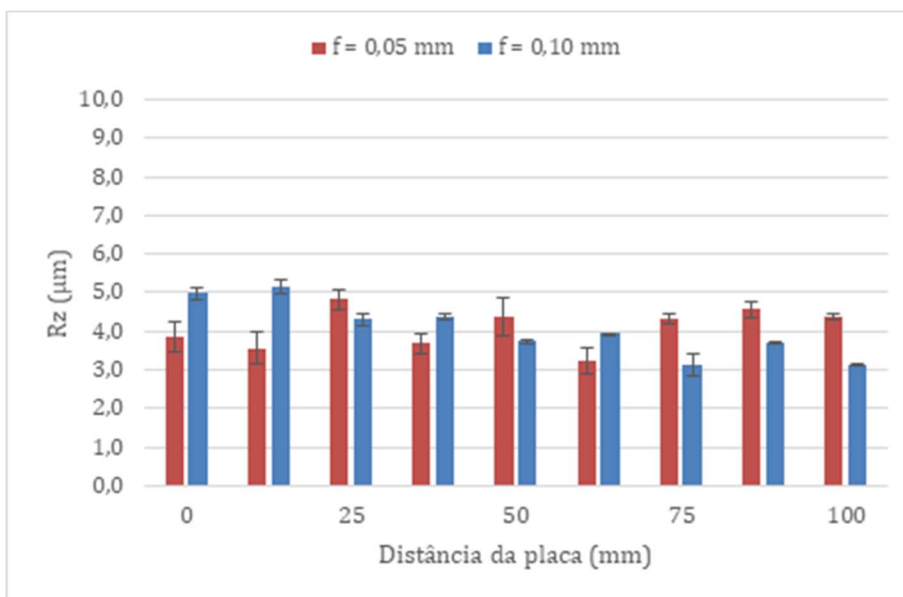
(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 24. Rz para (a) 200 rpm e (b) 250 rpm.



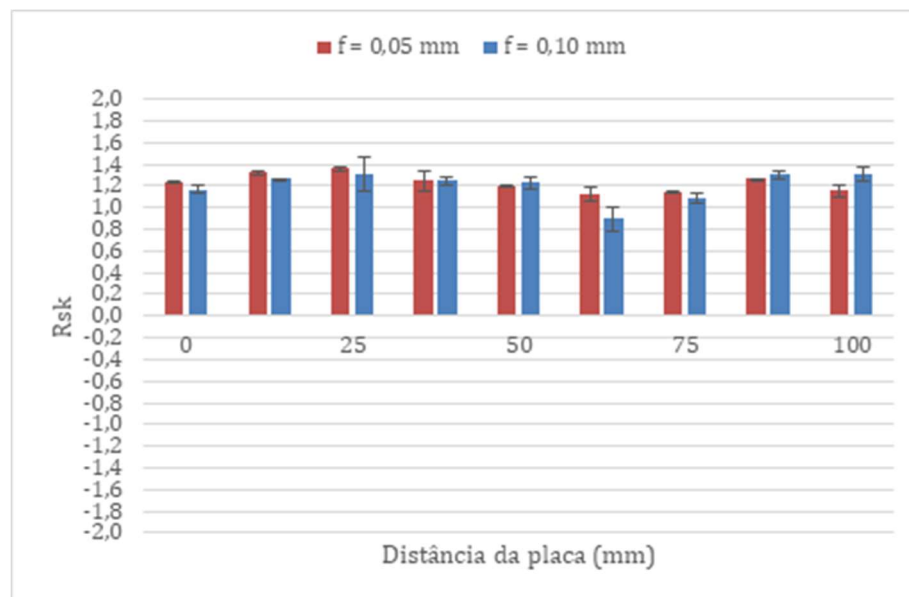
(a)



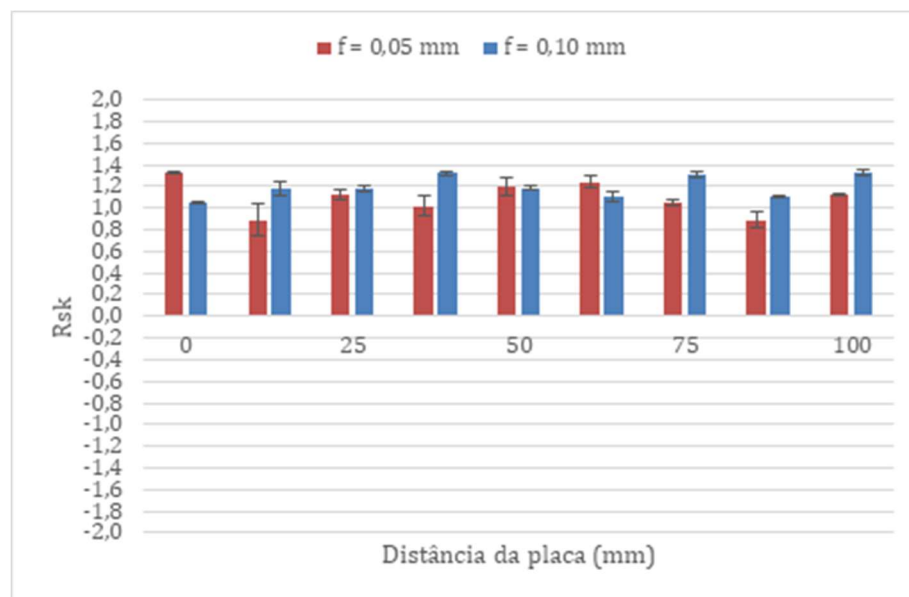
(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 25. Rsk para (a) 200 rpm e (b) 250 rpm.



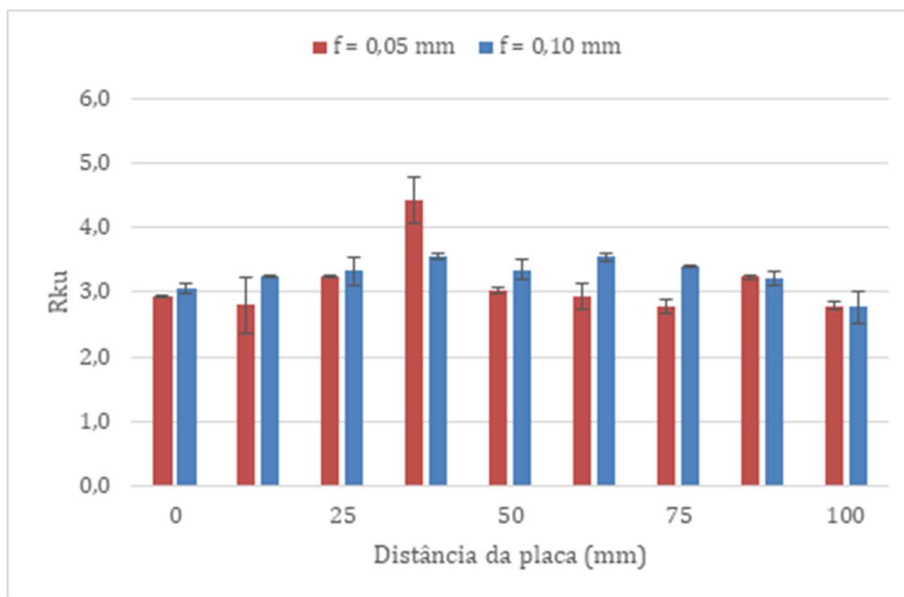
(a)



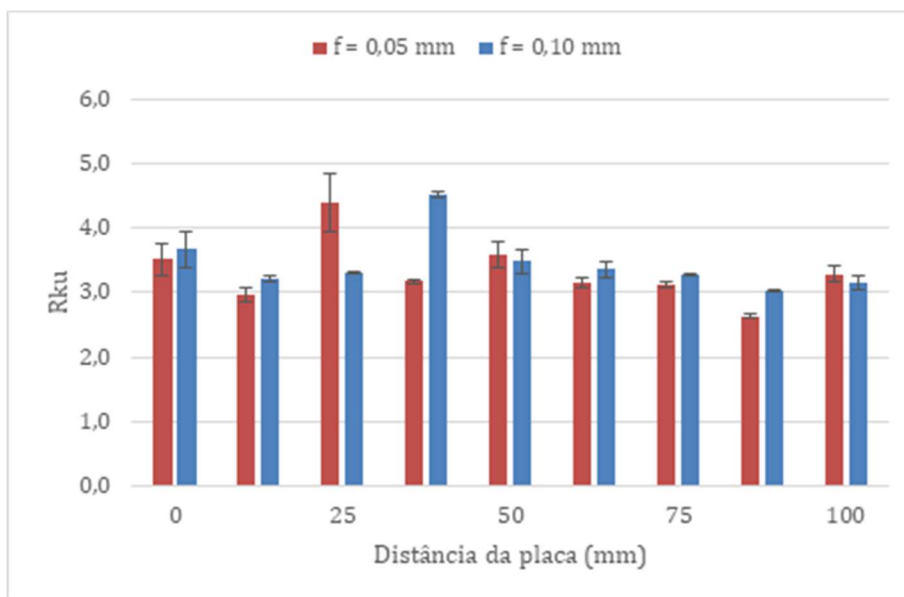
(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 26. Rku para (a) 200 rpm e (b) 250 rpm.



(a)



(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a criação das figuras e análise de cada processo, também foram criados quadros para a ANOVA no Excel, apresentadas a seguir. Para estudar os próximos dados, também foi adotado como padrão de confiança o valor de 95% ($F_{0,05}$) para afirmarmos a relevância de cada parâmetro estudado.

Quadro 10. ANOVA A1 (Fase 2).

		GL	MS	F0	pvalor	F0,05	F0,001
SStotais	511,423	71					
SSrotacao	244,458	1	244,458	215,825	0,000	4,113	12,832
SSavanço	79,739	1	79,739	70,399	0,000	4,113	12,832
SSposição	15,472	8	1,934	1,707	0,130	2,209	4,328
SSrot.av	53,276	1	53,276	47,036	0,000	4,113	12,832
SSrot.pos	35,502	8	4,438	3,918	0,002	2,209	4,328
SSav.pos	5,636	8	0,705	0,622	0,754	2,209	4,328
SSrot.av.pos	36,564	8	4,571	4,035	0,002	2,209	4,328
SSerro	40,776	36	1,133				

Quadro 11. ANOVA A2 (Fase 2).

		GL	MS	F0	pvalor	F0,05	F0,1	F0,2
SStotais	13,718	71						
SSrotacao	0,041	1	0,041	0,232	0,633	4,113	2,850	1,704
SSavanço	0,329	1	0,329	1,870	0,180	4,113	2,850	1,704
SSposição	1,873	8	0,234	1,330	0,261	2,209	1,847	1,477
SSrot.av	0,048	1	0,048	0,272	0,605	4,113	2,850	1,704
SSrot.pos	1,403	8	0,175	0,996	0,456	2,209	1,847	1,477
SSav.pos	2,114	8	0,264	1,500	0,192	2,209	1,847	1,477
SSrot.av.pos	1,570	8	0,196	1,114	0,377	2,209	1,847	1,477
SSerro	6,340	36	0,176					

Dessa vez, verificou-se que, no caso dos sinais do acelerômetro A1, na direção de corte (Quadro 10), a rotação aparece como parâmetro mais influente com uma confiabilidade de 99,9%, juntamente com o avanço a e combinação dos dois. E nada pode ser dito em relação a posição do corpo de prova. Já o A2, na direção de avanço (Quadro 11), a única variável de entrada que pode ser verificada como significativa é justamente a de avanço, com 98% de confiabilidade. Tendo em vista esses valores, não é possível afirmar que, pelo menos nas condições estudadas, a posição de cada colo tem interferência sobre essa variável.

Quadro 12. ANOVA Ra (Fase 2).

		GL	MS	F0	pvalor	F0,05	F0,02
SStotais	0,886	71					
SSrotacao	0,049	1	0,049	7,028	0,012	4,113	5,927
SSavanço	0,003	1	0,003	0,400	0,531	4,113	5,927
SSposição	0,111	8	0,014	1,977	0,078	2,209	2,686
SSrot.av	0,006	1	0,006	0,910	0,346	4,113	5,927
SSrot.pos	0,171	8	0,021	3,059	0,010	2,209	2,686
SSav.pos	0,169	8	0,021	3,021	0,011	2,209	2,686
SSrot.av.pos	0,125	8	0,016	2,242	0,047	2,209	2,686
SSerro	0,252	36	0,007				

Quadro 13. ANOVA Rz (Fase 2).

		GL	MS	F0	pvalor	F0,05	F0,02
SStotais	28,366	71					
SSrotacao	0,070	1	0,070	0,282	0,599	4,113	5,927
SSavanço	0,171	1	0,171	0,688	0,412	4,113	5,927
SSposição	4,543	8	0,568	2,291	0,043	2,209	2,686
SSrot.av	0,086	1	0,086	0,346	0,560	4,113	5,927
SSrot.pos	5,047	8	0,631	2,545	0,026	2,209	2,686
SSav.pos	5,744	8	0,718	2,897	0,013	2,209	2,686
SSrot.av.pos	3,782	8	0,473	1,907	0,089	2,209	2,686
SSerro	8,923	36	0,248				

Quadro 14. ANOVA Rsk (Fase 2).

		GL	MS	F0	pvalor	F0,05	F0,01
SStotais	1,603	71					
SSrotacao	0,083	1	0,083	6,027	0,019	4,113	7,396
SSavanço	0,024	1	0,024	1,718	0,198	4,113	7,396
SSposição	0,155	8	0,019	1,405	0,228	2,209	3,052
SSrot.av	0,073	1	0,073	5,273	0,028	4,113	7,396
SSrot.pos	0,358	8	0,045	3,242	0,007	2,209	3,052
SSav.pos	0,286	8	0,036	2,590	0,024	2,209	3,052
SSrot.av.pos	0,128	8	0,016	1,164	0,347	2,209	3,052
SSerro	0,496	36	0,014				

Quadro 15. ANOVA Rku (Fase 2).

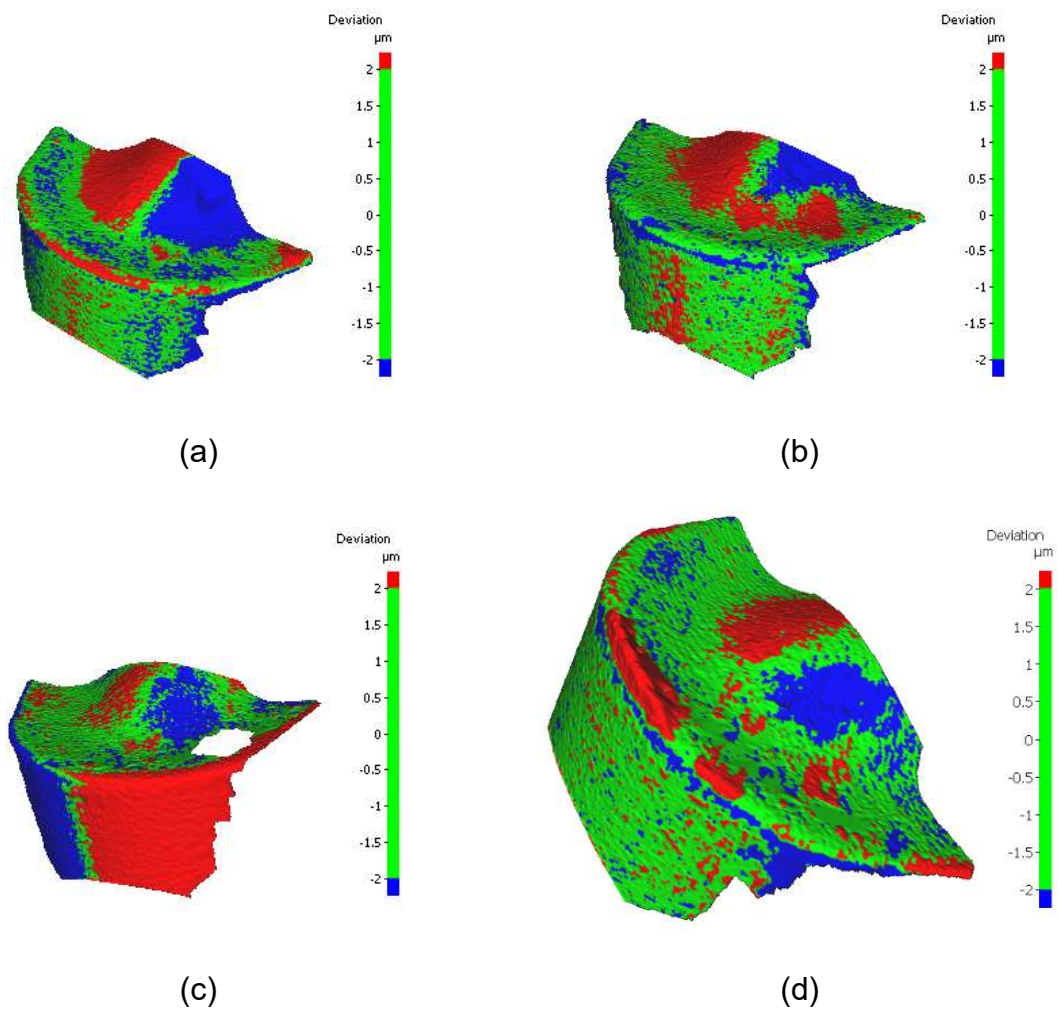
		GL	MS	F0	pvalor	F0,05	F0,01
SStotais	11,827	71					
SSrotacao	0,002	1	0,002	0,013	0,909	4,113	7,396
SSavanço	0,295	1	0,295	2,559	0,118	4,113	7,396
SSposição	3,606	8	0,451	3,911	0,002	2,209	3,052
SSrot.av	0,001	1	0,001	0,011	0,918	4,113	7,396
SSrot.pos	1,067	8	0,133	1,157	0,351	2,209	3,052
SSav.pos	0,489	8	0,061	0,530	0,826	2,209	3,052
SSrot.av.pos	2,220	8	0,278	2,408	0,034	2,209	3,052
SSerro	4,148	36	0,115				

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com relação aos parâmetros de rugosidade, verificou-se que a rotação é o fator que mais interfere nos valores de Ra (Quadro 12, com 98% de confiança) e Rsk (Quadro 14, com 95% de confiança). Já, sobre os parâmetros de rugosidade Rz (Quadro 13) e Rku (Quadro 15), a posição aparece como fator mais importante, com 95% de confiança para Rz e 98% para Rku.

Por fim, foi feita uma análise nos insertos utilizados para identificar se houve algum problema ou qualquer tipo de avaria que pudesse causar danos na produção ou interferência em relação a vibração do processo. Para essa análise, foram destacadas as imagens de todas as pontas dos insertos na Figura 27 a seguir. O inserto foi mais desgastado no ensaio #4, onde a combinação de parâmetros ocasionou maior tempo de corte (200 rpm e 0,05 mm de avanço). Após a análise, foi concluído que o desgaste do inserto é pequeno demais para que possa ter afetado a superfície; portanto, trata-se de uma fonte de variabilidade pouco prejudicial à análise.

Figura 27. Ponta do inserto do ensaio (a) #1, (b) #2, (c) #3 e (d) #4.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5. CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados da Fase 1, obtidos em uma máquina-operatriz convencional, com ferramenta negativa, e diferentes sensores de vibração, foi possível concluir que:

- Os fatores de influência estudados, a saber, rotação do eixo-árvore, avanço e posição do colo em usinagem, são significativos sobre os sinais de vibração e sobre a rugosidade do corpo de prova.
- No entanto, os transdutores piezoelétricos não foram capazes de inferir essa influência, que somente se verificou a partir do acelerômetro triaxial.
- Com relação ao acelerômetro triaxial, a variável avanço se mostra significativa sobre o sinal medido na direção ortogonal ao plano de trabalho (ou direção de profundidade, X) e também sobre aquele referente à direção de corte (Y); nada pode ser dito sobre o sinal medido na direção de avanço (Z).
- Em relação aos parâmetros de rugosidade Ra e Rz, a variação da posição do colo em usinagem se mostrou mais relevante do que qualquer outro fator de influência; e nada pôde ser afirmado sobre os parâmetros Rsk e Rku.

Após a análise dos resultados da Fase 2, obtidos em uma máquina-operatriz CNC, com ferramenta positiva, níveis reduzidos de rotação e avanço e empregando acelerômetros piezoelétricos, foi possível concluir que:

- A rotação é o fator que mais interfere sobre o sinal de vibração na direção de corte (A1), sendo também o mais relevante para os parâmetros de rugosidade Ra e Rsk.
- O avanço é o fator que mais interfere sobre o sinal de vibração na direção de avanço (A2).
- A posição do colo em usinagem é relevante para os parâmetros de rugosidade Rz e Rku.
- As condições de usinagem empregadas nesse estudo não promovem dano significativo à aresta principal de corte, de maneira que o desgaste da ferramenta não impõe uma fonte de variabilidade que atrapalhe a análise

dos resultados.

- Finalmente, essa abordagem pode contribuir de forma consistente no aprimoramento do planejamento de processos envolvendo a usinagem de aços endurecidos.

Destacam-se, também, como sugestões para trabalhos posteriores os seguintes tópicos:

- Análise de tensões residuais do componente usinado em função dos parâmetros usinagem, bem como com o monitoramento de vibrações.
- Seleção de parâmetros que visem induzir determinados perfis de tensões residuais com o intuito de aprimorar o comportamento mecânico dos componentes usinados.
- Realização de ensaios de tração e de fadiga para investigar, efetivamente, o comportamento mecânico de componentes de aço ferramenta endurecidos após a usinagem.
- E análise dos sinais de vibração no domínio da frequência, de forma a estudar de forma mais apropriada a ocorrência ou não de chatter.

REFERÊNCIAS

- ABRÃO, A. M.; ASPINWALL, D. K. The surface integrity of turned and ground hardened bearing steel. **Wear**, v. 196, n. 1–2, p. 279–284, 1996.
- AGUIAR, M. M. DE; DINIZ, A. E.; PEDERIVA, R. Correlating surface roughness, tool wear and tool vibration in the milling process of hardened steel using long slender tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 68, p. 1–10, 2013.
- ALTINTAS, Y. **Manufacturing Automation**. v. 48, 1982
- ANALOG DEVICES ADXL335. Small, Low Power, 3-Axis Accelerometer (ADXL335). **Analog Device, Inc**, p. 1–14, 2009.
- ANTONIALLI, A. I. S.; DINIZ, A. E.; PEDERIVA, R. Vibration analysis of cutting force in titanium alloy milling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 1, p. 65–74, 2010.
- ASTM INTERNATIONAL. Standard Specification for Tool Steels Alloy A681-08. v. 94, n. Reapproved 2004, p. 1–14, 2005.
- BEER, F.; JOHNSTON, R. **Mechanics of Materials, Eighth Edition - SI**. v. 53, 2020
- CERATIZIT. **Catálogo de insertos para torneamento**. 2019
- CHELLADURAI, H.; JAIN, V. K.; VYAS, N. S. Development of a cutting tool condition monitoring system for high speed turning operation by vibration and strain analysis. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 37, n. 5–6, p. 471–485, 2008.
- DAGNALL, H. Exploring surface texture. p. 178, 2011.
- DING, H. *et al.* Experimental study on machinability improvement of hardened tool steel using two dimensional vibration-assisted micro-end-milling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 12, p. 1115–1118, 2010.
- DING, T. *et al.* Empirical models and optimal cutting parameters for cutting forces and surface roughness in hard milling of AISI H13 steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 51, n. 1–4, p. 45–55, 2010.
- Engineer Ambitiously. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br.html>> Acesso em 28 jan. 2021.
- GALARZA, F. A. M. *et al.* Design and experimental evaluation of an impact damper to be used in a slender end mill tool in the machining of hardened steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 106, n. 5–6, p. 2553–2567, 2020.
- GARCÍA PLAZA, E.; NÚÑEZ LÓPEZ, P. J. Application of the wavelet packet transform to vibration signals for surface roughness monitoring in CNC turning

operations. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 98, p. 902–919, 2018.

HESSAINIA, Z. *et al.* On the prediction of surface roughness in the hard turning based on cutting parameters and tool vibrations. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 46, n. 5, p. 1671–1681, 2013.

Imagine Eletrônica. Disponível em:

<<https://imagineeletronica.lojavirtualnuvem.com.br/>> Acesso em 28 jan. 2021.

ISO. ISO1302: Geometrical Product Specifications (GPS) -- Indication of surface texture in technical product documentation. **Iso**, v. 2002, p. 54, 2002.

KUMABE, J.; HACHISUKA, M. Super-precision cylindrical machining. **Precision Engineering**, v. 6, n. 2, p. 67–72, 1984.

KUMAR, A.; PRADHAN, S. K. Investigations into hard turning process using wiper tool inserts. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 5, p. 12579–12587, 2018.

LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística aplicada**. 2015.

MACHADO, A. R. *et al.* **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2009.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. v. 30, 1998.

NETO, J. C. DA S. **Metrologia e Controle Dimensional**. 2012.

ÖSTERLIND, T.; DAGHINI, L.; ARCHENTI, A. Evaluation of tool steel alloy performance in a milling operation through operational dynamic parameters. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 114, n. August 2016, p. 54–59, 2017.

PANDA, A. *et al.* Tool condition monitoring during hard turning of AISI 52100 Steel: A case study. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 9, p. 18585–18592, 2018.

PCB Piezotronics an MTS Company. Disponível em: <[https://https://www.pcb.com/](https://www.pcb.com/)> Acesso em 28 jan. 2021.

RAO, S. **Vibrações Mecânicas**, 2009.

RECH, J. *et al.* Characterization and modelling of the residual stresses induced by belt finishing on a AISI52100 hardened steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 208, n. 1–3, p. 187–195, 2008.

RECH, J.; MOISAN, A. Surface integrity in finish hard turning of case-hardened steels. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 5, p. 543–550, 2003.

SANDVIK COROMANT. Turning tools. 2015.

SHARMA, V.; PANDEY, P. M. Optimization of machining and vibration parameters for residual stresses minimization in ultrasonic assisted turning of 4340 hardened steel. **Ultrasonics**, v. 70, p. 172–182, 2016.

SMITH, G. T. **Industrial metrology**. v. 14, 1992.

THOMAS, W. *et al.* A new type of impact damper with long overhangs in the internal turning of hardened materials. **Procedia CIRP**, v. 82, p. 255–260, 2019.

TOTIS, G. *et al.* Efficient evaluation of process stability in milling with Spindle Speed Variation by using the Chebyshev Collocation Method. **Journal of Sound and Vibration**, v. 333, n. 3, p. 646–668, 2014.

VARGAS, R. V. Adopting the Quadratic Mean Process to Quantify the Qualitative Risk Analysis. p. 1–8, 2013.

VASHISHT, R. K.; PENG, Q. Efficient active chatter mitigation for boring operation by electromagnetic actuator using optimal fractional order PD λ controller. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 276, n. June 2019, p. 116423, 2020.

VILLARES METALS. Vh13 Iso. **Aços para trabalho a quente**, 2006.

XUEPING, Z.; ERWEI, G.; RICHARD LIU, C. Optimization of process parameter of residual stresses for hard turned surfaces. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 9, p. 4286–4291, 2009.

YASUOKA, M. *et al.* Improvement of the fatigue strength of SUS304 austenite stainless steel using ultrasonic nanocrystal surface modification. **Surface and Coatings Technology**, v. 218, n. 1, p. 93–98, 2013.

YUAN, Y. *et al.* Freeform surface fabrication on hardened steel by double frequency vibration cutting. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 275, n. March 2019, p. 116369, 2020.

ZHANG, X. C. *et al.* Optoelectronic study of piezoelectric field in strained-layer superlattices. **Superlattices and Microstructures**, v. 12, n. 4, p. 487–490, 1992.