

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

PAULO DE TARSO DURIGAN

**INVESTIGAÇÃO SOBRE O POTENCIAL DA
INSTRUMENTAÇÃO DE BAIXO CUSTO NA
DIGITALIZAÇÃO DE MÁQUINAS-FERRAMENTA
ANTIGAS E SEU IMPACTO NA RUGOSIDADE
SUPERFICIAL**

SÃO CARLOS-SP
2023

PAULO DE TARSO DURIGAN

**INVESTIGAÇÃO SOBRE O POTENCIAL DA INSTRUMENTAÇÃO DE BAIXO CUSTO NA
DIGITALIZAÇÃO DE MÁQUINAS-FERRAMENTA ANTIGAS E SEU IMPACTO NA
RUGOSIDADE SUPERFICIAL**

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. Sidney Bruce Shiki

Co-orientador: Prof. Dr. Gustavo Franco Barbosa

SÃO CARLOS-SP
2023

Durigan, Paulo de Tarso

Investigação sobre o potencial da instrumentação de baixo custo na digitalização de máquinas-ferramenta antigas e seu impacto na rugosidade superficial / Paulo de Tarso Durigan -- 2023.
76f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos
Orientador (a): Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki
Banca Examinadora: Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki, Prof. Dr. Armando Ítalo Sette Antonialli, Prof. Dr. Luis Gonzaga Trabasso
Bibliografia

1. Digitalização. 2. Monitoramento de processos. 3. Instrumentação de baixo custo. I. Durigan, Paulo de Tarso. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Ronildo Santos Prado - CRB/8 7325



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 Paulo de Tarso Durigan, realizada em 01/02/2023.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki (UFSCar)

Prof. Dr. Armando Ítalo Sette Antonialli (UFSCar)

Prof. Dr. Luís Gonzaga Trabasso (SENAI)

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

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Geraldo e Fátima, minhas irmãs Kamilla e Ana Cecília, meu cunhado Evandro e minha noiva Gabriela, por toda dedicação e apoio em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus pelo dom da vida, pelas oportunidades e principalmente pela força e resiliência sem as quais seria impossível a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki pela dedicação, paciência e companheirismo ao longo desta jornada.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Gustavo Franco Barbosa pelas ideias e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Armando Ítalo Sette Antonialli por todo suporte na caracterização de materiais e ensaios realizados.

À Escola SENAI “Oscar Lúcio Baldan”, pela disponibilidade de materiais, equipamentos e suporte técnico fornecido.

À Universidade Federal de São Carlos, por todo apoio necessário.

À CAPES, pelo fomento e financiamento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSCar

À todos, enfim, que contribuíram para a concretização deste sonho, minha eterna gratidão.

"A imaginação muitas vezes nos leva a mundos que nunca sequer existiram. Mas sem ela, não vamos a lugar algum."

Carl Sagan

RESUMO

A manufatura inteligente consiste na convergência entre tecnologias da Indústria 4.0 dedicadas à modernização dos sistemas produtivos, os quais apresentam uma crescente demanda por gerenciamento ativo e em tempo real para maximizar seus processos. Nesse sentido, a inserção de novas tecnologias para o monitoramento dos processos de fabricação é cada vez mais urgente para garantir a competitividade. No entanto, muitas empresas possuem estrutura defasada, na qual máquinas-ferramenta antigas, desatualizadas e que não oferecem comunicação ou transmissão de dados representam parte significativa dos equipamentos em operação. Entre os principais motivos dessa realidade estão a falta de recursos financeiros para atualização do parque fabril e a falta de visão estratégica do negócio. Dentro desse contexto, o presente trabalho propõe um estudo sobre o impacto da digitalização de máquinas-ferramenta antigas na produtividade e o potencial de melhoria da qualidade das superfícies geradas por meio de instrumentação de baixo custo. Para o desenvolvimento deste trabalho, sensores e hardware de baixo custo foram instalados em um torno universal para o monitoramento contínuo e em tempo real do processo de torneamento. A instrumentação com base no conceito IoT (*Internet of Things*), permitiu a coleta e troca de dados com um sistema de análise em nuvem através de conexão Wifi. Uma placa de prototipagem rápida foi utilizada para coletar os dados do sensor e transmitir para a plataforma em nuvem, permitindo a criação de um histórico e o acompanhamento do processo em tempo real. Os resultados confirmam a influência da velocidade de corte e do avanço no acabamento superficial, como descrito na literatura. Já a instrumentação utilizada apresentou bons resultados no monitoramento da rotação e do avanço. A diferença entre as rotações (medida pelo sensor e de configuração) foram menores que 4,38%, enquanto as diferenças no avanço não ultrapassaram 6,33%. Os resultados dos parâmetros de vibração não ficaram tão evidentes em função das baixas amplitudes apresentadas no espectro analisado. O principal motivo está associado à baixa sensibilidade do acelerômetro associado ao uso de arestas de corte novas em cada experimento, o que reduz os níveis de vibração do processo. Apesar das baixas amplitudes, foi possível estabelecer a influência dos valores RMS na rugosidade da superfície. Espera-se que o presente trabalho contribua para as pesquisas recentes em monitoramento de processos de fabricação e que permita uma análise sólida sobre os benefícios do monitoramento em tempo real da usinagem em tornos mecânicos universais.

Palavras-chave: monitoramento; máquinas-ferramenta; digitalização; instrumentação; baixo custo.

ABSTRACT

Intelligent manufacturing involves the convergence of Industry 4.0 technologies dedicated to modernizing production systems, which require active and real-time management to maximize their processes. In this sense, the integration of new technologies for monitoring manufacturing processes is becoming increasingly urgent to ensure competitiveness. However, many companies have outdated structures in which old and outdated machine tools that do not offer communication or data transmission represent a significant portion of the equipment in operation. The main reasons for this reality are the lack of financial resources for updating the manufacturing park and the lack of strategic vision for the business. Within this context, this study proposes an investigation into the impact of digitizing legacy machine tools on productivity and the potential for improving surface quality through low-cost instrumentation. For the development of this work, low-cost sensors and hardware were installed on a universal lathe for continuous and real-time monitoring of the turning process. Instrumentation based on the IoT (Internet of Things) concept allowed for data collection and exchange with a cloud-based analysis system via a Wi-Fi connection. A rapid prototyping board was used to collect sensor data and transmit it to the cloud platform, allowing for the creation of a history and real-time monitoring of the process. The results confirm the influence of cutting speed and feed rate on surface finish, as described in the literature. The instrumentation used showed good results in monitoring rotation and feed rate. The difference between the rotations (measured by the sensor and the configuration) was less than 4.38%, while the differences in feed rate did not exceed 6.33%. The results of vibration parameters were not as evident due to the low amplitudes presented in the analyzed spectrum. The main reason is associated with the low sensitivity of the accelerometer associated with the use of new cutting edges in each experiment, which reduces the vibration levels of the process. Despite the low amplitudes, it was possible to establish the influence of the RMS values on surface roughness. It is expected that this study will contribute to recent research on manufacturing process monitoring and enable a solid analysis of the benefits of real-time monitoring of machining on universal mechanical lathes.

Keywords: monitoring; machine tools; digitalization; instrumentation; low cost.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Característica de um espectro de frequência	18
Figura 2 – Características da integridade superficial.....	20
Figura 3 – Representação da rugosidade nas direções transversal e longitudinal....	21
Figura 4 – Representação esquemática da rugosidade média R_a	23
Figura 5 – Representação esquemática da rugosidade total R_t	23
Figura 6 – Equipamentos da escola SENAI: a) ambiente didático e b) torno utilizado no estudo.....	31
Figura 7 – Diagrama Ferro-Cementita.....	33
Figura 8 – Metalografia do aço ABNT 1020: seções a) transversal e b) longitudinal	34
Figura 9 – Dimensões do corpo de prova	34
Figura 10 – Fases da confecção do corpo de prova: a) material como fornecido, b) em confecção e c) corpos de prova finalizados	35
Figura 11 – Montagem a) da ferramenta no suporte e b) fixação na máquina	36
Figura 12 – Sensores e ímã utilizados no sistema de monitoramento	37
Figura 13 – Placa de prototipagem DevKit V1 e a <i>basebord</i>	37
Figura 14 – Posição dos sensores no torno universal.....	38
Figura 15 – <i>Dashboard</i> da plataforma <i>ThingSpeak</i>	40
Figura 16 – Modelo de monitoramento proposto.....	41
Figura 17 – Condições de ensaio para cada <i>step</i>	42
Figura 18 – Rugosímetro utilizado.....	43
Figura 19 – Influência dos parâmetros de corte na rugosidade média R_a	47
Figura 20 – Influência dos parâmetros de corte na rugosidade total R_t	47
Figura 21 – Representação 3D da influência dos parâmetros de corte em R_a	48
Figura 22 – Representação 3D da influência dos parâmetros de corte em R_t	49
Figura 23 – Influência dos parâmetros de corte no RMS_y	50

Figura 24 – Influência dos parâmetros de corte no RMS_z	51
Figura 25 – Sinal de vibração e espectro em frequência nas condições C ₁ , C ₅ C ₉ : Figuras a) e c) eixo y e b) e d) eixo z.....	52
Figura 26 – Representação 3D da influência dos parâmetros de corte no RMS_y	52
Figura 27 – Representação 3D da influência dos parâmetros de corte no RMS_z	53
Figura 28 – Correlação entre os parâmetros R_a e RMS_y	55
Figura 29 – Correlação entre os parâmetros R_a e RMS_z	55
Figura 30 – Correlação entre os parâmetros R_t e RMS_y	56
Figura 31 – Correlação entre os parâmetros R_t e RMS_z	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características técnicas do torno universal	30
Tabela 2 – Composição química do aço ABNT 1020.....	32
Tabela 3 – Porcentagem de perlita por amostra	33
Tabela 4 – Especificações da ferramenta	36
Tabela 5 – Especificações do porta-ferramenta	36
Tabela 6 – Características da placa ESP32 DevKit V1	38
Tabela 7 – Condições do ensaio	42
Tabela 8 – Comparação entre as rotações nominais e do sensor	45
Tabela 9 – Comparação entre as rotações do tacômetro e do sensor.....	45
Tabela 10 – Comparação entre os avanços nominais e experimentais	45
Tabela 11 – Análise de variância (ANOVA) para o monitoramento da rotação.....	46
Tabela 12 – Análise de variância (ANOVA) para o monitoramento do avanço	46
Tabela 13 – Análise de variância (ANOVA) para o R_a	48
Tabela 14 – Análise de variância (ANOVA) para o R_t	48
Tabela 15 – Análise de variância (ANOVA) para o RMS_y	51
Tabela 16 – Análise de variância (ANOVA) para o RMS_z	51
Tabela 17 – Interpretação do coeficiente de Pearson	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	VIBRAÇÃO MECÂNICA	17
2.2	INTEGRIDADE SUPERFICIAL	19
2.2.1	RUGOSIDADE	20
2.3	INDUSTRIA 4.0 E A DIGITALIZAÇÃO NA MANUFATURA	25
2.4	INSTRUMENTAÇÃO DE BAIXO CUSTO	27
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1	MÁQUINA-FERRAMENTA.....	30
3.2	MATERIAL PROCESSADO	31
3.3	CORPO DE PROVA E FERRAMENTAS	34
3.4	INSTRUMENTAÇÃO PARA O MONITORAMENTO	37
3.5	INSTALAÇÃO DE DISPOSITIVOS NA IMPLMENTAÇÃO IoT.....	38
3.6	CONFIGURAÇÕES DA PLATAFORMA E DISPOSITIVOS	39
3.7	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	41
3.8	ANÁLISE DA RUGOSIDADE	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1	SISTEMA DE MONITORAMENTO	44
4.2	INFLUÊNCIA NA RUGOSIDADE	46
4.3	INFLUÊNCIA NA VIBRAÇÃO.....	50
4.4	CORRELAÇÃO ENTRE RUGOSIDADE E VIBRAÇÃO	54
5	CONCLUSÃO	57
	REFERÊNCIAS	59
	APÊNDICE A – CÓDIGO DESENVOLVIDO	63

APÊNDICE B – VALORES DE R_a	73
APÊNDICE C – VALORES DE R_t	74
APÊNDICE D – VALORES DE RMS_y	75
APÊNDICE E – VALORES DE RMS_z	76

1 INTRODUÇÃO

A sociedade moderna é resultado da evolução de diversos fatores que ao longo dos séculos moldaram o comportamento humano. Dentre tais fatores, destacam-se o desenvolvimento de materiais e novas tecnologias, que desempenharam papéis determinantes nos principais eventos históricos, tais como as grandes guerras e as revoluções industriais. No presente, esses avanços são fundamentais em soluções para as mais diversas áreas, desde próteses utilizadas na medicina até materiais semicondutores empregados na comunicação em tempo real. No futuro, tais elementos serão de suma importância no desenvolvimento de soluções para enfrentar os desafios atuais (CALLISTER e RETHWISCH, 2018).

A manufatura industrial, que é responsável pelo processamento de materiais, tem experimentado profundas transformações na última década, sobretudo em países desenvolvidos que investem intensamente em inovação. As novas ferramentas baseadas em inovação tecnológica exercem uma forte influência no reposicionamento das organizações no mercado global. A nova cadeia de manufatura é construída com base em sistemas digitais complexos que, ao se integrarem em rede e automatizarem processos, aproximam objetos físicos e virtuais, gerando uma produção industrial cada vez mais flexível, confiável e personalizada. Em países em desenvolvimento, como o Brasil, o debate em torno da indústria do futuro apresenta dois caminhos claramente definidos: o primeiro está associado ao aumento da atividade industrial, buscando identificar oportunidades para a transformação estrutural da economia; o segundo envolve o aumento do nível de digitalização das indústrias já estabelecidas, mas que demonstram pouco ou nenhum progresso tecnológico (ARBIX et al., 2017).

Com o objetivo de incorporar novas tecnologias aos modelos de negócio, a Indústria 4.0 se caracteriza pela integração dos processos produtivos e gerenciais por meio dessas inovações. A integração dessas ferramentas tem como objetivo facilitar o fluxo de informações e otimizar toda a cadeia produtiva. Os principais benefícios associados a essa integração são a redução dos custos operacionais e, conseqüentemente, a geração de maior valor agregado ao produto final (ALBUKHITAN, 2020). Entretanto, muitas empresas ainda não adotaram essa abordagem no cenário atual. Alguns modelos de negócio ultrapassados ainda persistem em uma economia mundial cada vez mais globalizada e volátil. As inúmeras crises econômicas ocorridas nas últimas décadas tornam difícil a sobrevivência de

organizações obsoletas no mercado, para as quais a falta de visão estratégica e, principalmente, a escassez de recursos financeiros são os principais desafios enfrentados (LOCKWOOD et al., 2018).

No presente trabalho é apresentada uma proposta de readequação de máquinas e equipamentos obsoletos tecnologicamente, inserindo-os na era digital utilizando instrumentação de baixo custo. O objetivo principal é avaliar como o monitoramento dos parâmetros de usinagem em um torno mecânico universal influencia a qualidade superficial das peças usinadas. Para tal análise, foram instalados na máquina ferramenta, sensores e um microprocessador conectado a uma rede Wifi. Os dados coletados foram processados e enviados à uma plataforma dedicada ao monitoramento de informações em tempo real. Tais parâmetros foram confrontados com parâmetros de rugosidade obtidos do material torneado, estabelecendo os níveis de correlação e o potencial do sistema no monitoramento do processo. Como resultado do projeto, espera-se que o leitor obtenha uma nova perspectiva sobre as possibilidades de gerenciamento dos processos produtivos de diversos setores da manufatura mecânica.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é investigar o potencial de um sistema de monitoramento de baixo custo por meio da correlação entre os parâmetros de usinagem, vibração e rugosidade no torneamento do aço ABNT 1020 em um torno universal. A potencialidade para identificação de desvios no processo e possíveis manutenções também fazem parte do escopo deste projeto de pesquisa. Para o estudo proposto foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Escolher a instrumentação adequada para o sistema de monitoramento de baixo custo;
- Estruturar o algoritmo e a plataforma para o gerenciamento dos dados coletados pelos sensores;
- Instalar os componentes na máquina e realizar o torneamento com base no planejamento experimental;
- Analisar os resultados e estabelecer o nível de correlação entre os parâmetros para a validação do sistema de monitoramento proposto.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho foi estruturado nos seguintes capítulos:

- **1 Introdução:** É feita uma breve contextualização do tema abordado, bem como da justificativa e objetivos do trabalho;
- **2 Revisão Bibliográfica:** Apresentam-se os tópicos mais relevantes ao entendimento do objeto de pesquisa, destacando aspectos relacionados às características de vibrações mecânicas, integridade superficial, bem como elementos sobre digitalização e manufatura inteligente;
- **3 Materiais e Métodos:** São abordados os materiais, procedimentos e equipamentos utilizados para a caracterização e monitoramento do processo de torneamento, assim como para a realização dos ensaios experimentais e análise dos resultados;
- **4 Resultados e Discussão:** São apresentados os resultados obtidos na experimentação, analisando-os estatisticamente;
- **5 Conclusão:** Seção de encerramento contendo as conclusões obtidas a partir do objeto de pesquisa, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são explorados os fundamentos teóricos pertinentes ao desenvolvimento deste projeto, os quais são fundamentais para a compreensão de elementos como objetivos, hipótese inicial, metodologia utilizada, resultados e discussões. Para tal, são discutidos fundamentos de usinagem, conceitos relacionados à Engenharia de Superfícies e parâmetros para caracterizar a morfologia da camada externa em peças usinadas. A caracterização da Indústria 4.0, a manufatura inteligente e ferramentas acessíveis, como a instrumentação de baixo custo, completam os assuntos investigados nesta revisão.

2.1 VIBRAÇÃO MECÂNICA

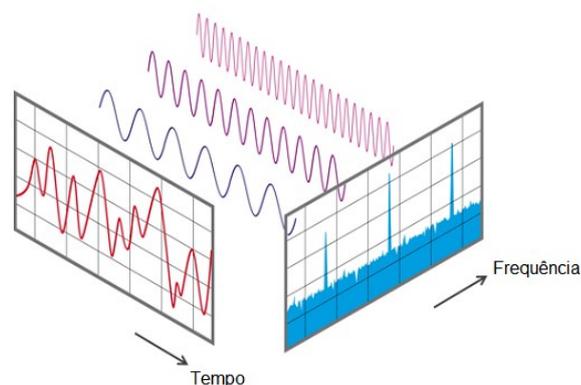
Qualquer movimento em torno de um ponto de referência que se repita após um intervalo de tempo é denominado vibração ou oscilação. A trajetória descrita por um pêndulo simples ou o movimento de um pistão em um motor de combustão interna são exemplos típicos de vibração. A teoria de vibração trata do estudo de movimentos oscilatórios de corpos e as forças associadas a eles. As vibrações são caracterizadas pela frequência (Hz), definida como a quantidade de ciclos completos durante um segundo, e pelo período (s), conceito associado ao tempo de uma oscilação completa (RAO, 2008).

Para Brigham (1988), sinais oscilatórios em sistemas reais consistem em muitas frequências que ocorrem simultaneamente. Esses componentes podem ser visualizados em espectros de frequências (Figura 1), que consistem gráficos da amplitude dos sinais em função de cada frequência que compõem o sinal. A análise espectral é uma das principais técnicas na avaliação e diagnóstico de sistemas vibracionais. A FFT (do inglês *Fast Fourier Transform*) é a ferramenta essencial para se obter a transformação do sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência. Esta representação, denominada espectro de frequência, é a maneira mais usual de representar as características de um sinal captado. Através do espectro de frequência podem-se avaliar as diversas frequências componentes do sinal e a magnitude de cada um destes componentes (SPIEGEL, 1974).

Sinais de vibração podem ser analisados a partir de métricas como: valor pico-a-pico, valor de pico, valor médio e valor eficaz RMS (do inglês *Root Mean Square*) ou nível quadrático médio de um sinal senoidal. O valor pico-a-pico indica a máxima

amplitude da onda e é usado, por exemplo, onde o deslocamento vibratório da máquina é parte crítica na tensão máxima de elementos de máquina. Já o valor de pico é usado na indicação de níveis de impacto de curta duração e o valor médio, quando se considera um valor da quantidade física da amplitude em um determinado tempo. Por fim o valor RMS é a mais importante medida da amplitude porque ele mostra a média da energia contida no movimento vibratório. Portanto, mostra o potencial destrutivo da vibração (SOTELO e FRANÇA, 2006).

Figura 1 – Característica de um espectro de frequência.



Fonte: Adaptado de Rao (2008).

A análise do fenômeno de vibração é fundamental em diversas práticas industriais como os processos de usinagem. Com relação ao torneamento, a vibração tem um efeito adverso em medidas de desempenho do processo como acabamento superficial, desgaste da ferramenta, características de força etc. Métodos de controle de vibração de máquinas-ferramenta, relatados na literatura, basicamente envolvem a redução automática dos parâmetros de corte ou a estabilização da posição relativa da ferramenta de corte e da peça de trabalho (CHOUDHURY, GOUDIMENKO e KUDINOV, 1997).

Com o desenvolvimento da indústria de manufatura, o bom desempenho de máquinas-ferramenta voltadas à usinagem de alta velocidade e precisão são necessários mais do que nunca. Em recente publicação, Yang *et al.* (2020) mostram o status das pesquisas sobre os métodos de análise e controle de vibração em usinagem, além de classificar os estudos relacionados sobre modelagem de sistemas e tecnologias de identificação e controle de vibração. Os autores sustentam que,

embora muitos trabalhos tenham sido realizados na área, ainda são necessários estudos focados em modelagem de sistemas mais completos e que estejam integrados às atuais condições das máquinas-ferramenta, sugerindo estudos para condições específicas de manufatura.

2.2 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

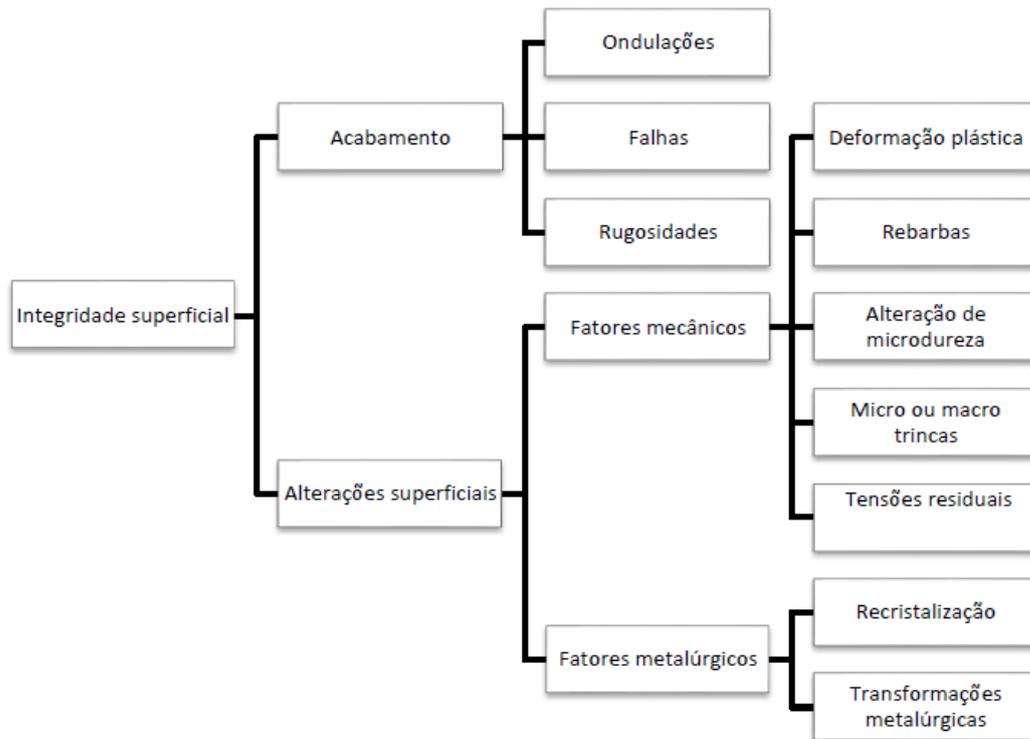
A curiosidade sobre as superfícies é quase tão antiga quanto os estudos sobre os materiais utilizados pelo homem. Desde o início dos tempos até meados da década de 1970, a humanidade tem trabalhado no desenvolvimento de técnicas para o controle de superfícies, embora ainda não a reconhecesse como uma importante área da manufatura. A engenharia de superfície é uma área multidisciplinar da ciência que abrange os processos de fabricação de camadas superficiais, subsuperficiais, revestimentos (etapas intermediárias e para uso final), fenômenos correlacionados ao seu processamento e o desempenho obtidos por eles (DAVIS, 2001).

A engenharia de superfícies abrange todos os problemas científicos e técnicos conectado com a fabricação de superfícies. O atrito em ferramentas de corte, modificações por meio de tratamentos térmicos e revestimentos e a otimização de dispositivos ópticos por meio do controle topológico de superfícies são apenas alguns elementos que mostram as inúmeras interfaces com as diversas áreas do conhecimento. Também inclui a pesquisa de fenômenos físico-químicos potencialmente correlacionados ao processo e propriedades utilizáveis de camadas superficiais, bem como problemas relacionados com design de superfície (BURAKOWSKI e WIERZCHON, 1998).

As características superficiais de uma peça usinada são compostas pela ação de diferentes mecanismos como deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e às vezes reações químicas (SANTOS e SALES, 2007). Todos esses fatores podem ter efeitos diferentes na superfície gerada, portanto, englobam muitas variações de relativa complexidade. Deste modo, o conceito de integridade superficial está diretamente ligado a anisotropia em materiais, envolvendo elementos além da rugosidade da superfície e sua forma geométrica. Este conceito abrange diversas características da superfície e subsuperfície. A Figura 2 mostra de forma resumida a classificação de alterações que podem ocorrer em uma peça usinada por um processo de usinagem convencional.

São classificadas em alterações na superfície (acabamento superficial) e alterações em camadas internas da peça (alterações sub superficiais).

Figura 2 – Características da integridade superficial.



Fonte: Adaptado de MACHADO *et al.* (2015)

2.2.1 RUGOSIDADE

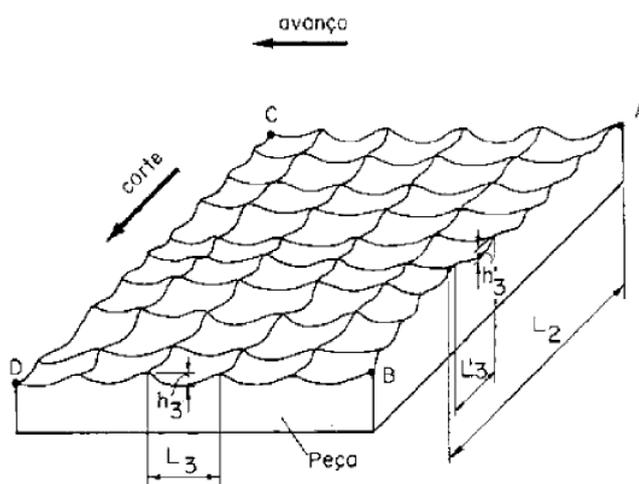
A rugosidade superficial pode ser definida como o conjunto de irregularidades micro geométricas geradas no processo de obtenção da superfície através de uma ferramenta de corte. Tal topografia, pode ser mensurada com o uso de equipamentos específicos e representada por parâmetros essenciais para o controle de qualidade e monitoramento de processos de usinagem (GADELMAWLA *et al.*, 2002).

Para Hioki (2006), a rugosidade de uma superfície usinada é um dos principais indicadores no controle de qualidade de produtos, pois está diretamente relacionada a propriedades como resistência à fadiga, resistência ao desgaste e mecanismos de transferência de calor. A avaliação topográfica de uma superfície é fundamental na compreensão de diversos fenômenos como atrito, deformação, fluxo de calor e corrente elétrica. Por esta razão, a rugosidade da superfície tem sido objeto de

investigações experimentais e teóricas por muitas décadas.

A rugosidade superficial é geralmente classificada em transversal e longitudinal, como indicado na Figura 3. A rugosidade transversal apresenta-se na direção do movimento de avanço da ferramenta (direção AC), enquanto a rugosidade longitudinal está na direção do movimento de corte (direção CD). Conforme o processo e as condições de usinagem, pode predominar um ou outro tipo de rugosidade. Assim, nas operações de torneamento e aplainamento, a máxima rugosidade é encontrada geralmente na direção de avanço, a qual é chamada de rugosidade transversal (FERRARESI, 2006).

Figura 3 – Representação da rugosidade nas direções transversal e longitudinal.



Fonte: Adaptado de FERRARESI (2006).

Existem diversas aplicações que demonstram a importância do controle da rugosidade em superfícies acabadas, como os processos de fabricação por usinagem. Nestes processos, existem diversos fatores que podem influenciar na qualidade superficial de uma peça como: máquina ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e material da ferramenta, técnicas de aplicação do fluido, atmosfera e processo de usinagem. Métodos estatísticos aplicados ao resultado da medição da rugosidade de uma superfície podem identificar as contribuições relativas de cada um destes parâmetros para a geometria final (WHITEHOUSE, 1997).

O perfil de rugosidade em uma superfície pode ser caracterizado por meio de parâmetros descritos na literatura, os quais servem como métrica para definir a viabilidade das aplicações. Conceitos de projeto, desgaste, atrito e lubrificação são profundamente influenciados pela rugosidade. Existem atualmente centenas de parâmetros para caracterizar uma superfície usinada (WHITEHOUSE, 1997). O autor ainda afirma que os parâmetros podem ser classificados como:

- Parâmetros de amplitude: São determinados pelas alturas dos picos, profundidades dos vales ou os dois, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície.
- Parâmetros de espaço: São determinados pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície.
- Parâmetros híbridos: São determinados pela combinação dos parâmetros de amplitude e espaço.

O estudo aprofundado sobre os diferentes parâmetros de rugosidade e suas aplicações não fazem parte do escopo deste trabalho. Sendo assim, serão descritos a seguir apenas os parâmetros relevantes para o desenvolvimento da presente pesquisa.

A rugosidade média (R_a) é provavelmente o parâmetro de rugosidade com maior aplicabilidade na indústria. Sua popularidade é atribuída à facilidade de cálculo, até mesmo com aparelhos analógicos (WHITEHOUSE, 1997). Sua definição pode ser expressa como o desvio médio de um perfil de sua linha média, como mostrado na Figura 4. Outra definição do seu conceito seria a distância média de um perfil desde sua linha média, sobre um comprimento medido (KALPAKJIAN e SCHMID, 2010). Matematicamente, o conceito pode ser expresso pela Equação 1, na qual L é o comprimento da amostra.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L y(x) dx \quad (1)$$

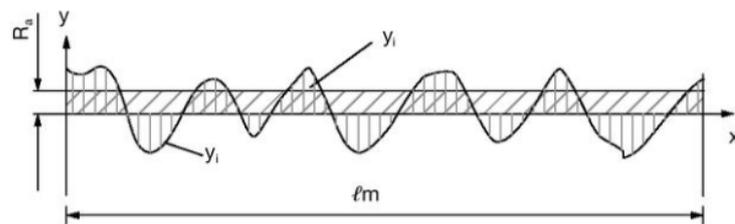
O parâmetro de rugosidade R_a é puramente uma medida de escala e define o perfil médio da rugosidade, mas não dá nenhuma informação sobre a morfologia do

perfil, a qual pode influenciar o desempenho funcional da superfície. Para Machado *et al* (2015), a rugosidade média teórica pode ser expressa relacionando-se parâmetros geométricos da ferramenta e de operação da usinagem como indicado na Equação 2, em que f é o avanço (mm/volta) e r_ϵ é o raio de ponta da ferramenta (mm).

$$R_a = \frac{f^2}{31,2 \times r_\epsilon \times 10^3} \quad (2)$$

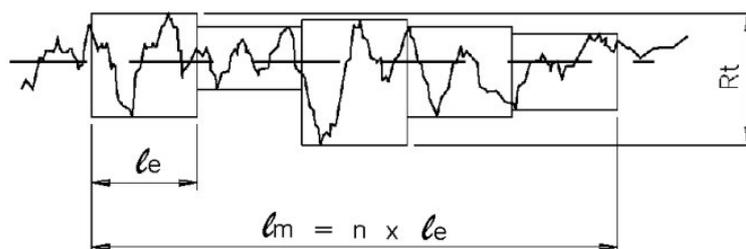
Outro importante parâmetro usado como métrica para caracterizar a morfologia de uma superfície é a rugosidade total R_t (do inglês *Total Roughness*). Este parâmetro representa a altura total do perfil, e é definido pela soma da maior altura de pico e da maior profundidade de vale dentro do comprimento avaliado, como definido na Figura 5 (KALPAKJIAN e SCHMID, 2010). A Equação 3 define como a rugosidade total de um perfil (R_t) pode ser expressa em função do avanço f e raio de ponta da ferramenta r_ϵ (MACHADO *et al*, 2015).

Figura 4 – Representação esquemática da rugosidade média R_a .



Fonte: Adaptado de KALPAKJIAN e SCHMID (2010).

Figura 5 – Representação esquemática da rugosidade total R_t .



Fonte: Adaptado de KALPAKJIAN e SCHMID (2010).

$$R_t = \frac{f^2}{8 \times r_\epsilon \times 10^3} \quad (3)$$

É importante ressaltar que as Equações 2 e 3 referem-se ao cálculo da rugosidade cinemática (teórico). Os valores experimentais (medidos) destas métricas podem apresentar diferenças significativas em função de fatores que não são levados em consideração no mesmo. Conforme Diniz, Marcondes e Coppini (2011), alterações nos parâmetros de usinagem podem influenciar nos valores experimentais de R_a e R_t como segue:

- Diminuição do avanço (f): pode aumentar os valores de R_a e R_t para baixos valores do avanço. Isso ocorre abaixo de um valor crítico em que a diminuição do avanço irá fazer com que a tensão média na superfície de saída da ferramenta aumente substancialmente, gerando um maior fluxo lateral de cavaco.
- Aumento do raio de ponta da ferramenta (r_ϵ): reduz os valores de rugosidade, porém abaixo do esperado. O aumento do raio de ponta, de fato, reduz a rugosidade pela diminuição da contribuição geométrica nesse parâmetro. Entretanto, o aumento do r_ϵ resulta no aumento do atrito na interface de corte. Conseqüentemente, o aumento da vibração no processo gera uma superfície com rugosidade real maior do que a rugosidade cinemática (teórica).
- Aumento da velocidade de corte (v_c): Pode reduzir os valores de rugosidade para valores acima da velocidade de corte crítica. Com o aumento da velocidade de corte nessa condição, a rugosidade irá oscilar entre valores altos e baixos em função da resposta que o sistema máquina-peça-ferramenta-dispositivo terá em função da vibração.
- Aumento da dissipação de calor por fluido de corte: Pode diminuir os valores de rugosidade. Além de agir diretamente combatendo os danos térmicos à estrutura superficial da peça, também minimiza o desgaste da ferramenta que é outro causador do aumento da rugosidade superficial.

2.3 INDÚSTRIA 4.0 E A DIGITALIZAÇÃO NA MANUFATURA

Cada uma das revoluções industriais foi desencadeada por diferentes fatores e apresentaram características distintas como grande investimento em equipamentos mecânicos no final do século XVIII, impulsionamento da produtividade por máquinas movidas à eletricidade (meados do século XX) e introdução da tecnologia da informação e eletrônica, no final da década de sessenta. A quarta revolução industrial, à qual está em plena expansão, diferencia-se pela obtenção, análise e tratamento de dados (LAIRD, 2017).

As novas tecnologias desempenham um importante papel no atual cenário, não apenas nos meios de comunicação, mas também nos meios produtivos. Nos últimos anos, algumas ferramentas oriundas da revolução digital como a internet das coisas, computação em nuvem e inteligência artificial começaram a ser exploradas por empresas de diversos segmentos. As ferramentas da era digital não estão presentes apenas na área de tecnologia da informação (TI), mas já fazem parte da realidade de empresas dos mais diversos segmentos, como as indústrias de manufatura (LASI *et al.*, 2014).

Tao e Zhang (2018) argumentam que tecnologias como inteligência artificial e *big data*, proporcionam aos sistemas de gestão a autonomia necessária para a tomada de decisões, buscando a otimização e melhoria dos processos. Estes sistemas são conhecidos como sistemas ciber-físicos (CPS do inglês *ciber physical system*) que incorporam todos os conceitos da automação e robótica adicionando elementos que proporcionam a comunicação entre diferentes máquinas ou sistemas. Portanto, os sistemas ciber-físicos representam a evolução dos sistemas automatizados de terceira geração e estão no cerne da revolução 4.0.

Em contraste às tecnologias já mencionadas e seus impactos nos processos de manufatura, existe uma crescente discussão sobre a atual realidade de muitas pequenas e médias empresas atuantes no mercado, mas que mantêm entre os seus principais ativos, máquinas-ferramenta antigas que não oferecem qualquer comunicação com o mundo digital. Uma solução do ponto de vista técnico é o *Retrofitting* Digital com foco na implementação de sensores e dispositivos conectados à máquina, o que aproximaria sua utilização aos atuais sistemas ciber-físicos (TANTSCHER e MAYER, 2022). Segundo Lockwood *et al.* (2018) o principal desafio é implementar a digitalização em pequenas e médias empresas. Um relatório de 2017

reunindo informações sobre as indústrias de manufatura do Reino Unido, mostrou que a maioria das empresas que resistem em implementar ferramentas da Indústria 4.0, temem principalmente os altos custos de investimento e a falta de preparo dos funcionários frente às novas tecnologias. Os autores ainda argumentam que o ato de postergar o processo de digitalização tem aumentado a pressão para reduzir custos e melhorar os serviços, porém com resultados pouco expressivos devido aos modelos operacionais ultrapassados.

Para Liu e Xu (2017), é fundamental a discussão sobre máquinas e equipamentos antigos, buscando novos meios para atender a demanda das indústrias de manufatura. O autor ainda argumenta que as novas tecnologias da Indústria 4.0 podem contribuir para que equipamentos antigos migrem para o universo da manufatura digital e tenham um desempenho comparável as novas gerações de máquinas-ferramenta.

A manufatura em nuvem é outro conceito muito explorado pelos autores nos últimos anos. Em seu trabalho, Ghomi, Rahmani e Qader (2019) definem a manufatura em nuvem (CMfg) como o processo de utilização de recursos tradicionais de gestão da manufatura por meio da nuvem, permitindo a visualização, atualização e aplicação das informações a qualquer momento em diferentes locais. O trabalho aborda os principais conceitos, desafios, questionamentos e as futuras tendências da prática. Os autores ainda mostraram a existência de uma forte convergência entre tecnologias contemporâneas como computação em nuvem, manufatura digital, e IoT com a CMfg.

As diferentes camadas em processos de manufatura em nuvem como aplicativos, serviços globais, serviços virtuais e recursos de manufatura são fundamentais para um sistema robusto e organizado. A arquitetura destas ferramentas pode influenciar na efetividade dos sistemas de monitoramento e conclui que a CMfg representa um novo paradigma nos processos de manufatura. Outro fator discutido dentro do contexto da manufatura em nuvem são a descrição e adequação dos recursos (CHANG e WU, 2018).

A usinagem inteligente (do inglês *smart machining*) faz parte dos assuntos mais abordados por pesquisadores na última década. Em sua publicação, Kim *et al.* (2018), fazem um resumo sobre alguns trabalhos que utilizam o conceito de aprendizado de máquina para investigar novos métodos para processos de usinagem. Os autores evidenciam que muitas indústrias estão investindo em *machining learning* nos

processos convencionais de usinagem para aprimorar seus resultados. Concluem ainda que a otimização dos processos depende essencialmente das implementações de sistemas de monitoramento, porém relatam que questões de segurança e proteção das empresas devem ser debatidas e evoluir junto à otimização operacional.

A manutenção e preservação dos ativos das empresas também merece destaque entre os objetivos das recentes publicações na área de manufatura digital. A preocupação em preservar e estender a vida útil de máquinas e ferramentas utilizando metodologias e ferramentas da Indústria 4.0 é de fato, segundo os autores, uma temática atual e de grande valor acadêmico e empresarial. Outro fator importante citado é a preocupação organizacional das empresas em meio às radicais mudanças impostas pela mentalidade da Indústria 4.0. O trabalho de Bokrantz *et al.* (2017) descreve um provável cenário para 2030 sobre como as inovações da Indústria 4.0 podem influenciar os processos de manutenção na manufatura digitalizada. Os autores concluem que as principais temáticas a serem discutidas para a adequação dos setores de manutenção frente aos avanços tecnológicos são: análise de dados, sistemas de informação interoperáveis, gerenciamento de *big data*, ênfase em educação e treinamento, planejamento de manutenção baseado em fatos, novo sistema inteligente para procedimentos e planejamento de manutenção com perspectiva sistêmica.

2.4 INSTRUMENTAÇÃO DE BAIXO CUSTO

A instrumentação de baixo custo envolve a utilização de tecnologias de medição e monitoramento acessíveis economicamente, sem comprometer a precisão dos resultados obtidos. Essa abordagem tem sido estudada e aplicada em diversas áreas, incluindo a fabricação de peças e componentes, visando à otimização do processo produtivo e redução de custos (XING *et al.*, 2021).

Com os desafios impostos pela quarta revolução industrial, é fundamental a adoção de novas soluções que viabilizem a digitalização de equipamentos antigos, como a utilização de sensores e hardwares de baixo custo. Em trabalho publicado pelo Centro de Pesquisa de Manufatura Avançada (AMRC), Lockwood *et al.* (2018), apresentam estudos de casos nos quais sistemas de monitoramento são instalados em um torno universal (fabricado em 1956) e uma furadeira de bancada (fabricada em 1980). Os autores discutem sobre os benefícios da implementação e argumentam que

os ganhos em produtividade estão associados ao monitoramento das condições do processo e também na percepção de maior controle. Outro ponto levantado pelos autores é a necessidade de mais opção em instrumentação de baixo custo focada no *retrofitting* de máquinas antigas.

A digitalização de máquinas antigas também foi discutida por Nguyen e Dugenske (2018). Em seu artigo, os autores discutem o impacto da IIoT (do inglês *Industrial Internet of Things*) no aumento de produtividade e redução de custos na operação de equipamentos obsoletos. Para tal, propõem um sistema de monitoramento utilizando arquitetura de circuito integrado por meio de instrumentação de baixo custo. A validação do sistema foi realizada monitorando os níveis de vibração e emissão acústica na operação de uma serra de bancada. Os resultados mostraram que a arquitetura proposta apresenta diversos benefícios relacionados principalmente ao baixo investimento, efetividade na transmissão de dados e maior integridade do sinal.

Um dos principais requisitos para um bom sistema de monitoramento é a correta escolha de seus elementos como sensores, sistema de aquisição, placa de processamento e rede de transmissão de dados. Com foco em instrumentação de baixo custo, Soto-ocampo *et al.* (2020) discutem a relevância de características como precisão, resolução e frequência de amostragem em sistemas de aquisição dedicados à análise de vibração em elementos rotativos como um mancal de rolamento, o qual foi utilizado para validação. O sistema de aquisição proposto pelos autores foi baseado em Raspberry-Pi com capacidade para processar sinais com até 50KHz de frequência de amostragem. O sistema ainda contou com um acelerômetro 805M1 (sensibilidade de 100 mV/g e frequência de resposta de 0,4 Hz a 100 KHz) e um conversor analógico/digital ADS8326. Os resultados indicam um bom desempenho do sistema na correlação entre a severidade da falha mecânica e a amplitude da frequência dominante.

Em recente publicação, Varanis *et al.* (2018) discutem a potencialidade dos sensores de baixo custo e mostram uma grande versatilidade da aplicação destes dispositivos. Segundo os autores, o custo reduzido e o baixo consumo de energia tornam estes dispositivos viáveis para aplicações diversas em monitoramento e para fins educacionais. Os resultados mostram algumas limitações destes acelerômetros, como a relação entre o aumento da frequência excitação e a diminuição da

sensibilidade do sensor. Toda via, o estudo comprova a viabilidade dos dispositivos para condições restritas de uso.

Com foco nos processos de manufatura, Barbosa, Shiki e Savazzi (2019), estudaram a digitalização de um braço robótico utilizando instrumentação de baixo custo e gerenciamento de dados em nuvem. Por meio de um acelerômetro ADXL335, foram capturados os sinais vibração de um cabeçote de usinagem acoplado à um robô durante o processo de furação de diferentes materiais. Por meio da análise dos sinais e medições após os ensaios, os autores atestaram a correlação entre o sinal RMS e as dimensões dos furos.

Os trabalhos citados nesta revisão bibliográfica foram escolhidos e apresentados de modo a esclarecer o leitor sobre as diversas áreas do conhecimento presentes no escopo do presente trabalho. A maioria dos trabalhos citados posicionam-se na interface das áreas do conhecimento, revelando as lacunas e oportunidades para a fronteira da ciência. A instrumentação de baixo custo tem ganhado destaque nos últimos anos por conta do aprimoramento e diversidade de dispositivos. Entretanto, a literatura não fornece estudos robustos sobre a potencialidade destes dispositivos em aplicações industriais (IIoT). Portanto, a presente pesquisa oferece elementos importantes acerca das potencialidades e limitações da instrumentação de baixo custo no monitoramento de processos de fabricação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são abordados os procedimentos experimentais utilizados, bem como os recursos necessários para o desenvolvimento do trabalho de pesquisa. Foram analisadas a influência de parâmetros de usinagem como velocidade de corte e avanço na rugosidade superficial nos níveis de vibração resultantes da operação de torneamento do aço ABNT 1020. A seguir, são apresentados detalhes dos materiais, equipamentos, ferramentas e metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho.

3.1 MÁQUINA - FERRAMENTA

O torno universal utilizado na pesquisa pertence à escola “SENAI Oscar Lúcio Baldan” na cidade de Monte Alto. O equipamento é do fabricante NARDINI, modelo ND 220 AE, cujas características técnicas estão descritas na Tabela 1. A escola possui 12 tornos (Figura 6 a)), os quais são utilizados como ferramentas didáticas nos cursos da área da metalmecânica. O torno utilizado neste trabalho está ilustrado na Figura 6 b) e foi escolhido por oferecer maior acessibilidade aos diversos componentes da máquina e facilidade de instalação dos sensores.

Tabela 1 – Características técnicas do torno universal.

Características técnicas	Especificações
Distância entre pontas	2200 mm
Diâmetro admissível sobre o barramento	440 mm
Diâmetro admissível sobre o carro	270 mm
Curso transversal do carro (eixo X)	250 mm
Curso longitudinal do carro (eixo Z)	125 mm
Diâmetro do furo do eixo-árvore	46 mm
Gama de velocidades	25/2000 RPM
Gama de avanços longitudinais	0,039 a 1,08 mm/volta
Gama de avanços transversais	0,012 a 0,35 mm/volta

Fonte: NARDINI (2022).

Figura 6 – Equipamentos da escola SENAI: a) Ambiente didático e b) Torno utilizado no estudo.



Fonte: Próprio autor.

3.2 MATERIAL PROCESSADO

Para o torneamento cilíndrico, utilizou-se uma barra de seção circular do aço ABNT 1020 produzida por trefilação à frio. Na Tabela 2 é descrita a composição química do material segundo o fabricante (CP Multimetais), bem como a composição estabelecida pela norma ASTM A29/A29M (2015) (*American Society for Testing and Materials – ASTM*), na qual são apresentadas as composições químicas nominais do material. Com o objetivo de caracterizar o aço usado no torneamento, foram realizados ensaios que permitiram verificar a composição química, dureza e estimar a resistência mecânica do material. Os testes foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos. Dessa forma, foi possível comparar os valores com as normas e confirmar as informações fornecidas pelo fabricante.

Com relação a composição química, foi realizada a análise metalográfica com Nital 2 % em amostras das direções transversais e longitudinais do corpo de prova. As imagens de microscopia óptica foram obtidas no microscópio óptico do fabricante Olympus, modelo BX41M-LED. As metalografias das seções transversais e longitudinais podem ser observadas na Figura 8. Na Figura 8 b) pode-se verificar que os grãos estão orientados no sentido do seu processo de fabricação de trefilação a frio, característica não observada na Figura 8 a) que corresponde a direção transversal. Utilizando o software livre ImageJ[®], estimou-se a fração volumétrica de perlita ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) presente como fase minoritária na amostra do eixo transversal. Para tal, calculou-se a média entre dez amostras retiradas da imagem após tratamento no software distinguindo a região de fase minoritária. Os valores de cada amostra, bem

como o valor médio da fração volumétrica de perlita podem ser observados na Tabela 3. Para a estimativa da porcentagem de carbono presente nas amostras, utilizou-se o conceito de regra da alavanca como método de análise do diagrama ferro-cementita (Figura 7) como descrito por Callister e Rethwisch (2018). A aplicação do método é representada pela Equação 4, na qual $%(α + Fe_3C)$ é a porcentagem de perlita e %C representa a porcentagem de carbono. Utilizando o valor médio de perlita 22,94% obtido, conclui-se que a porcentagem de carbono do material analisado é de, aproximadamente, 0,19%. Portanto, a porcentagem de carbono presente no aço atende aos padrões da norma ASTM A29/A29M (2015).

$$%(α + Fe_3C) = \frac{(C\% - 0,02\%)}{(0,77\% - 0,02\%)} \times 100\% \quad (4)$$

A dureza do material foi obtida pelo ensaio de dureza Brinell. Uma amostra do aço foi retirada e submetida ao ensaio padronizado pela norma ASTM E10-18. O ensaio foi realizado em um durômetro da marca Wolpert, modelo Testor HT1. Foi utilizado um indentador esférico de aço com 2,5 mm de diâmetro e uma carga de 62,5 kgf. Os resultados indicam que o material apresenta uma dureza média de 171 ± 4 HB e limite de resistência de aproximadamente 615 MPa. Com relação à tensão de escoamento, a norma ASTM A400 (2012) caracteriza os materiais levando em conta o tipo de aço, dimensões e processo de fabricação. O aço utilizado neste estudo se enquadra na classe R-4 apresentando tensão de escoamento mínima entre 344 e 379 MPa.

Tabela 2 – Composição química do aço ABNT 1020.

Descrição da composição	%C	%Mn	%P	%S
Fabricante	0,20	0,45	0,040	0,040
Nominal	0,18-0,23	0,30-0,60	0,040	0,050

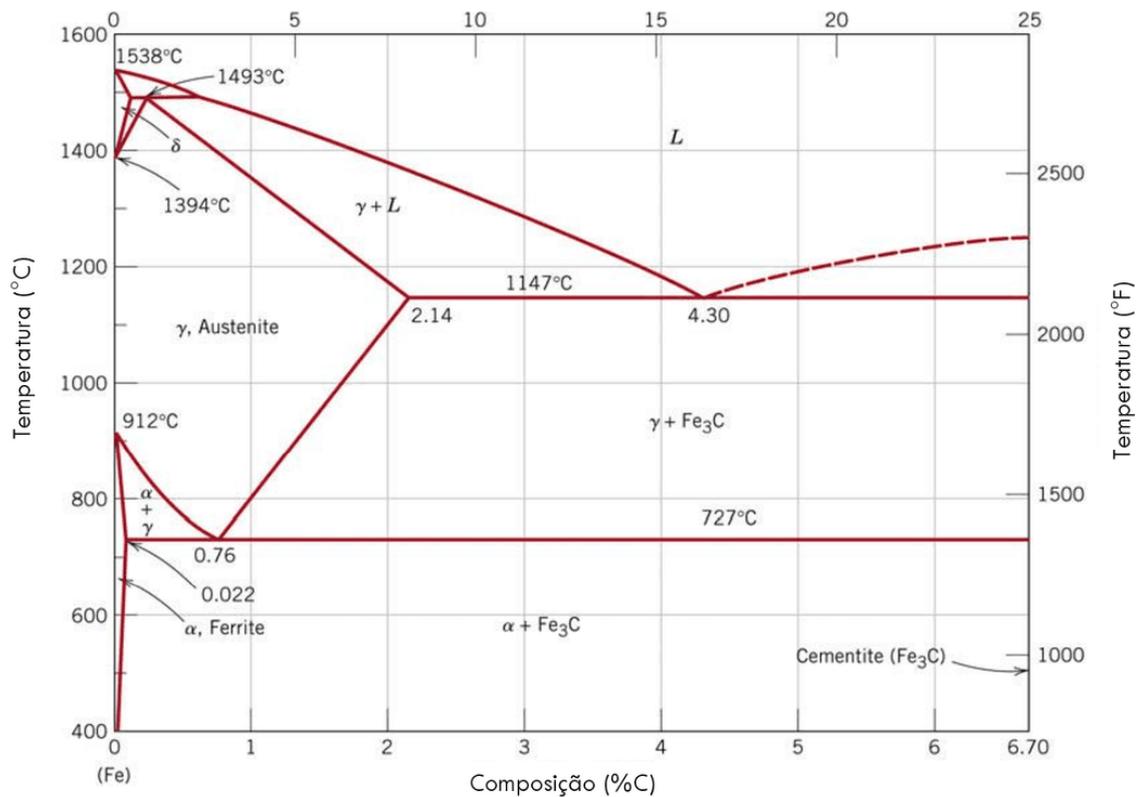
Fonte: Fabricante: CP METAIS (2022) / Nominal: ASTM A29/A29M (2015).

Tabela 3 – Porcentagem de perlita por amostra.

Amostra	Perlita (%)	Média	Desvio Padrão
1	23,00%		
2	22,34%		
3	23,46%		
4	23,16%		
5	22,02%		
6	22,67%	22,94%	0,69%
7	23,68%		
8	23,62%		
9	21,70%		
10	23,72%		

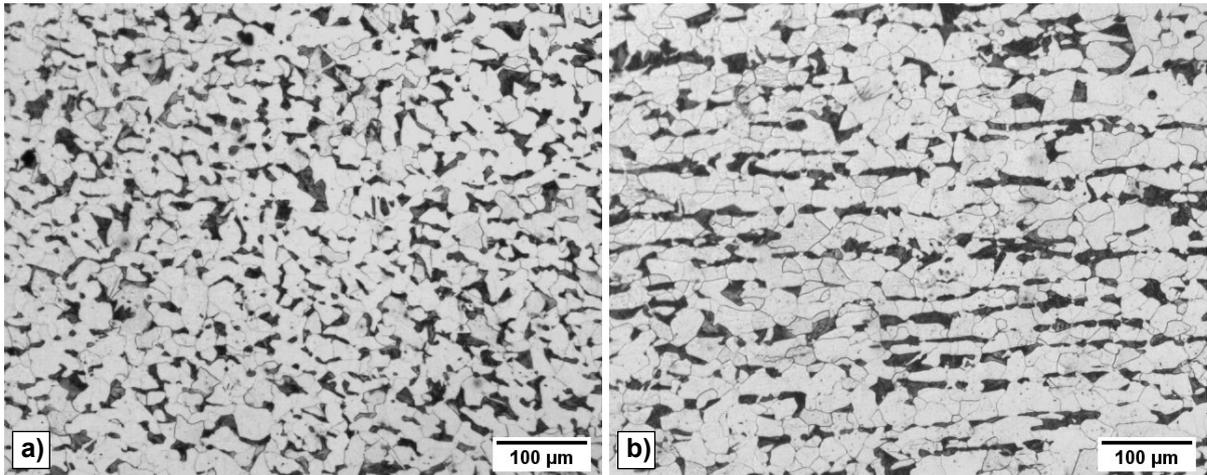
Fonte: Próprio autor.

Figura 7 – Diagrama Ferro-Cementita.



Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2018).

Figura 8 – Metalografia do aço ABNT 1020: seções a) transversal e b) longitudinal.

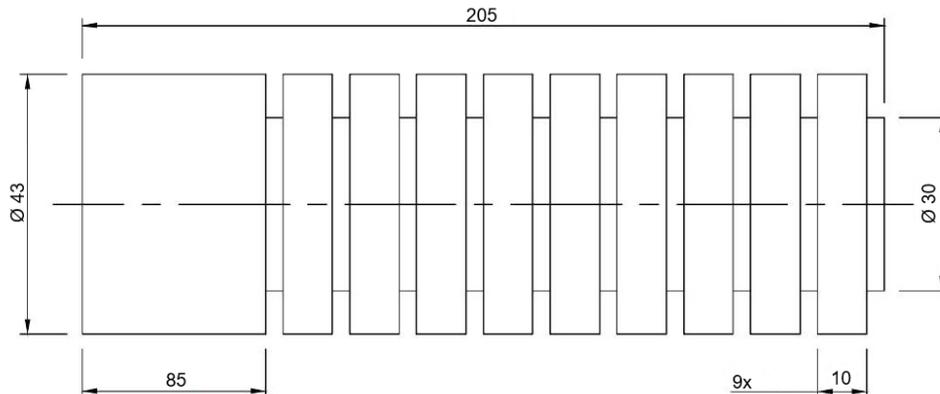


Fonte: Próprio autor.

3.3 CORPO DE PROVA E FERRAMENTAS

A barra cilíndrica como fornecida pelo fabricante apresentava um comprimento de 205 mm e diâmetro de 50 mm. Para otimizar o processo e os recursos, decidiu-se manter o comprimento e reduzir o diâmetro para 43 mm, o qual é compatível com as velocidades de corte escolhidas e gama de rotações disponíveis, conforme o planejamento experimental que será apresentado adiante. O acabamento inicial também é importante para a retirada da camada externa que apresentava grande quantidade de óxido de ferro. Os corpos de prova utilizados no experimento foram desbastados por faceamento, torneamento cilíndrico externo e sangramento para que ficassem segmentados com nove espaçamentos (*steps*) de mesma largura, como apresentado na Figura 9.

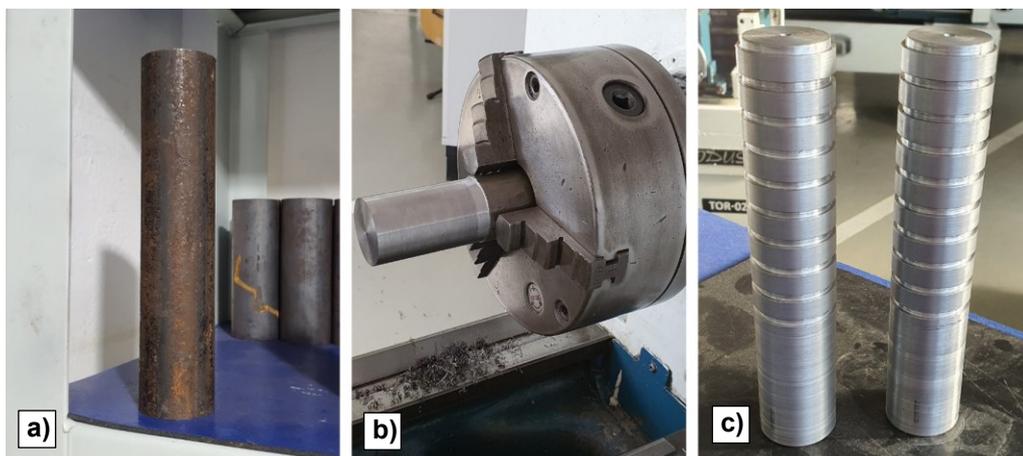
Figura 9 – Dimensões do corpo de prova.



Fonte: Adaptado de SAVELLA *et al* (2022).

Cada *step* representa uma combinação das condições de ensaio que serão discutidas à frente. As Figuras 10 a), b) e c) mostram respectivamente o material como fornecido, durante o processo de produção e finalizados.

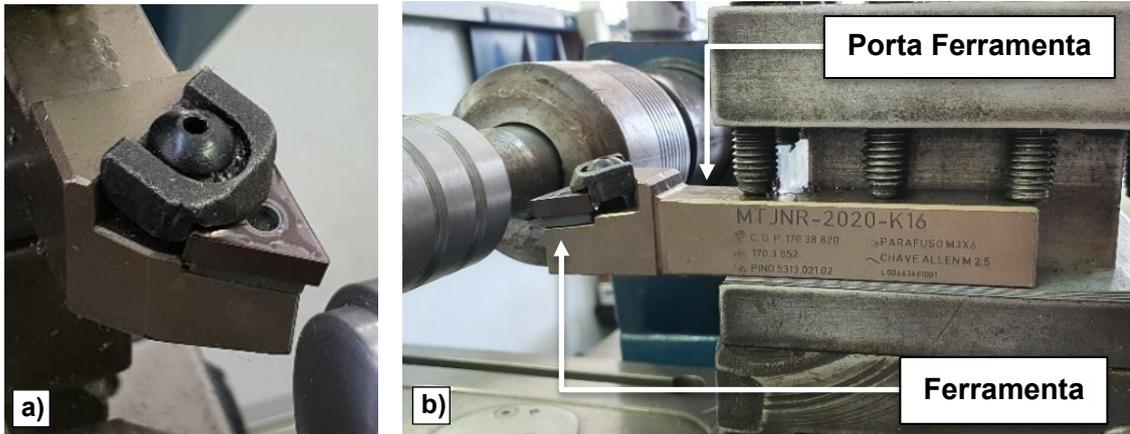
Figura 10 – Corpos de prova: a) material como fornecido, b) em confecção e c) finalizados.



Fonte: Próprio autor.

Foram utilizados três insertos de metal duro da *Mitsubishi Materials* revestidos com especificação ISO 513 HC P montados em um suporte MTJNR 2020 K16 fabricado pela *Black Tools*, como mostrado nas Figuras 11 a) e b). Os insertos utilizados na usinagem são de metal duro, pertencentes à classe P, portanto, são destinados ao torneamento de aços endurecidos. Entretanto, são utilizados nas atividades práticas do SENAI mesmo na usinagem de aços com baixo teor de carbono, como o ABNT 1020, portanto decidiu-se manter o tipo de ferramenta e o suporte. As especificações da ferramenta e do porta-ferramentas são apresentadas nas Tabelas 4 e 5, respectivamente. Como citado na revisão bibliográfica, um dos principais fatores que influenciam na rugosidade de peças no torneamento é o raio de ponta (r_ϵ) da ferramenta. Com o uso contínuo da aresta de corte, o raio de ponta sofre alterações em função do desgaste, alterando significativamente os valores de rugosidade. Para minimizar o efeito, foram utilizadas arestas novas para cada um dos *steps*, o que justifica a utilização de três insertos, totalizando dezoito arestas de corte. A profundidade de usinagem (ap) foi mantida constante como forma de minimizar sua influência nos parâmetros mensurados. O valor estabelecido foi de 1,5 mm. Outro fator importante a ser considerado é a dissipação de calor. Optou-se por não utilizar fluido de corte como forma de padronizar o efeito.

Figura 11 – Montagem a) da ferramenta no suporte e b) fixação na máquina.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 4 – Especificações da ferramenta.

	Descrição	Dimensões
	Classe	Metal duro
	Diâmetro (D1)	3,81 mm
	IC	9,525 mm
	Espessura (S)	4,76 mm
	Raio de ponta (R ϵ)	0,4 mm
	EPSR	60°

Fonte: MITSUBISHI Materials (2022).

Tabela 5 – Especificações do porta-ferramenta.

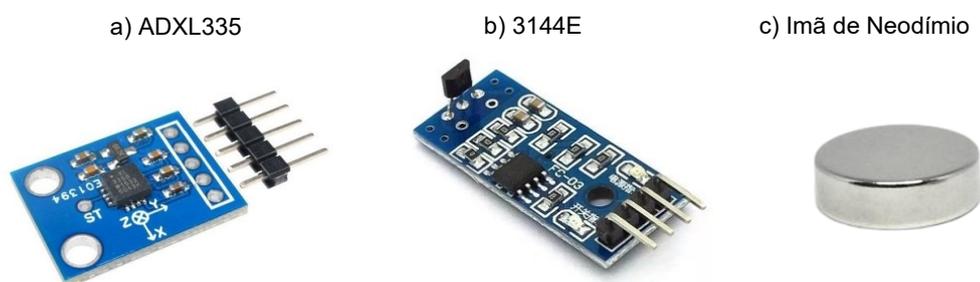
	Descrição	Dimensões
	Altura da haste (h)	20 mm
	Largura da haste (b)	20 mm
	Largura frontal (f)	25 mm
	Comprimento total (l ₁)	125 mm
	Comprimento frontal (l ₂)	34 mm
	Ângulo de posição (χ_r)	93°
	Ângulo de inclinação (λ_s)	- 6°
Ângulo de saída (γ_o)	- 6°	

Fonte: BLACKTOOLS (2022).

3.4 INSTRUMENTAÇÃO PARA O MONITORAMENTO DA USINAGEM

Para a coleta de dados referente aos parâmetros de corte foram utilizados 2 tipos de sensores. A Figura 12 a) mostra o acelerômetro ADXL335 (sensibilidade: 300 mV/g, faixa de frequência: até 1600 Hz, faixa de amplitude: $\pm 3,6$ g) utilizado para a coleta de dados referente a vibração do processo de torneamento. Para monitorar a rotação da placa e o avanço foram utilizados um sensor de efeito Hall 3144E (tempo de resposta: 0,18 μ s) e um ímã de neodímio (Figuras 12 b) e c)).

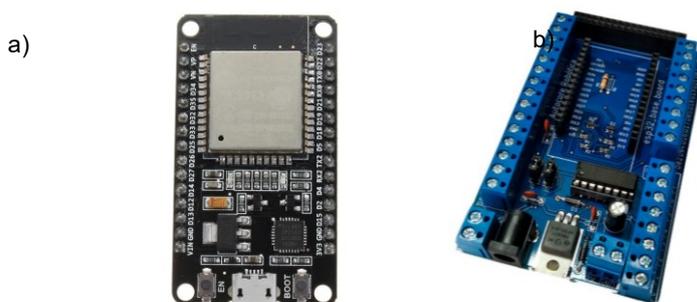
Figura 12 – Sensores e ímã utilizados no sistema de monitoramento.



Fonte: a) MICROWAT (2022), b) ELETRO Parts Componentes (2022) e c) DIYMORE (2022).

A placa de prototipagem escolhida foi a ESP32 DevKit V1, a qual utiliza um módulo ESP-WROOM-32 da empresa Espressif. Para facilitar a aplicação proposta, foi utilizada uma *baseboard* da empresa Autocore Robótica, dedicada à placa usada no projeto. Na Figura 13 e Tabela 6 são mostradas respectivamente, a placa utilizada, a *baseboard* e as especificações do módulo.

Figura 13 – a) Placa de prototipagem DevKit V1 e b) *basebord*.



Fonte: a) e b) AUTOCORE Robótica, (2022).

Tabela 6 – Características da placa ESP32 DevKit V1.

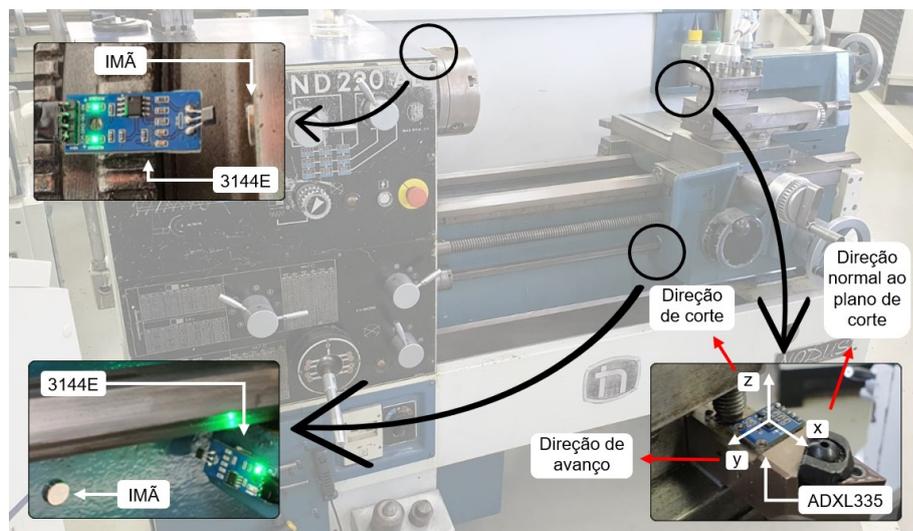
Fabricante	DOIT
Número de Pinos	30
Entrada de 5V	Sim (Vin)
Interface USB	Sim
Frequência da CPU	2 x 240MHz (32 bits)
Memória Flash	4MB (padrão)
Memória SRAM	520KB
Memória ROM	448KB
Bluetooth	Sim
Wifi	Sim
Dimensões	27,5 x 51,0 mm

Fonte: ESPRESSIF (2022).

3.5 INSTALAÇÃO DE DISPOSITIVOS NA IMPLEMENTAÇÃO IoT

Um acelerômetro ADXL335 foi posicionado no porta-ferramenta do equipamento, com o objetivo de obter o valor eficaz RMS e a frequência dominante do sinal de vibração do processo. Para o monitoramento da rotação da placa, foram utilizados um sensor de efeito Hall 3144E e um ímã de Neodímio. O mesmo tipo de sensor foi utilizado para obter dados sobre o avanço da máquina. A montagem dos sensores pode ser observada de forma esquemática na Figura 14.

Figura 14 – Posição dos sensores no torno universal.



Fonte: Próprio autor.

As direções x, y e z padronizadas no acelerômetro coincidem com a direção normal ao plano de corte, direção de avanço e direção de corte, respectivamente. Para o monitoramento da rotação foi instalado um imã na parte traseira do cabeçote da máquina. Um sensor de efeito Hall foi instalado próximo ao cabeçote para acompanhar o movimento angular do imã. O sensor capta o sinal da variação do campo magnético gerado pela passagem do imã emitindo um sinal de nível lógico alto, contabilizando o número de voltas. Para a análise da rotação, um tacômetro da marca Kesoto, modelo Dt2234 com resolução de 0,1 RPM, foi utilizado para garantir a confiabilidade dos resultados. Para o monitoramento do avanço, foram instalados um imã de neodímio na lateral fixa e um sensor de efeito hall 3144E na estrutura do carro, montagem ilustrada na Figura 14. A distância entre os dispositivos foi fixada em 50 mm, sendo novamente conferida a cada passe. Após o acionamento da máquina, o sistema contabilizou o número de rotações do cabeçote em paralelo durante o deslocamento estabelecido. O avanço foi determinado pela divisão da distância em milímetros pelo número de rotações. Os cabos utilizados no projeto foram confeccionados com os tamanhos adequados para as distâncias entre os sensores e a placa. Cada sensor foi cuidadosamente fixado de forma não invasiva, permitindo o livre deslocamento dos componentes, não representando nenhum perigo ao operador.

3.6 CONFIGURAÇÕES DA PLATAFORMA E DISPOSITIVOS

Para a comunicação, os diferentes sensores foram conectados à uma placa de prototipagem rápida ESP32 DevKit V1 através de cabos, a qual é responsável por fazer a coleta e envio de dados para análise. A programação da placa foi feita no software Arduino IDE, a qual utilizada a linguagem de programação C++. O código desenvolvido, o qual é apresentado no apêndice A, apresenta a seguinte estrutura:

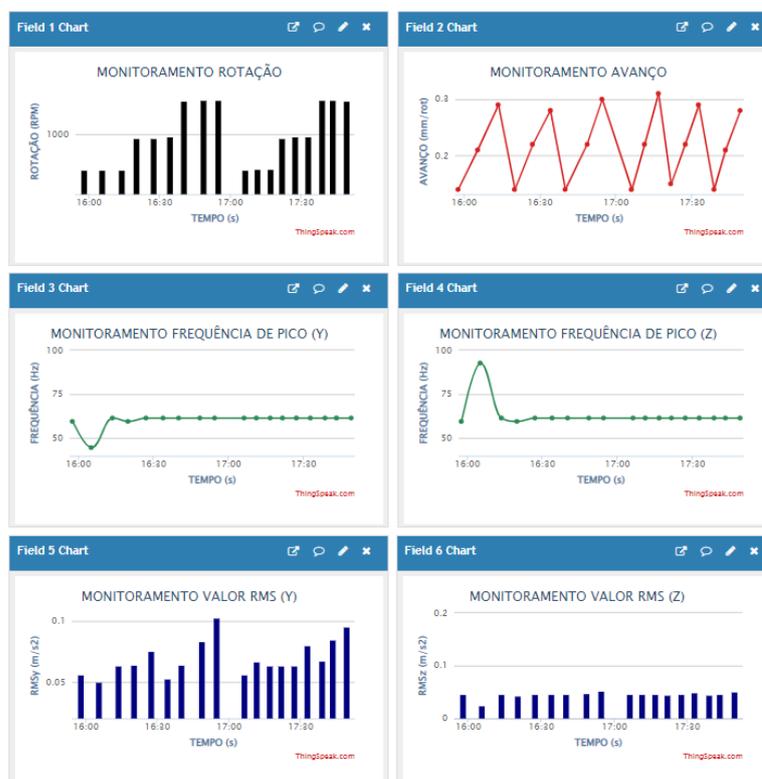
- Vibração: Recebe dados de aceleração com relação aos eixos analisados e calcula a transformada de Fourier em tempo discreto a partir do algoritmo FFT (do inglês *Fast Fourier Transform*) e o valor RMS para cada um dos pontos. Envia os dados do valor da aceleração, da FFT e da frequência máxima do intervalo analisado.
- Rotação: Recebe os dados de acionamento de um sensor de efeito hall. A cada volta completa da placa do torno, o imã, instalado atrás da placa, aciona o

sensor gerando um estado de nível lógico alto contabilizando o número de voltas em um período de tempo. Calcula e envia o valor da rotação em RPM a cada intervalo de tempo.

- **Avanço:** Recebe dados de outro sensor de efeito hall. O acionamento do torno faz com que o carro se desloque no sentido de avanço. O sensor reconhece o movimento através da mudança de estado de nível lógico sendo acionado por dois ímãs posicionados ao longo da trajetória, espaçados por uma distância conhecida. Conhecendo o tempo e a distância deste deslocamento, é calculado a média das rotações medidas e o valor avanço, o qual é enviado.

Para o acompanhamento em tempo real dos parâmetros foi utilizada a plataforma analítica de IoT *Thing Speak*, que permite armazenar, visualizar e analisar fluxos de dados em tempo real na nuvem. dados coletados foram organizados, formando um histórico de desempenho do processo. A comparação entre os parâmetros relacionados ao nível de vibração e as configurações de entrada do processo, foi possível através do *dashboard* (Figura 15) que permite visualizar e verificar a existência de correlação entre os diferentes parâmetros avaliados.

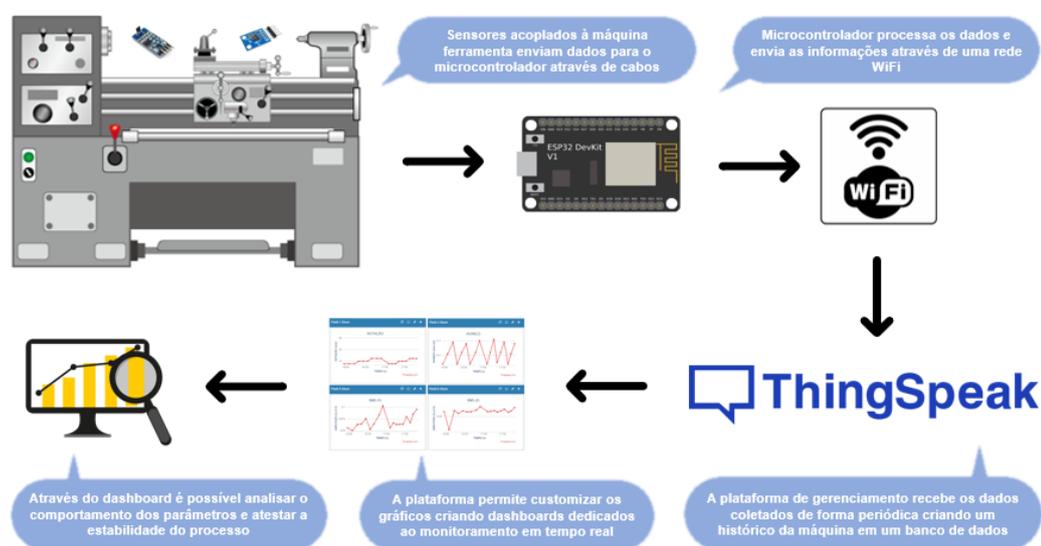
Figura 15 – *Dashboard* da plataforma *ThingSpeak*.



Fonte: Próprio autor.

Adjacente ao sistema de monitoramento, foram coletados os mesmos dados gerados pela ESP32 por meio de um *notebook* conectado ao microcontrolador. Para a coleta, foi utilizado o software Excel junto ao suplemento “Streamer de dados”. Segundo a Microsoft (2022), este suplemento é dedicado à coleta e análise de dados em tempo real e foi desenvolvida para aplicações *IoT*. Os dados foram armazenados em planilhas e analisados separadamente com o objetivo de atestar a eficiência da plataforma. A ferramenta utilizada na análise do espectro de vibração e RMS foi o MATLAB R2019a. O diagrama do sistema de monitoramento proposto pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 – Modelo de monitoramento proposto.



Fonte: Próprio autor.

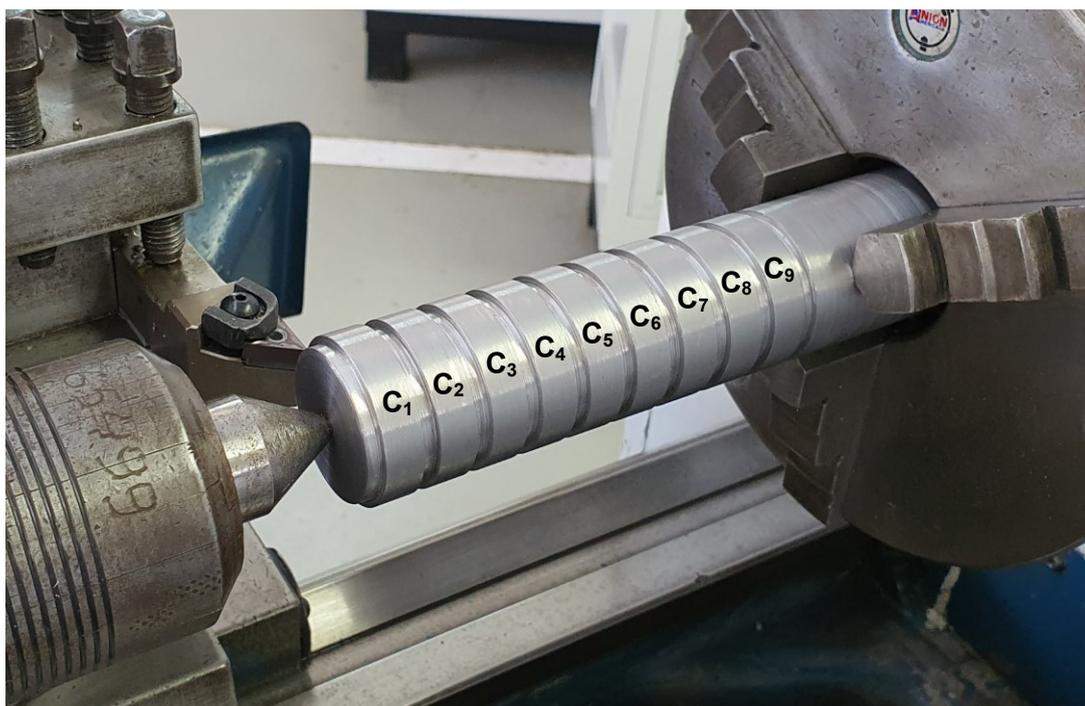
3.7 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental utilizado no trabalho foi o modelo fatorial 3^k completo, no qual k representa o número de fatores em três níveis. Dois fatores foram escolhidos para o experimento; a velocidade de corte (v_c) e o avanço (f), cada um analisado em três níveis resultando em 9 combinações. Para maior confiabilidade nos resultados, decidiu-se utilizar uma réplica para cada uma das combinações, totalizando 18 experimentos (um em cada *step* replicado em dois corpos de prova). A Tabela 7 mostra a relação entre os fatores e os níveis estabelecidos. Na Figura 17 são mostradas as condições de ensaio (C_1 à C_9) para cada *step*, ordenação aplicada também na réplica.

Tabela 7 – Condições do ensaio.

Condição	Rotação (RPM)	Velocidade de Corte (m/min)	Avanço (mm/volta)
C ₁	800	108	0,139
C ₂	800	108	0,214
C ₃	800	108	0,281
C ₄	1000	135	0,139
C ₅	1000	135	0,214
C ₆	1000	135	0,281
C ₇	1250	168	0,139
C ₈	1250	168	0,214
C ₉	1250	168	0,281

Fonte: Próprio autor.

Figura 17 – Condições de ensaio para cada *step*.

Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos por meio dos sensores e medições do perfil de rugosidade foram analisados estatisticamente. Para tal, foi utilizada a análise de variância (ANOVA) com o objetivo de identificar quais parâmetros nominais exercem influência nos valores de rugosidade. Uma vez identificado um ou mais fatores que

influenciam no comportamento de uma determinada variável, é possível estabelecer as correlações. A ANOVA é uma técnica de teste de hipóteses utilizada para comparar dois ou mais resultados, ou também para fatores únicos que apresentem no mínimo dois níveis (MONTGOMERY, 2017). As análises foram realizadas com fator duplo com repetição.

3.8 ANÁLISE DA RUGOSIDADE

A aferição da rugosidade foi realizada no Laboratório de Metrologia do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec) da Universidade Federal de São Carlos. O equipamento utilizado foi o rugosímetro da marca Mitutoyo, modelo SJ-210, para a análise em cada espaçamento em diferentes regiões como ilustrado na Figura 18. Cada *step* foi aferido três vezes em posições diferentes (rotação de 120°) totalizando cinquenta e quatro medições nos dois corpos de prova. Com os resultados, foram calculados as médias e os desvios padrões dos parâmetros R_a e R_t .

Figura 18 – Rugosímetro utilizado.



Fonte: Próprio autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos por meio dos experimentos bem como as discussões pertinentes. Para um melhor entendimento e organização, os resultados foram divididos em três partes: na primeira, foram apresentados os resultados discussões sobre a efetividade do sistema de monitoramento por meio da comparação entre valores experimentais e nominais (configuração da máquina). A segunda parte aborda os resultados e análises sobre a influência dos parâmetros nominais de usinagem no comportamento da rugosidade média (R_a) e da rugosidade total (R_t) da superfície torneada. Na terceira e última parte, foram debatidos os efeitos dos parâmetros nominais de corte nos níveis de vibração durante a operação. A análise de variância (ANOVA) foi a ferramenta estatística aplicada para avaliar tanto a capacidade do sistema de monitoramento quanto a influência dos parâmetros de usinagem nos níveis de rugosidade e vibração. A ANOVA é apresentada na forma de tabela, na qual F_v representa a fonte de variação, SQ representa a soma dos quadrados, MQ representa a média dos quadrados, GL representa os graus de liberdade, F_0 representa o teste de variância, p representa o nível de significância e F_c representa o valor crítico do teste.

4.1 EFETIVIDADE DO MONITORAMENTO

Para testar e validar os dados coletados pelos sensores no torneamento, foram comparadas as configurações de *setup* usadas e os valores coletados pelo sistema de monitoramento. A ANOVA foi utilizada para avaliar a influência da variação dos parâmetros de usinagem nos dados coletados pelos sensores e certificar a capacidade do sistema de monitoramento. As Tabelas 8, 9 e 10 apresentam os dados de rotação obtidos pelo sistema de monitoramento, comparações com as rotações nominais e obtidas pelo tacômetro, e a análise de variância, respectivamente. De forma análoga, os valores de avanço coletados pelo sistema de monitoramento foram analisados e comparados com os valores nominais. As Tabelas 11 e 12 apresentam os valores obtidos, desvios e o resultado do teste ANOVA.

Tabela 8 – Comparação entre as rotações nominais e do sensor.

Condição	Rotação nominal (RPM)	Rotação sensor (RPM)	Desvio
C ₁	800	763	4,63%
C ₂	800	765	4,38%
C ₃	800	765	4,38%
C ₄	1000	974	2,60%
C ₅	1000	977	2,30%
C ₆	1000	981	1,90%
C ₇	1250	1222	2,24%
C ₈	1250	1225	2,00%
C ₉	1250	1222	2,24%

Fonte: Próprio autor.

Tabela 9 – Comparação entre as rotações do tacômetro e do sensor.

Condição	Rotação tacômetro (RPM)	Rotação sensor (RPM)	Variação
C ₁	763	763	0,00%
C ₂	763	765	0,26%
C ₃	760	765	0,65%
C ₄	975	974	0,10%
C ₅	977	977	0,00%
C ₆	978	981	0,31%
C ₇	1222	1222	0,00%
C ₈	1225	1225	0,00%
C ₉	1219	1222	0,25%

Fonte: Próprio autor.

Tabela 10 – Análise de variância (ANOVA) para o monitoramento da rotação.

F _v	SQ	GL	MS	F ₀	p	F _c
Rotações	630	2	315190,5	41411,89	1,45 x 10⁻¹⁸	4,256
Avanços	44,333	2	22,16667	2,912409	0,106	4,256
Interações	32,666	4	8,166667	1,072993	0,424	3,633
Dentro	68,500	9	7,611111			
Total	630,500	17				

Fonte: Próprio autor.

Tabela 11 – Comparação entre os avanços nominais e experimentais.

Condição	Avanço nominal (mm/volta)	Avanço sensor (mm/volta)	Variação
C₁	0,139	0,140	0,71%
C₂	0,214	0,210	1,87%
C₃	0,281	0,300	6,33%
C₄	0,139	0,140	0,71%
C₅	0,214	0,220	2,73%
C₆	0,281	0,280	0,36%
C₇	0,139	0,140	0,71%
C₈	0,214	0,210	1,87%
C₉	0,281	0,290	3,10%

Fonte: Próprio autor.

Tabela 12 – Análise de variância (ANOVA) para o monitoramento do avanço.

F_v	SQ	GL	MS	F₀	p	F_c
Rotações	3,33 x 10 ⁻⁰⁵	2	1,67 x 10 ⁻⁰⁵	0,333	0,725	4,256
Avanços	0,066	2	0,033	660,333	1,73 x 10⁻¹⁰	4,256
Interações	0,001	4	0,001	3,666	0,048	3,633
Dentro	0,004	9	0,005			
Total	0,067	17				

Fonte: Próprio autor.

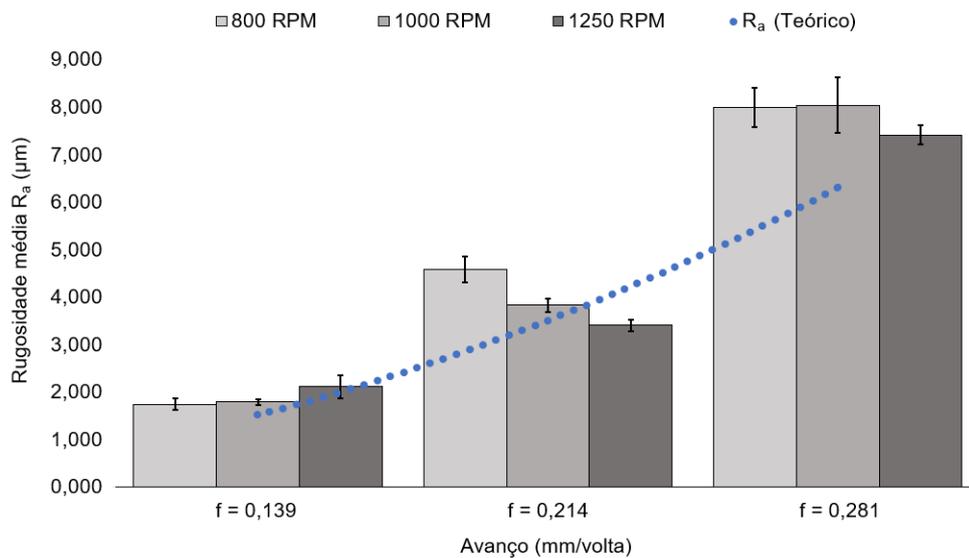
Os resultados do sistema de monitoramento para a rotação são comparáveis aos do tacômetro, com uma variação máxima de 0,65% devido às características dos instrumentos de medição. Para as rotações nominais, a maior variação encontrada foi de 4,63%, o que indica a necessidade de ajustes ou manutenções na máquina. Já para o monitoramento do avanço, as variações ficaram entre 0,36% e 6,33%, associadas a desgastes e falta de manutenção preventiva. Em ambos os casos, a análise de variância mostrou que o sistema de monitoramento proposto é capaz de detectar pequenas variações nos parâmetros de usinagem.

4.2 INFLUÊNCIA NA RUGOSIDADE

Seguindo o padrão experimental adotado, foram comparados os valores de R_a e R_t para cada condição. Os valores obtidos por meio do rugosímetro, as médias e os

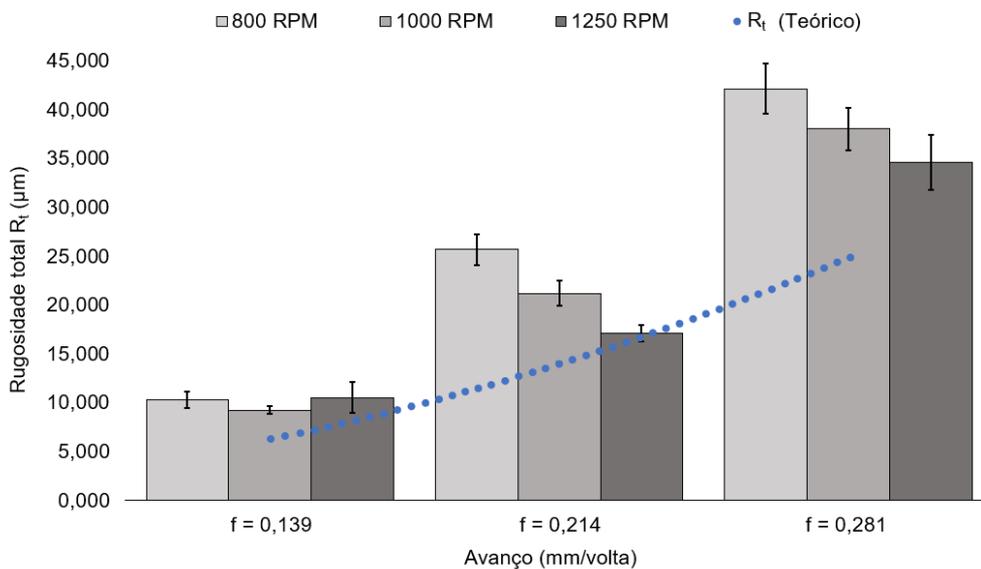
desvios padrões são apresentados nos Apêndices B e C e representados graficamente nas Figuras 19 e 20. Para comparar os dados e verificar estatisticamente a influência de cada parâmetro em R_a e R_t , foram feitas as análises de variância (ANOVA) utilizando fator duplo com repetição. O nível de significância utilizado em todas as análises é de 5% ($\alpha = 0,05$). Os resultados estão expressos nas Tabelas 13 e 14.

Figura 19 – Influência dos parâmetros de corte na rugosidade média (R_a).



Fonte: Próprio autor

Figura 20 – Influência dos parâmetros de corte na rugosidade total (R_t).



Fonte: Próprio autor.

Tabela 13 – Análise de variância (ANOVA) para o R_a .

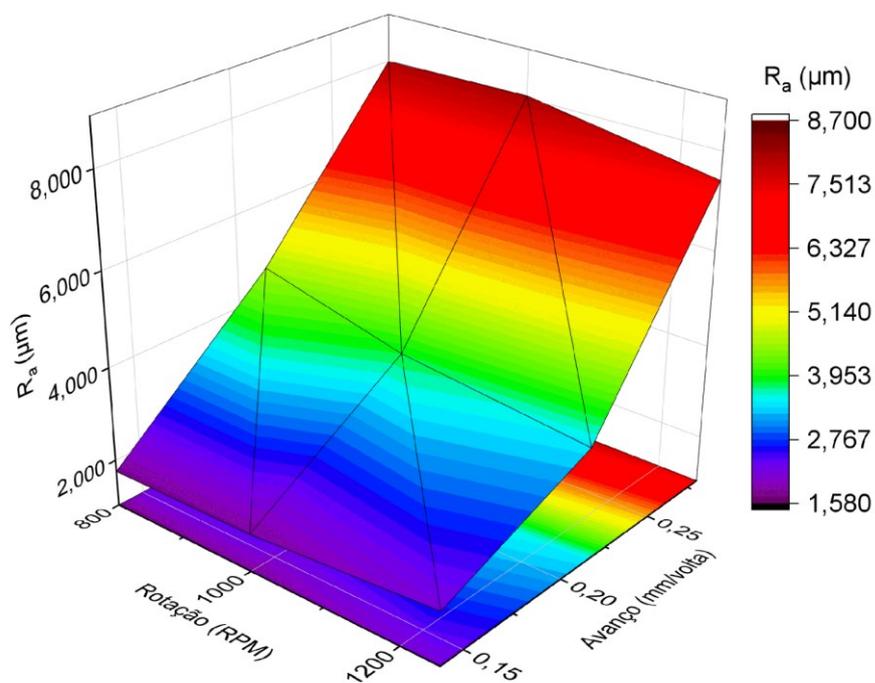
F_v	SQ	GL	MS	F_0	p	F_c
Rotações	1,922	2	0,961	9,801	0,0003	3,204
Avanços	326,690	2	163,345	1665,852	$6,4 \times 10^{-43}$	3,204
Interações	4,307	4	1,077	10,983	$2,6 \times 10^{-6}$	2,578
Dentro	4,412	45	0,098			
Total	337,333	53				

Fonte: Próprio autor.

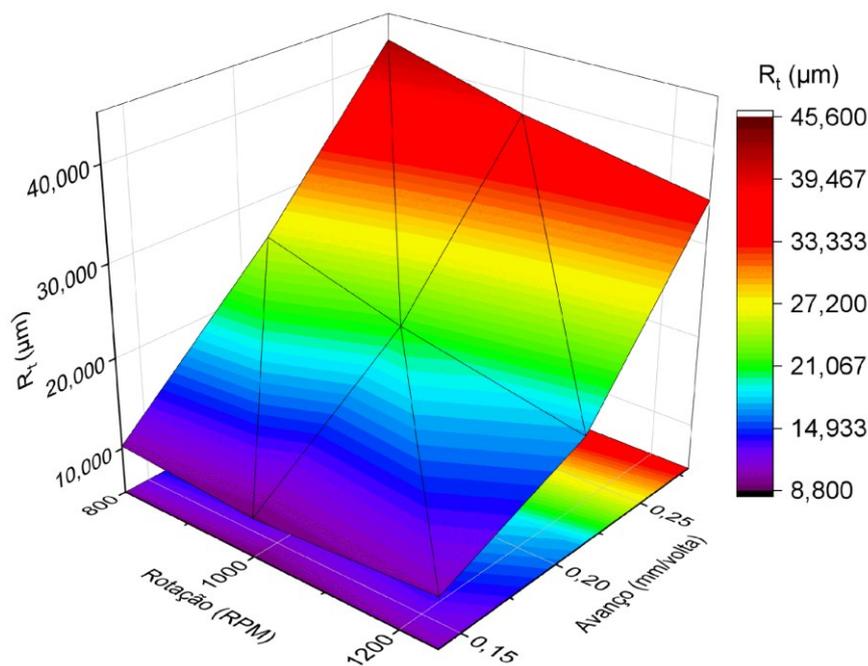
Tabela 14 – Análise de variância (ANOVA) para o R_t .

F_v	SQ	GL	MS	F_0	p	F_c
Rotações	255,504	2	127,752	35,178	$6,33 \times 10^{-10}$	3,204
Avanços	7264,336	2	3632,168	1000,165	$5,07 \times 10^{-38}$	3,204
Interações	141,522	4	35,380	9,742	$9,18 \times 10^{-06}$	2,578
Dentro	163,421	45	3,631			
Total	7824,783	53				

Fonte: Próprio autor.

Figura 21 – Representação 3D da influência dos parâmetros de corte em R_a .

Fonte: Próprio autor.

Figura 22 – Representação 3D da influência dos parâmetros de corte no R_t .

Fonte: Próprio autor.

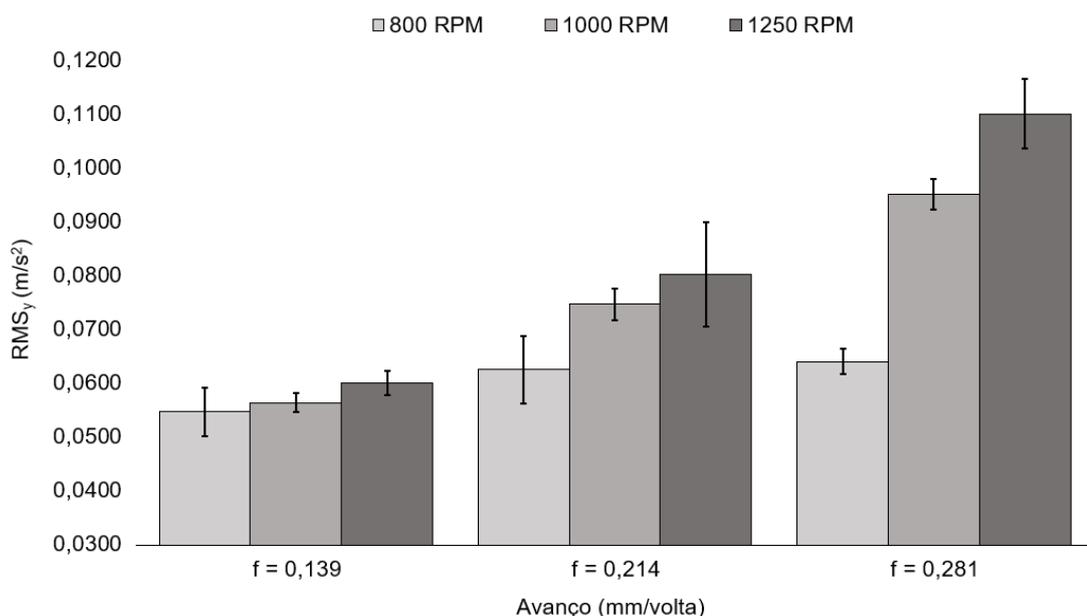
As Figuras 19 e 21 fornecem elementos para a comparação da rugosidade média em diferentes condições de rotação e avanço, bem como os respectivos desvios padrões (1σ). É possível observar que o aumento do avanço, para a mesma condição de rotação, produz aumentos significativos do parâmetro R_a . A análise de variância feita na Tabela 13 corrobora com a análise do gráfico. Tanto os valores da distribuição F, quanto os valores de p indicam influência do avanço na rugosidade média. Também é possível verificar a variação dos valores de rugosidade. A variação de R_a com o aumento da rotação (mesma condição de avanço) também fica evidente. Porém, esta variação não mostra uma tendência, pois a maioria das oscilações ocorrem dentro das faixas de desvios padrões. Apesar disso, a análise de variância mostra que existe influência da rotação no parâmetro R_a , dentro do índice de significância estabelecido. As oscilações dos valores de R_a , como observado na revisão bibliográfica, podem estar associada aos níveis de vibração da máquina, os quais aumentam com a velocidade de corte.

Analogamente, os resultados indicam o mesmo comportamento para a rugosidade total. Por meio das Figuras 20 e 22, pode-se observar a forte influência entre o aumento do R_t com o aumento do avanço. A rotação também exerce influência nos valores de rugosidade, porém com uma tendência de diminuição dos valores de R_t (para avanços maiores). Ambos os resultados são confirmados estatisticamente pela análise de variância mostrada na Tabela 14. Sendo assim, pode-se afirmar que ambos os parâmetros afetam a rugosidade total da superfície analisada.

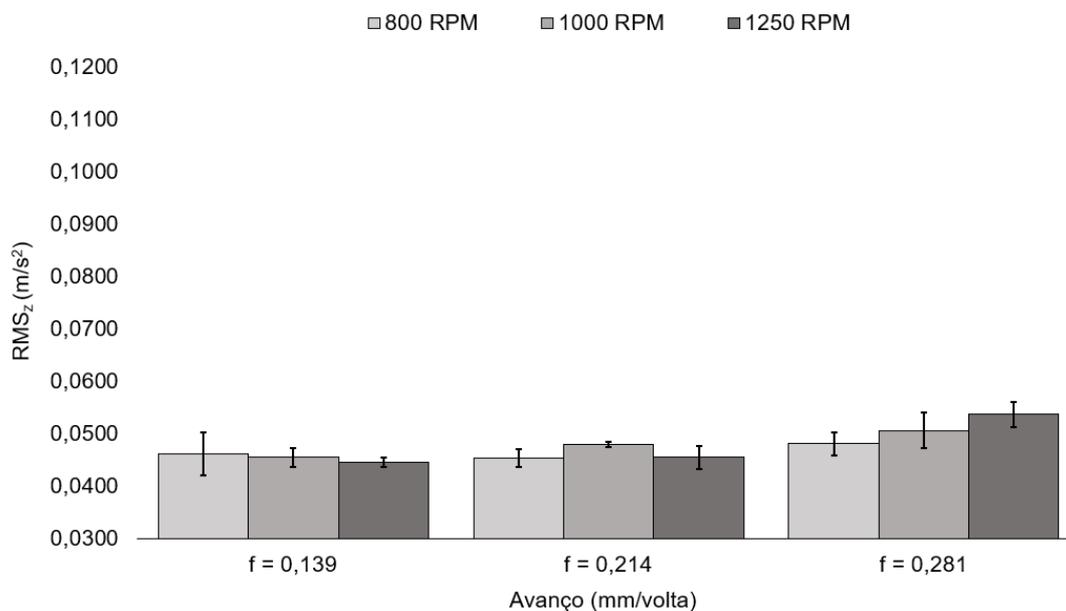
4.3 INFLUÊNCIA NA VIBRAÇÃO

Os níveis de vibração obtidos pelo acelerômetro foram comparados com os parâmetros de configuração da máquina. Para tal análise, os sinais de vibração obtidos em cada direção analisada foram separados em seis trechos, dos quais foram calculados os valores RMS. Nos Apêndices D e E são apresentados os valores de RMS_y e RMS_z , respectivamente, para cada um dos trechos, valores médios e os desvios padrões para as direções de avanço e corte. De forma análoga à rugosidade, os dados de vibração foram comparados graficamente (Figuras 23 e 24) e receberam tratamento estatístico por análise de variância, o que pode ser observado nas Tabelas 15 e 16.

Figura 23 – Influência dos parâmetros de corte no RMS_y .



Fonte: Próprio autor.

Figura 24 – Influência dos parâmetros de corte no RMS_z.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 15 – Análise de variância (ANOVA) para o RMS_y.

F _v	SQ	GL	MS	F ₀	p	F _c
Rotações	0,005	2	0,002	81,590	1,08 x 10 ⁻¹⁵	3,204
Avanços	0,009	2	0,005	159,753	3,62 x 10 ⁻²¹	3,204
Interações	0,003	4	0,001	23,015	2,11 x 10 ⁻¹⁰	2,578
Dentro	0,001	45	3,02 x 10 ⁻⁰⁵			
Total	0,018	53				

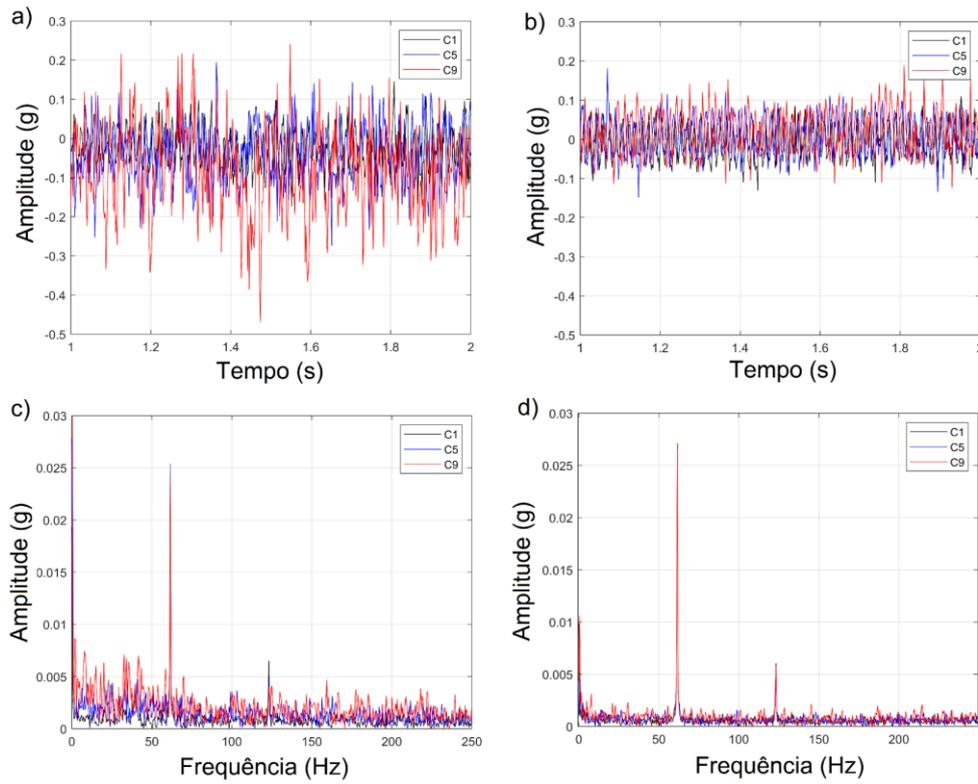
Fonte: Próprio autor.

Tabela 16 – Análise de variância (ANOVA) para o RMS_z.

F _v	SQ	GL	MS	F ₀	p	F _c
Rotações	2,53 x 10 ⁻⁰⁵	2	1,27 x 10 ⁻⁰⁵	1,873	0,1654	3,204
Avanços	0,003	2	0,001	22,687	1,54 x 10 ⁻⁰⁷	3,204
Interações	0,001	4	2,56 x 10 ⁻⁰⁵	3,776	0,009	2,578
Dentro	0,003	45	6,77 x 10 ⁻⁰⁶			
Total	0,000739	53				

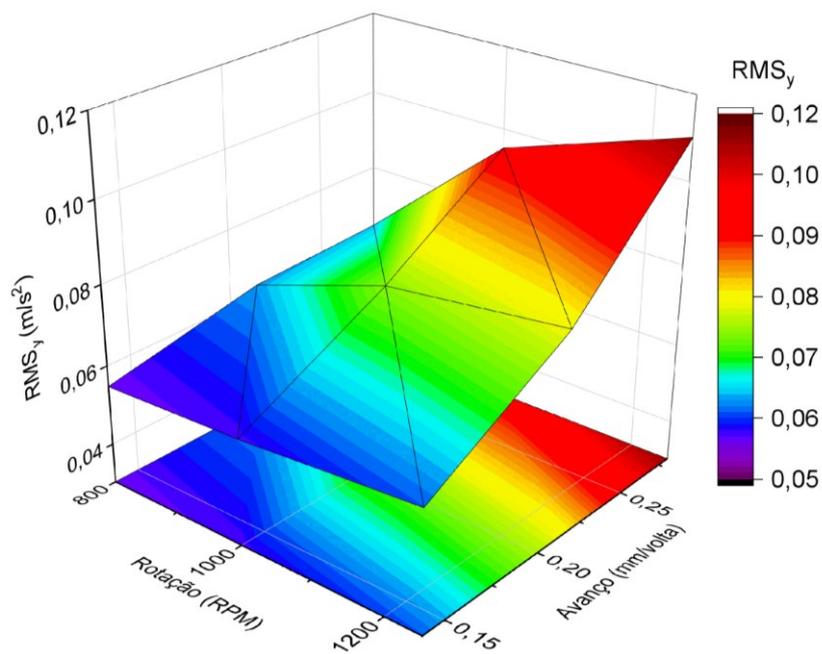
Fonte: Próprio autor.

Figura 25 – Sinal de vibração e espectro em frequência nas condições C1, C5 C9: Figuras a) e c) eixo y e b) e d) eixo z.



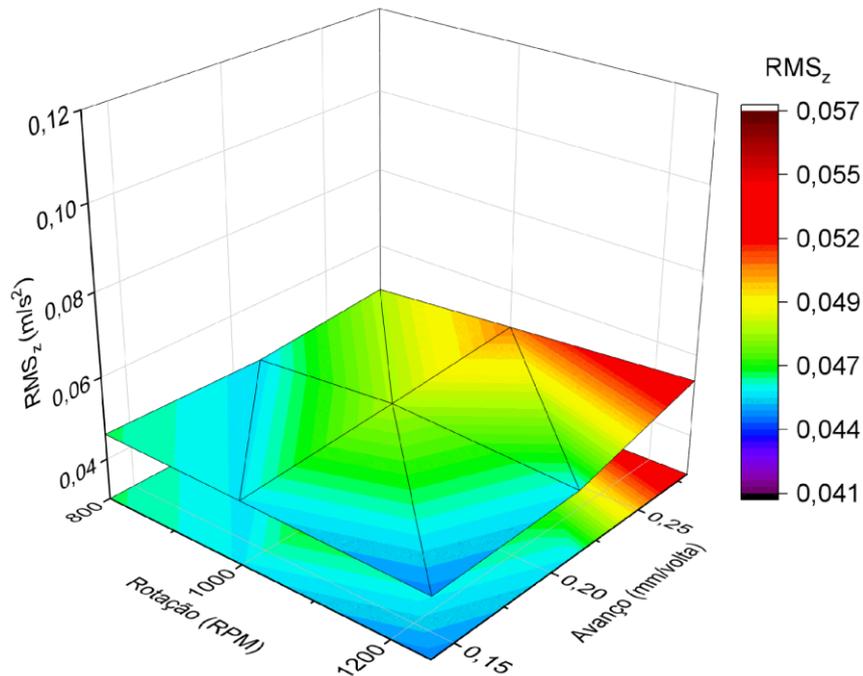
Fonte: Próprio autor.

Figura 26 – Representação 3D da influência dos parâmetros de corte no RMS_y .



Fonte: Próprio autor.

Figura 27 – Representação 3D da influência dos parâmetros de corte no RMS_z .



Fonte: Próprio autor.

Analisando o comportamento do gráfico na Figura 23, é possível notar que o aumento do avanço está atrelado a um aumento significativo do RMS_y , principalmente para rotações acima de 800 RPM. Isto também fica evidente verificando os espectros de frequência mostrados na Figura 25 b). Com a análise estatística mostrada na Tabela 15, é possível afirmar que o avanço, de fato, influencia nos valores RMS obtidos. Como verificado na literatura, o aumento do avanço influencia na força de corte, aumentando os níveis de vibração do sistema. O efeito da rotação nos valores de RMS_y também podem ser verificados na Figura 26. Pode-se observar que para os maiores avanços, o aumento da rotação também gera níveis maiores de vibração, efeito caracterizado na Figura 26. A análise de variância confirma o efeito observado, confirmando a influência da rotação. Apesar da padronização dos raios de ponta das ferramentas e minimizar a formação de arestas postiças de corte (APC), o aumento da rotação amplifica a força de desbalanceamento, a qual é diretamente proporcional à frequência de rotação do cabeçote.

As análises para a direção de corte podem ser feitas de forma análoga. As Figuras e 25 d) e 27 confirmam os mesmos efeitos observados na direção do avanço, porém com amplitudes menores. Na Tabela 16 verifica-se a influência do avanço no valor RMS_z , porém não é possível fazer a mesma afirmação sobre a rotação. Os baixos valores de amplitude nesta direção estão associados principalmente à sensibilidade do sensor e aos baixos valores do raio de ponta.

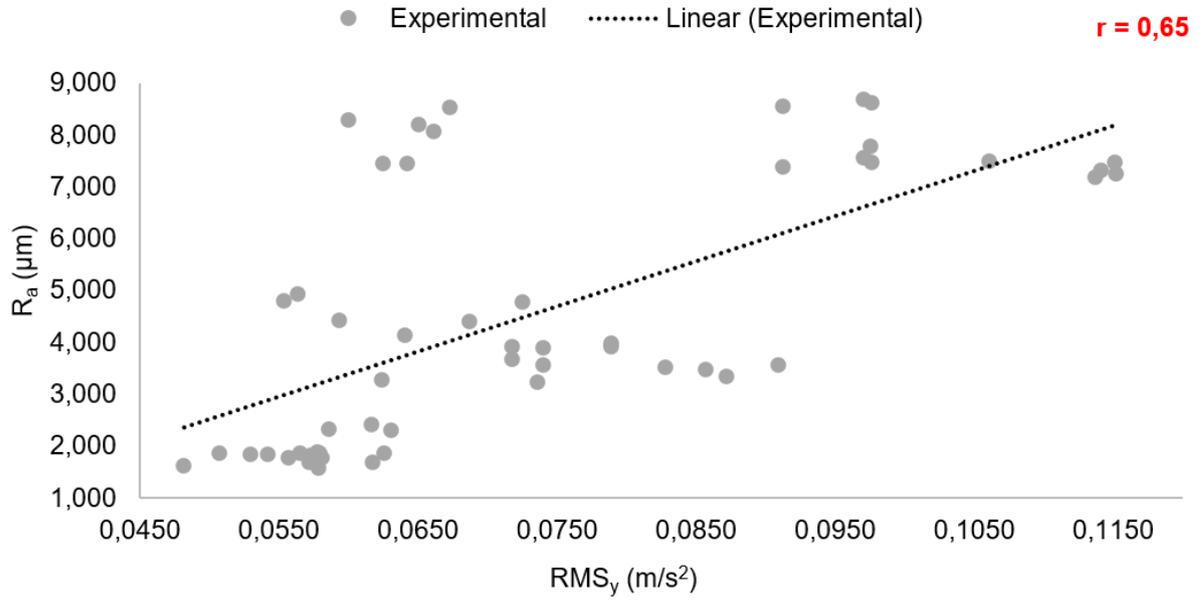
4.4 CORRELAÇÃO ENTRE RUGOSIDADE E VIBRAÇÃO

Como visto nas seções anteriores, as configurações do torneamento exercem influência nos níveis de vibração do sistema, bem como no perfil de rugosidade obtido na peça. Para avaliar o nível de correlação entre os parâmetros de saída do processo, utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson (r) que mede o grau da relação estatística entre duas variáveis contínuas e independentes (MOORE e KIRKLAND, 2007). A classificação do coeficiente e seus respectivos intervalos podem ser observados na Tabela 17. Os valores RMS em vibração e rugosidade (média e total) foram comparados para cada uma das condições de usinagem estabelecidas no planejamento experimental e apresentadas nas Figuras 28, 29, 30 e 31.

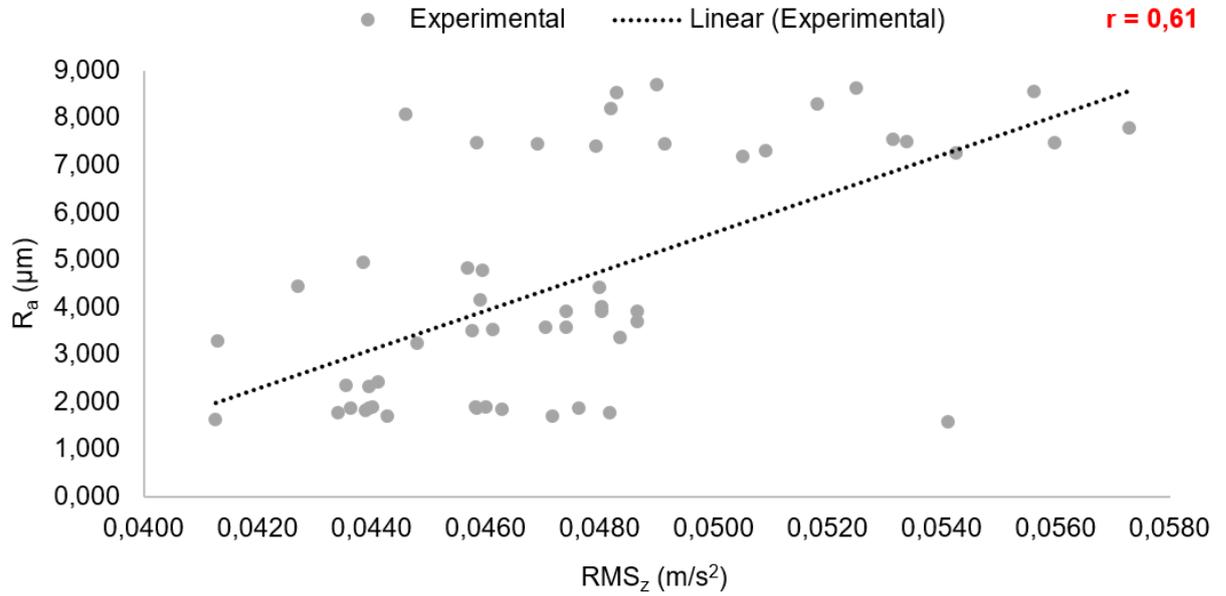
Tabela 17 – Interpretação do coeficiente de Pearson.

Valores de r (positivo ou negativo)	Interpretação
$r = 0$	Nula
$0 < r \leq 0,2$	Muito fraca
$0,2 < r \leq 0,4$	Fraca
$0,4 < r \leq 0,6$	Moderada
$0,6 < r \leq 0,8$	Forte
$0,8 < r \leq 0,99$	Muito forte
$r = 1$	Perfeita

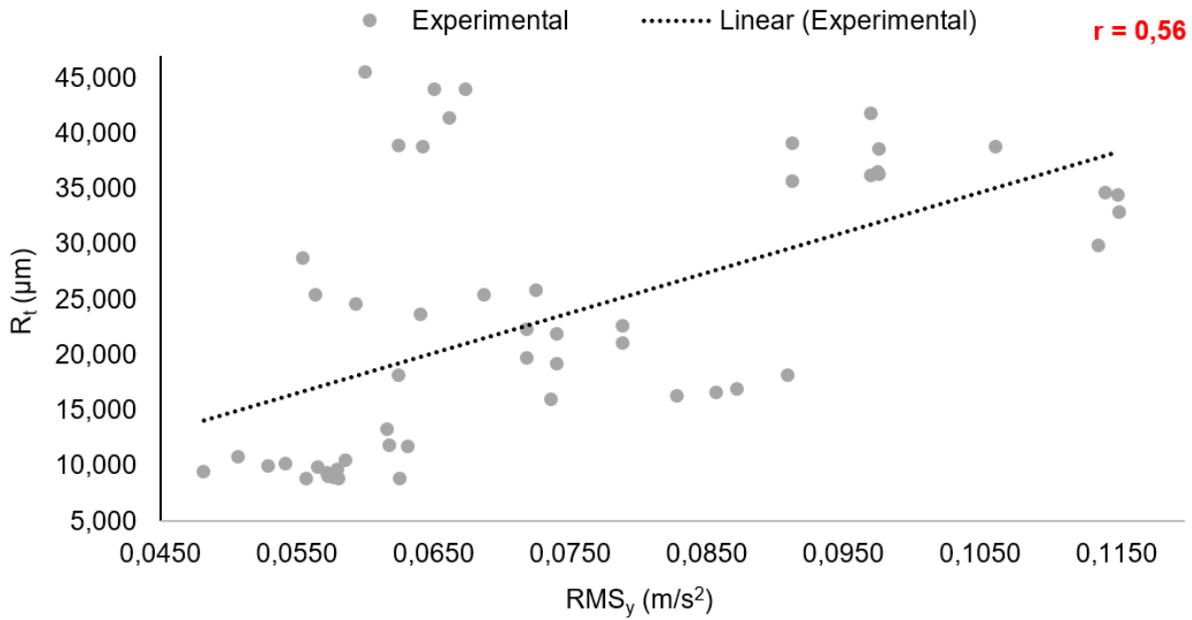
Fonte: Adaptado de MOORE e KIRKLAND (2007).

Figura 28 – Correlação entre os parâmetros R_a e RMS_y .

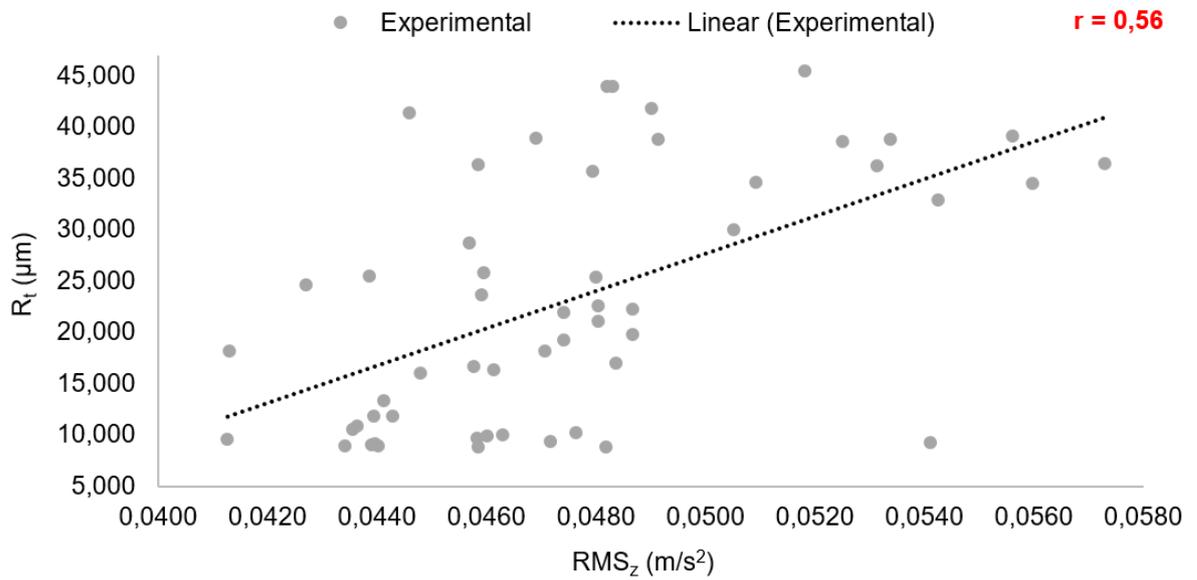
Fonte: Próprio autor.

Figura 29 – Correlação entre os parâmetros R_a e RMS_z .

Fonte: Próprio autor.

Figura 30 – Correlação entre os parâmetros R_t e RMS_y .

Fonte: Próprio autor.

Figura 31 – Correlação entre os parâmetros R_t e RMS_z .

Fonte: Próprio autor.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou avaliar o potencial de um sistema de monitoramento de baixo custo no torneamento do aço ABNT 1020 em uma máquina-ferramenta universal. Para tal, foi avaliada a correlação entre os parâmetros de rugosidade R_a e R_t , valor RMS de vibração e os parâmetros de usinagem. É importante destacar que todos os materiais e equipamentos utilizados foram cedidos pela escola “SENAI Oscar Lúcio Baldan”. O SENAI atualmente trabalha com o programa “Jornada de Transformação Digital” criado pela FIESP (Federação das Indústrias do Estado de São Paulo), para atender micro, pequenas e médias indústrias por meio de consultorias e treinamentos sobre digitalização. A jornada busca aumentar a competitividade e a produtividade da indústria e atende empresas em diferentes níveis de maturidade digital (JORNADA DE TRANSFORMAÇÃO DIGITAL, 2022). Levando em conta os argumentos já discutidos sobre as dificuldades da digitalização em pequenas e médias empresas, o presente trabalho contribui de forma significativa ao contexto atual pois debate a viabilidade de sistemas de baixo custo na digitalização de processos. Alguns pontos importantes a serem destacados:

- **Sistema de monitoramento:** A aplicação dos sensores e microcontrolador de baixo custo se mostrou efetiva, principalmente no monitoramento do avanço e da rotação da máquina. A diferença entre os valores obtidos pelos sensores e as condições de *setup* mostraram a viabilidade da aplicação. No monitoramento da vibração, o sensor utilizado mostrou-se pouco efetivo principalmente pelas baixas amplitudes dos sinais. A possível razão para o fato está na baixa sensibilidade do sensor. Apesar disso, foi possível constatar e correlacionar a variação do nível de vibração com os outros efeitos mensurados. O funcionamento da plataforma de gerenciamento bem como sua comunicação com o microcontrolador ocorreu de forma satisfatória, levando em consideração as limitações de velocidade e quantidade de dados no envio de informações.

- **Correlação entre parâmetros:** Foi possível verificar a correspondência entre os parâmetros e traçar paralelos com os argumentos discutidos na revisão bibliográfica. Os efeitos do avanço na rugosidade ficaram bem caracterizados em todos os experimentos realizados. Já o aumento da rotação e, conseqüentemente, da velocidade e corte não mostraram padrões bem definidos, o que pode estar associado

à padronização do raio de ponta da ferramenta. O valor RMS de vibração também mostrou comportamento análogo, porém as correlações foram mais tímidas em função das limitações do acelerômetro utilizado.

Destacam-se também para trabalhos futuros, os seguintes tópicos:

- Investigação sobre o efeito da sensibilidade do acelerômetro no monitoramento das frequências dominantes no processo de torneamento;
- Investigação sobre a influência da profundidade de usinagem na correlação entre rugosidade e vibração;
- Avaliação do potencial do sistema de monitoramento como ferramenta preditiva no desgaste de peças, bem como no ajuste de componentes que possam comprometer as características da superfície usinada;
- Construção e validação de modelos matemáticos que ajudem na predição do acabamento superficial em peças torneadas.

REFERÊNCIAS

ALBUKHITAN, S. Developing digital transformation strategy for manufacturing. **Procedia computer science**, v. 170, p. 664-671, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A29/A29M – 15**: Standard Specification for General Requirements for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot-Wrought. West Conshohocken, 2015. 16 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E10-18**: Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials. West Conshohocken. 33 p., 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A400 – 69**: Standard Practice for Steel Bars, Selection Guide, Composition, and Mechanical Properties. West Conshohocken, 2012. 9 p.

ARBIX, G. et al. O Brasil e a nova onda de manufatura avançada: o que aprender com Alemanha, China e Estados Unidos. **Novos estudos CEBRAP**, v. 36, p. 29-49, 2017.

BARBOSA, G. F.; SHIKI, S. B.; SAVAZZI, J. O. Digitalization of a standard robot arm toward 4th industrial revolution. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2019.

BOKRANTZ, J. *et al.* Maintenance in digitalised manufacturing: Delphi-based scenarios for 2030. **International Journal of Production Economics**, v. 191, p. 154-169, 2017.

BRIGHAM, E. O. **The fast Fourier transform and its applications**. Prentice-Hall, Inc., 1988.

BURAKOWSKI, T.; WIERZCHON, T. **Surface Engineering of Metals: Principles, Equipment, Technologies**. CRC Press, 1998.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction**. New York: Wiley, 2018.

CHANG, W.; WU, S. Big data analysis of a mini three-axis CNC machine tool based on the tuning operation of controller parameters. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 99, n. 5, p. 1077-1083, 2018.

CHOUDHURY, S. K.; GOUDIMENKO, N. N.; KUDINOV, V. A. On-line control of machine tool vibration in turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 37, n. 6, p. 801-811, 1997.

DAVIS, J. R. (Ed.). **Surface engineering for corrosion and wear resistance**. ASM international, 2001.

DINIZ, E.A.; MARCONDE, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber Editora, 2001.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, 12^a ed. São Paulo; Edgard Blücher, 2006.

GADELMAWLA, E. S. *et al.* Roughness parameters. **Journal of materials processing Technology**, v. 123, n. 1, p. 133-145, 2002.

GHOMI, E. J.; RAHMANI, A. M.; QADER, N. N. Cloud manufacturing: challenges, recent advances, open research issues, and future trends. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 102, n. 9, p. 3613-3639, 2019.

HIOKI, D. **Influência dos parâmetros de corte do fresamento HSM sobre o desempenho tribológico do aço AISI H13 endurecido**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2006.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. 6 ed. Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1176p., 2010.

KIM, D. *et al.* Smart machining process using machine learning: A review and perspective on machining industry. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, v. 5, n. 4, p. 555-568, 2018.

LAIRD, K. Understanding the Digital Transformation Called Industry 4.0: Manufacturing Today Requires More Brain Than Brawn. **Plastics Engineering**, v. 73, n. 1, p. 24-28, 2017.

LASI, H. *et al.* Industry 4.0. **Business & Information Systems Engineering**, v. 6, n. 4, p. 239-242, 2014.

LIU, C.; XU, X. Cyber-physical machine tool – the era of machine tool 4.0. **Procedia Cirp**, v. 63, p. 70-75, 2017.

LOCKWOOD, A. J. *et al.* Digitalisation of legacy machine tools. Tech. rep., **Advanced Manufacturing Research Centre (AMRC)**, University of Sheffield, 2018.

MACHADO, A. R. *et al.* **Teoria da Usinagem dos Materiais**. Editora Blucher, 2015.

MONTGOMERY, D. C. Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons, 2017.

MOORE, D. S.; KIRKLAND, S. **The basic practice of statistics**. New York: WH Freeman, 2007.

NGUYEN, V.; DUGENSKE, A. An I2C based architecture for monitoring legacy manufacturing equipment. **Manufacturing Letters**, v. 15, p. 67-70, 2018.

RAO, S. **Vibrações Mecânicas**. 4ª Edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall. 2008.

SANTOS, S. C.; SALES W. F.; **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**, 1ª ed. São Paulo; Editora Artliber Ltda, 2007.

SAVELLA, F. B. *et al.* Analysis of the effect of part geometry and cutting parameters over tool vibration and surface integrity on hard turning. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 122, n. 9, p. 4065-4077, 2022.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL (SENAI). **Jornada de Transformação Digital**. Disponível em: <https://jornadadigital.sp.senai.br/>. Acesso em 22 dez. 2022.

SOTELO, J. J.; FRANÇA, L. N. F. **Introdução às vibrações mecânicas**. São Paulo: Edgar Blucher, v. 1, p. 168, 2006.

SOTO-OCAMPO, C. R. *et al.* Low-cost, high-frequency, data acquisition system for condition monitoring of rotating machinery through vibration analysis-case study. **Sensors**, v. 20, n. 12, p. 3493, 2020.

SPIEGEL, M. R. **Fourier Analysis with applications to boundary value problems**. Mc Graw Hill, New York, 1974.

TAO, F.; ZHANG, M. Digital twin shop-floor: a new shop-floor paradigm towards smart manufacturing. **Lee Access**, v. 5, p. 20418-20427, 2017.

TANTSCHER, D.; MAYER, B. Digital Retrofitting of legacy machines: A holistic procedure model for industrial companies. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 36, p. 35-44, 2022.

VARANIS, M. *et al.* MEMS accelerometers for mechanical vibrations analysis: A comprehensive review with applications. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 2018.

WHITEHOUSE, D. J. Surface metrology. **Measurement science and technology**, v. 8, n. 9, p. 955, 1997.

XING, Kanglin *et al.* Low-cost precision monitoring system of machine tools for SMEs. **Procedia CIRP**, v. 96, p. 347-352, 2021.

YANG, H. *et al.* A review on vibration analysis and control of machine tool feed drive systems. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 107, n. 1, p. 503-525, 2020.

APÊNDICE A – CÓDIGO DESENVOLVIDO

```

/*
Código desenvolvido para experimento
Autor: Paulo de Tarso Durigan
Institute: Universidade Federal de São Carlos
Última modificação: 07/07/2022
*/

//Declaração de variáveis para monitoramento da vibração
#include <WiFi.h>           //Biblioteca Wifi
#include "ThingSpeak.h"    // Biblioteca para comunicação com a plataforma
#include <fft.h>           // Biblioteca de FFT (by Robin Scheiber)
#define Fs 500.0           // Frequência de amostragem [Hz]
#define NFFT 2048         // Tamanho do sinal a ser aqisitado (em quantidade de
pontos)
float T = pow(10,6)/Fs;    // Período de aquisição em micro-segundos (padrão para a
função para micros)
float valuey[NFFT];       // Vetor com valores medidos no sensor no eixo Y
float valuez[NFFT];       // Vetor com valores medidos no sensor no eixo Y
float rmsy;               // Variável com o valor RMS do sinal valuey
float rmsz;               // Variável com o valor RMS do sinal valuez
float fftmagy[NFFT];      // Vetor com magnitude da FFT
float fftmagz[NFFT];      // Vetor com magnitude da FFT
float freqy[NFFT];        // Vetor de frequência
const int adxl335ypin = 32; // Variável com pino onde ADXL335 está conectado com
valores do eixo Y
const int adxl335zpin = 35; // Variável com pino onde ADXL335 está conectado com
valores do eixo Z
int i;                   // Variável auxiliar para percorrer vetor
int k;                   // Variável auxiliar para percorrer vetor
int temp;                // Variável auxiliar para tempo
int peak_posy;           // Variável com posição do pico em Y

```

```

float peak_freq1y;           // Variável com valor de frequência de pico 1 em Y
float peak_freq2y;           // Variável com valor de frequência de pico 2 em Y
int peak_posz;               // Variável com posição do pico em Z
float peak_freq1z;           // Variável com valor de frequência de pico 1 em Z
float peak_freq2z;           // Variável com valor de frequência de pico 2 em Z
unsigned long last_us = 0L;  // Variável para tempo inicial long
float fft_inputy[NFFT];      // Vetores para FFT
float fft_outputy[NFFT];     // Vetores para FFT
float fft_inputz[NFFT];      // Vetores para FFT
float fft_outputz[NFFT];     // Vetores para FFT

```

```
//Declaração de variáveis para monitoramento da rotação e avanço
```

```

int sensorPin1 = 17;        // Pino de Interrupção
int sensorPin2 = 16;        // Pino de Interrupção
int estado_sensor2 = 0;
int value1;                 // Contador de Pulsos
int rpm;
float av;
float startTime1 = 0;
float endTime1 = 0;
float time_passed1;

```

```
// Declaração de variáveis relacionadas ao WiFi e ThingSpeak
```

```

const char* ssid = "*****"; // SSID da rede
const char* password = "***** "; // senha da rede
unsigned long myChannelNumber = 1789749;
const char * myWriteAPIKey = "VSYA0EUFVZOYUJCA";

```

```
// Timers relacionads à ThingSpeak
```

```

unsigned long lastTime = 0;
unsigned long timerDelay = 30000;

```

```
// Configura WiFi como cliente
WiFiClient client;

void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  pinMode(adxl335ypin, INPUT);
  pinMode(adxl335zpin, INPUT);
  pinMode(sensorPin1, INPUT);
  pinMode(sensorPin2, INPUT);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(sensorPin1),addValue1, RISING);
  estado_sensor2 = digitalRead(sensorPin2);
  WiFi.mode(WIFI_STA);    // Inicializa WiFi
  ThingSpeak.begin(client); // Inicializa ThingSpeak
}
void loop()
{
  if ((millis() - lastTime) > timerDelay)
  {
    // Conexão e reconexão ao WiFi
    if(WiFi.status() != WL_CONNECTED)
    {
      Serial.print("Attempting to connect");
      while(WiFi.status() != WL_CONNECTED)
      {
        WiFi.begin(ssid, password);
        delay(5000);
      }
      Serial.println("\nConnected.");
    }
  }
}
```

```

// Contagem regressiva
Serial.println("CONTAGEM REGRESSIVA PARA MEDICAO");
Serial.println("5");
delay(1000);
Serial.println("4");
delay(1000);
Serial.println("3");
delay(1000);
Serial.println("2");
delay(1000);
Serial.println("1");
delay(1000);
Serial.println("FAZENDO MEDICAO (5 segundos)");

startTime1 = micros();
value1 = 0;
if (estado_sensor2 == HIGH)
{
  endTime1 = micros();
  time_passed1 = ((endTime1 - startTime1)/1000000.0);
  rpm = (value1 / time_passed1)* 60.0;
  av = 50/value1;
}
// Inicialização do algoritmo de FFT
fft_config_t *real_fft_plany = fft_init(NFFT, FFT_REAL, FFT_FORWARD, fft_inputy,
fft_outputy);
fft_config_t *real_fft_planz = fft_init(NFFT, FFT_REAL, FFT_FORWARD, fft_inputz,
fft_outputz);

// Atualiza last_us
last_us = micros();

```

```

// Laco principal para preencher vetor de medidas
for (i=0;i<NFFT;i++)
{
    temp = micros()-last_us;          // Tempo decorrido em relacao ao inicio da aquisicao
    // Se tempo e maior ou igual a periodo de amostragem captura dado do sensor
    if (temp >= T)
    {
        last_us += T;

        valuey[i] = 2*((analogRead(adxl335ypin) - 1488.00)/(2330.00 - 1488.00))-1.00; //
        Conversão para [g] (Calibração em Y)
        valuez[i] = 2*((analogRead(adxl335zpin) - 1495.00)/(2334.00 - 1495.00))-2.00; //
        Conversão para [g] (Calibração em Z)
    }

    // Se tempo for menor continua esperando ate dar o periodo de amostragem
    else if (temp < T)
    {
        i = i-1;
    }
}

// Cálculo de RMS
rmsy = rms_calc(valuey,NFFT);
rmsz = rms_calc(valuez,NFFT);

// Laco para preencher sinal para calculo da FFT
for (int k = 0 ; k < NFFT ; k++)
{
    real_fft_plany->input[k] = (float) valuey[k];
    real_fft_planz->input[k] = (float) valuez[k];
}

```

```

}

// Executa FFT
fft_execute(real_fft_plany);
fft_execute(real_fft_planz);

// Calcula vetor com magnitude da FFT e exibe na tela
for (int k = 0 ; k < real_fft_plany->size/2 ; k++)
{
    fftmagy[k] = sqrt(pow(real_fft_plany->output[2*k],2) +
pow(real_fft_plany->output[2*k+1],2))/(NFFT/2.0);
    fftmagz[k] = sqrt(pow(real_fft_planz->output[2*k],2) +
pow(real_fft_planz->output[2*k+1],2))/(NFFT/2.0);
}

for (k=0;k<NFFT/2;k++)
{

Serial.print(valuey[k],4);
Serial.print(",");
Serial.print(valuez[k],4);
Serial.print(",");
Serial.print(fftmagy[k],4);
Serial.print(",");
Serial.print(fftmagz[k],4);
Serial.print(",");
Serial.println(freqy[k]);

}

// Posição do pico da magnitude - faixa 1

```

```

peak_posy = findmax_bound(fftmagy,2,100); // Máxima freq. entre 2 ( $2*(Fs)/NFFT=0.48$ 
Hz) e 100 ( $100*(Fs)/NFFT=24.41$  Hz)
peak_freq1y = peak_posy*(Fs)/(NFFT); // Frequência do pico

// Posição do pico da magnitude - faixa 2
peak_posy = findmax_bound(fftmagy,101,400); // Máxima freq. entre 101
( $101*(Fs)/NFFT=24.65$  Hz) e 400 ( $400*(Fs)/NFFT=97.65$  Hz)
peak_freq2y = peak_posy*(Fs)/(NFFT); // Frequência do pico

// Posição do pico da magnitude - faixa 1
peak_posz = findmax_bound(fftmagz,2,100); // Máxima freq. entre 2 ( $2*(Fs)/NFFT=0.48$ 
Hz) e 100 ( $100*(Fs)/NFFT=24.41$  Hz)
peak_freq1z = peak_posz*(Fs)/(NFFT); // Frequência do pico

// Posição do pico da magnitude - faixa 2
peak_posz = findmax_bound(fftmagz,101,400); // Máxima freq. entre 101
( $101*(Fs)/NFFT=24.65$  Hz) e 400 ( $400*(Fs)/NFFT=97.65$  Hz)
peak_freq2z = peak_posz*(Fs)/(NFFT); // Frequência do pico

// Prints

Serial.print(rpm_val_1);
Serial.print(",");
Serial.print(av);
Serial.print(",");
Serial.print(peak_freq2y,4);
Serial.print(",");
Serial.print(peak_freq2z,4);
Serial.print(",");
Serial.print(rmsy,4);
Serial.print(",");
Serial.println(rmsz,4);

```

```
// Coloca um delay e destrói a fft para reiniciá-la posteriormente

delay(1000);
fft_destroy(real_fft_plany);
fft_destroy(real_fft_planz);

ThingSpeak.setField(1,rpm);
ThingSpeak.setField(2,av);
ThingSpeak.setField(3,peak_freq2y);
ThingSpeak.setField(4,peak_freq2z);
ThingSpeak.setField(5,rmsy);
ThingSpeak.setField(6,rmsz);

int x = ThingSpeak.writeFields(myChannelNumber, myWriteAPIKey);

if(x == 200)
{
    Serial.println("Channel update successful.");
}
else
{
    Serial.println("Problem updating channel. HTTP error code " + String(x));
    while (x != 200){
        //ThingSpeak.setField(1,rms);
        //ThingSpeak.setField(2,peak_freq1);
        int x = ThingSpeak.writeFields(myChannelNumber, myWriteAPIKey);
        Serial.println(String(x));
    }
    Serial.println("Finally! Channel update successful.");
}

lastTime = millis();
```

```
}  
  
}  
  
//Função para encontrar posição do máximo em array "arr" com tamanho "arrsize"  
int findmax(float arr[],int arrsize){  
    int maxIndex = 0;  
    float maxValue = arr[maxIndex];  
    for (int k = 0;k<arrsize;k++){  
        if(arr[k]>maxValue){  
            maxValue = arr[k];  
            maxIndex = k;  
        }  
    }  
    return maxIndex;  
}
```

```
// Função para encontrar posição do máximo em "arr" entre os índices "arr_ini" e "arr_end"  
int findmax_bound(float arr[],int arr_ini,int arr_end){  
    int maxIndex = arr_ini;  
    float maxValue = arr[maxIndex];  
    for (int k = arr_ini+1;k<arr_end;k++){  
        if(arr[k]>maxValue){  
            maxValue = arr[k];  
            maxIndex = k;  
        }  
    }  
    return maxIndex;  
}
```

```
// Função para encontrar RMS de um array
```

```
float rms_calc(float arr[],int arrsize){  
    float rmsvalue = 0.0;  
    // Calcula o somatório dos pontos ao quadrado  
    for (int k = 0;k<arrsize;k++){  
        rmsvalue = rmsvalue + pow(arr[k],2);  
    }  
    // Calcula RMS  
    rmsvalue = sqrt(rmsvalue/arrsize);  
    return rmsvalue;  
}
```

```
void addValue1()  
{  
    value1++; //Incrementa contador  
}  
// end of loop
```

APÊNDICE B – VALORES DE R_a

Cond.	M_1 (μm)	M_2 (μm)	M_3 (μm)	M_4 (μm)	M_5 (μm)	M_6 (μm)	M (μm)	σ_M (μm)
C ₁	1,700	1,585	1,623	1,859	1,866	1,881	1,752	0,121
C ₂	4,943	4,815	4,780	4,440	4,414	4,146	4,590	0,277
C ₃	8,068	8,283	8,203	8,539	7,445	7,452	7,998	0,413
C ₄	1,773	1,825	1,859	1,853	1,704	1,774	1,798	0,054
C ₅	3,686	3,577	3,918	3,922	3,902	4,000	3,834	0,150
C ₆	8,693	8,549	8,633	7,557	7,394	7,474	8,050	0,578
C ₇	1,880	1,896	1,878	2,318	2,340	2,423	2,123	0,240
C ₈	3,246	3,285	3,354	3,517	3,491	3,574	3,411	0,123
C ₉	7,259	7,466	7,184	7,507	7,316	7,793	7,421	0,201

APÊNDICE C – VALORES DE R_f

Cond.	M_1 (μm)	M_2 (μm)	M_3 (μm)	M_4 (μm)	M_5 (μm)	M_6 (μm)	M (μm)	σ_M (μm)
C ₁	11,845	9,283	9,526	10,274	10,848	9,875	10,275	0,866
C ₂	25,466	28,750	25,840	24,613	25,419	23,716	25,634	1,557
C ₃	41,372	45,532	44,023	43,977	38,932	38,865	42,117	2,583
C ₄	8,915	9,069	9,169	10,034	9,357	8,839	9,231	0,397
C ₅	19,785	19,292	21,068	22,304	21,954	22,621	21,171	1,256
C ₆	41,885	39,161	38,626	36,279	35,701	36,365	38,003	2,151
C ₇	9,661	8,936	8,860	11,810	10,496	13,352	10,519	1,617
C ₈	16,031	18,157	17,005	16,326	16,685	18,218	17,070	0,845
C ₉	32,930	34,497	29,960	38,871	34,662	36,509	34,572	2,775

APÊNDICE D – VALORES DE RMS_y

Cond.	M ₁ (μm)	M ₂ (μm)	M ₃ (μm)	M ₄ (μm)	M ₅ (μm)	M ₆ (μm)	M (μm)	σ _M (μm)
C ₁	0,0617	0,0578	0,0482	0,0541	0,0507	0,0565	0,0548	0,0045
C ₂	0,0563	0,0554	0,0725	0,0593	0,0687	0,0640	0,0627	0,0063
C ₃	0,0661	0,0600	0,0650	0,0673	0,0624	0,0642	0,0642	0,0024
C ₄	0,0557	0,0572	0,0578	0,0529	0,0572	0,0580	0,0565	0,0018
C ₅	0,0718	0,0740	0,0788	0,0718	0,0740	0,0788	0,0749	0,0030
C ₆	0,0970	0,0912	0,0976	0,0970	0,0912	0,0976	0,0953	0,0029
C ₇	0,0579	0,0577	0,0625	0,0631	0,0585	0,0616	0,0602	0,0022
C ₈	0,0735	0,0624	0,0872	0,0827	0,0857	0,0909	0,0804	0,0097
C ₉	0,1152	0,1151	0,1137	0,1061	0,1141	0,0975	0,1103	0,0065

APÊNDICE E – VALORES DE RMS_z

Cond.	M ₁ (μm)	M ₂ (μm)	M ₃ (μm)	M ₄ (μm)	M ₅ (μm)	M ₆ (μm)	M (μm)	σ _M (μm)
C ₁	0,0443	0,0541	0,0413	0,0476	0,0436	0,0460	0,0461	0,0041
C ₂	0,0439	0,0457	0,0459	0,0427	0,0480	0,0459	0,0453	0,0017
C ₃	0,0446	0,0518	0,0482	0,0483	0,0469	0,0491	0,0482	0,0022
C ₄	0,0434	0,0439	0,0439	0,0463	0,0472	0,0482	0,0455	0,0018
C ₅	0,0487	0,0474	0,0480	0,0487	0,0474	0,0480	0,0480	0,0005
C ₆	0,0490	0,0556	0,0525	0,0531	0,0479	0,0458	0,0507	0,0034
C ₇	0,0458	0,0440	0,0458	0,0439	0,0436	0,0441	0,0445	0,0009
C ₈	0,0448	0,0413	0,0484	0,0461	0,0458	0,0471	0,0456	0,0022
C ₉	0,0542	0,0560	0,0505	0,0534	0,0509	0,0573	0,0537	0,0025