

Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia Mecatrónica

Trabalho de Projeto

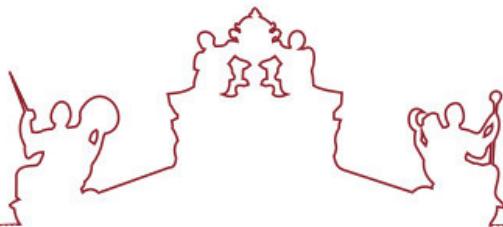
Avaliação do Impacto da Temperatura na integridade dimensional de peças produzidas em contexto de CNC

Davi Marques Franco de Godoy Pereira

Orientador(es) | Joaquim Guerreiro Marques

Mouhaydine Tlemcani

Évora 2025



Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia Mecatrónica

Trabalho de Projeto

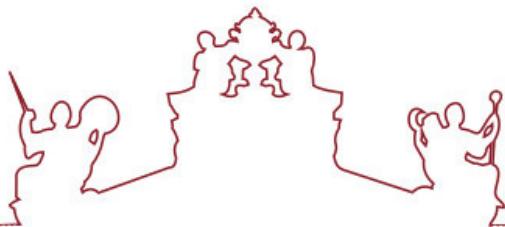
Avaliação do Impacto da Temperatura na integridade dimensional de peças produzidas em contexto de CNC

Davi Marques Franco de Godoy Pereira

Orientador(es) | Joaquim Guerreiro Marques

Mouhaydine Tlemcani

Évora 2025



O trabalho de projeto foi objeto de apreciação e discussão pública pelo seguinte júri nomeado pelo Diretor da Escola de Ciências e Tecnologia:

Presidente | Frederico José Grilo (Universidade de Évora)

Vogais | Joaquim Guerreiro Marques (Universidade de Évora) (Orientador)
Vera Pires (Universidade de Lisboa - Instituto Superior Técnico) (Arguente)

Évora 2025

Agradecimentos

Com gratidão, dedico este trabalho primeiramente a Deus, pela força e inspiração.

À minha família, pelo apoio constante e por serem o meu alicerce.

À minha noiva, Nicole, pela paciência, compreensão, presença, incentivo e amor ao longo desta jornada.

Aos meus professores orientadores da Universidade de Évora, Professor Mouhaydine Tlemcani e Professor Joaquim Manuel Guerreiro Marques, pela orientação, partilha de conhecimento, dedicação, tempo e esforços para ajudar. Agradeço a confiança e o incentivo que foram cruciais para o desenvolvimento deste projeto.

Aos orientadores da Aernnova, Miguel Caiado, Manuel Madeira e Fábio Serrano, pelo auxílio, apoio, partilha de conhecimento, tempo e esforços para ajudar. A vossa colaboração e o ambiente de trabalho proporcionado pela empresa foram excelentes, permitindo a realização deste projeto e a vossa solicitude foi fundamental para o seu sucesso.

À Universidade de Évora, pelos anos de formação, pelo conhecimento partilhado pelos professores e colegas, e por ter sido a base que me permitiu chegar até aqui.

À Aernnova, pela oportunidade e pela experiência proporcionada neste projeto. Que esta parceria possa continuar.

Avaliação do Impacto da Temperatura na Integridade Dimensional de peças produzidas em contextos CNC

Resumo

O presente projeto de mestrado do curso de Engenharia Mecatrónica investiga a mitigação de erros térmicos em processos de maquinagem CNC de alta precisão, focando-se na produção de peças em ligas de alumínio para a indústria aeronáutica. O estudo aborda a complexa interação entre parâmetros de processo, a dinâmica térmica da máquina-ferramenta e da peça, e a sua influência direta na integridade dimensional final. Utilizando uma abordagem experimental e analítica em colaboração com a Aernnova, foram recolhidos dados de produção e realizados ensaios específicos para caracterizar o comportamento térmico. A análise de dados, suportada por scripts Python e visualizações gráficas, permitiu identificar correlações significativas entre os parâmetros da máquina e a temperatura da peça, com destaque para as ferramentas específicas (como T1, T6, T19 e T18) e parâmetros como a carga do spindle (SPINDLE LOAD) e velocidade real do spindle (SPINDLE ACTUAL SPEED) como os fatores mais influentes. Os resultados validam quantitativamente o impacto das variações térmicas nos desvios dimensionais, demonstrando que flutuações de temperatura entre 21,5 °C e 29 °C podem resultar em expansões lineares de até 2,1 mm em peças de 12 metros, excedendo as tolerâncias exigidas. A modelação preditiva utilizando Random Forest alcançou exatidão de 94 % na previsão do comportamento térmico, demonstrando potencial para o desenvolvimento de estratégias de compensação em tempo real. Este trabalho contribui com uma metodologia para análise e modelação de erros térmicos, fornecendo resultados técnicos para a optimização de processos de maquinagem e o desenvolvimento de sistemas de controlo mais inteligentes, visando o aumento da precisão, a redução de desperdício e a optimização da manufatura de componentes aeronáuticos críticos.

Palavras-Chave: Maquinagem CNC, Controlo de Processos, Alumínio, Modelação Preditiva, Indústria 4.0, Compensação de Erros Térmicos.

Evaluation of the Impact of Temperature on the Dimensional Integrity of Parts Produced in CNC Machining Processes

Abstract

This master's project in Mechatronic Engineering investigates the mitigation of thermal errors in high-precision CNC machining processes, focusing on the production of aluminum alloy parts for the aerospace industry. The study addresses the complex interaction between process parameters, the thermal dynamics of both the machine tool and the workpiece, and their direct influence on final dimensional integrity. Using an experimental and analytical approach in collaboration with Aernnova, production data were collected and specific tests were conducted to characterize thermal behavior. Data analysis, supported by Python scripts and graphical visualizations, identified significant correlations between machine parameters and workpiece temperature, highlighting specific tools (such as T1, T6, T19, and T18) and parameters like spindle load (SPINDLE LOAD) and actual spindle speed (SPINDLE ACTUAL SPEED) as the most influential factors. The results quantitatively validate the impact of thermal variations on dimensional deviations, demonstrating that temperature fluctuations between 21.5°C and 29°C can result in linear expansions of up to 2.1 mm in 12-meter parts, exceeding the required tolerances. Predictive modeling using Random Forest achieved 94% accuracy in forecasting thermal behavior, demonstrating potential for developing real-time compensation strategies. This work contributes a methodology for analyzing and modeling thermal errors, providing technical results for optimizing machining processes and developing smarter control systems, aimed at increasing precision, reducing waste, and optimizing the manufacture of critical aerospace components.

Keywords

CNC Machining, Process Control, Aluminum, Predictive Modeling, Machine Learning, Industry 4.0, Thermal Error Compensation.

Aernnova Group confidential information. Limited use on a need-to-know basis. All rights reserved.

Índice

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract.....	ix
Índice de Tabelas.....	xiii
Índice de Figuras.....	xv
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	xvii
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento técnico.....	1
1.2 Empresa Aernnova.....	1
1.4 Descrição do produto em estudo.....	2
1.4 Introdução e objetivos do problema em estudo.....	2
1.6 Estrutura da Dissertação.....	3
2. Revisão bibliográfica.....	4
2.1 A Problemática da Dilatação Térmica em Componentes Aeronáuticos de Alumínio.....	4
2.2 Instrumentação e Metodologias Experimentais para o Estudo de Efeitos Térmicos.....	5
2.3 Mitigação de Erros Térmicos Através da Observação, Análise de Parâmetros e Otimização do Processo.....	6
2.4 Aplicações do Random Forest na Compensação de Erros Térmicos em Máquinas CNC.....	7
2.5 Avanços Recentes e Perspectivas Futuras.....	8
3. Modelo teórico dos Parâmetros da Máquina.....	9
3.4.1 <i>Motor Coil</i>	9
3.4.2 <i>Spindle Load</i>	9
3.4.3 <i>Spindle Command Speed</i>	10
3.4.4 <i>Spindle Actual Speed</i>	10
3.4.5 <i>Feed Speed</i>	10
3.4.6 <i>Feed Actual Speed</i>	11
3.4.7 <i>Feed Override</i>	11
3.4.8 <i>Vibration</i>	11
3.4.9 <i>Depth of Cut</i>	11
3.5.0 <i>Expansão Térmica e Deformações</i>	12
4. Ensaio Experimental.....	12
4.1 Equipamentos do Projeto.....	13
4.1.1. Termopar Tipo K.....	13
4.1.2. Sensor de Temperatura IR MLX90614.....	14
4.1.3. Módulo ESP32.....	15
4.1.4. Módulo ESP32 - CAM.....	16
4.2 Máquina CNC de Usinagem Horizontal.....	17
4.3 Alumínio série 7000.....	18
4.4 Descrição do Processo.....	19
4.4.1 Sensor IR MLX90614.....	19

4.4.2 Termopar K/J THE-343.....	21
4.4.3 Procedimentos.....	23
5 Resultados.....	28
5.1. Resultados.....	28
6 Conclusões e Trabalhos Futuros.....	36
6.1. Conclusões.....	36
6.2. Trabalhos futuros.....	37
Referências.....	39

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Características do Termopar modelo THE-343 K/J.....	14
Tabela 2 - Características principais do Sensor IR MLX90614.....	15
Tabela 3 - Especificações técnicas do Módulo ESP32	16
Tabela 4 - Especificações do ESP32-CAM.....	17
Tabela 5 - Resumo dos principais aspectos técnicos dos centros de maquinagem.....	17
Tabela 6 - Principais propriedades das ligas da série 7000.....	19

Índice de Figuras

Figura 1 - Longarina em processo de Maquinação.	2
Figura 2 - Termopar K/J THE-343.	13
Figura 3 - Sensor de temperatura IR Modelo MLX90614.	14
Figura 4 - Módulo ESP32 e Pinagem.	15
Figura 5 - Módulo do ESP32-CAM.	16
Figura 6 - Centro de maquinagem horizontal 5 eixos da Série A da Makino	18
Figura 7 - Diagrama do projeto para o sensor IR.	20
Figura 8 - Lateral do protótipo implementado.	20
Figura 9 - Parte frontal do protótipo implementado.	21
Figura 10 - Caixa com termopar, ESP32-CAM e Power Bank.	22
Figura 11 - Termopar posicionado no projeto.	22
Figura 12 - ESP32-CAM posicionado no projeto.	23
Figura 13 - Antena do ESP32-CAM e fios dos canais T1 e T2.	23
Figura 14 - Caixa do termopar e ESP32-CAM acoplados na máquina.	24
Figura 15 - Caixa do sensor de temperatura IR MLX90614 acoplado na máquina.	25
Figura 16 - Dashboard na plataforma do Arduino Cloud.	26
Figura 17 - Plataforma para visualização em vídeo do termopar.	26
Figura 18 - Interpolação da temperatura - Linear, Quadrática e Cúbica.	28
Figura 19 - Histograma do comportamento da temperatura.	29
Figura 20 - Evolução da Temperatura com indicação de SPINDLE PTN.	30
Figura 21 - Distribuição da Temperatura do Ferramental por SPINDLE PTN.	31
Figura 22 - Distribuição da Temperatura do Objeto por SPINDLE PTN.	31
Figura 23 - Scores Não Lineares (%) para os Parâmetros.	32
Figura 24 - Gráficos de Dispersão com LOWESS.	33
Figura 25 - Evolução Suavizada dos Parâmetros Operacionais.	34
Figura 26 - Predição In-Sample - Evolução Completa.	34
Figura 27 - Variação do Comprimento da Peça Usinada.	35

Aernnova Group confidential information. Limited use on a need-to-know basis. All rights reserved.

Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
RPM	Rotações por Minuto
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i>
ANOVA	Análise de Variância
DAQs	<i>Data Acquisition Systems</i>
CMMs	<i>Coordinate Measuring Machines</i>
LVDTs	<i>Linear Variable Differential Transformers</i>
TGA	Análise Termogravimétrica
FEA	<i>Finite Element Analysis</i>
AST3	<i>Antarctic Schmidt Telescope 3</i>
ASIC	<i>Application-Specific Integrated Circuit</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IR	<i>Infravermelho</i>

\

Aernnova Group confidential information. Limited use on a need-to-know basis. All rights reserved.

1. Introdução

1.1 Enquadramento técnico

O presente trabalho de projeto, desenvolvido no âmbito da Aernnova, observou a necessidade da indústria aeronáutica de optimizar continuamente os seus processos de fabrico para garantir a máxima precisão e eficiência. A maquinagem de componentes estruturais complexos, como os utilizados em aeronaves, enfrenta desafios significativos, nomeadamente aqueles induzidos por variações térmicas durante o processo de Controlo Numérico Computorizado (CNC). Estes desafios são particularmente críticos quando se trabalha com ligas de alumínio, material amplamente empregue no sector devido à sua favorável relação resistência-peso, mas que possui um coeficiente de dilatação térmica considerável. A integridade dimensional das peças maquinadas é um requisito inegociável na indústria aeronáutica, onde desvios mínimos podem comprometer a segurança e o desempenho das aeronaves. Este projeto visa, portanto, investigar o impacto da temperatura na precisão dimensional de peças de alumínio maquinadas em CNC e propor abordagens para mitigar os erros térmicos, contribuindo para a melhoria da qualidade e a redução de custos associados a retrabalho e desperdícios.

1.2 Empresa Aernnova

Aernnova é um referencial no sector aeronáutico e dedica a sua actividade ao design, fabrico e suporte de estruturas e componentes aeronáuticos. A empresa foi fundada em Espanha em 1993 e é conhecida mundialmente como líder em inovação e eficiência industrial, com foco em ser fornecedora de componentes para a indústria aeronáutica. A Aernnova fez um movimento estratégico importante em 2022 quando adquiriu duas fábricas em Évora, Portugal, que eram propriedade da Embraer. Esta aquisição representou um aumento impressionante na sua capacidade de produção, qualificando-a ainda mais como um importante fornecedor para diferentes aviões, como os modelos KC-390, E2-195 e E2-190 (EMBRAER, 2022; AERNNOVA, 2022).

As instalações em Évora empregam cerca de 500 trabalhadores qualificados, que são responsáveis pelo fabrico de componentes-chave, como painéis das asas, estabilizadores verticais e horizontais, longarinas para o programa E2, bem como asas para o projeto Praetor (AERNNOVA, 2022). Actualmente a serem fabricadas de acordo com os requisitos da Embraer, essas unidades também poderão oferecer serviços a outros fabricantes no sector da aviação e espaço, ajudando assim a impulsionar a base industrial do Alentejo.

1.4 Descrição do produto em estudo

O produto central neste estudo são longarinas de asa de grandes dimensões e elementos de fuselagem, fabricados em liga de alumínio por processo de maquinagem CNC. Estas peças estruturais têm a missão de absorver e transferir as cargas aerodinâmicas ao longo da envergadura, suportando tanto esforços estáticos como dinâmicos. A sua geometria interna é complexa, com cavidades aliviadas e reforços longitudinais, e exige tolerâncias de $\pm 0,8$ mm para encaixe preciso com nervuras e demais componentes da montagem estrutural.

Aernnova Group confidential information. Limited use on a need-to-know basis. All rights reserved.

Figura 1 – Longarina em processo de Maquinação

A peça apresentada na Figura 1, com 12 m maquinada em liga de alumínio 7050-T5471, foi apoiada num centro CNC horizontal de 5 eixos (Série A – Makino). Durante a fase 3 (desbaste e acabamento), a retirada de até 80 % do material bruto gera calor localizado que provoca gradientes térmicos ao longo da peça. Estas variações de temperatura podem induzir dilatações diferenciais e deformações geométricas que comprometem a precisão dimensional final.

1.4 Introdução e objetivos do problema em estudo

O problema central deste projeto de mestrado aborda os desvios dimensionais observados em peças de alumínio, que na sua maioria são de grandes dimensões, como as longarinas e outras peças aeronáuticas, que são induzidos pela dilatação térmica durante o processo de maquinagem por CNC. Estes desvios comprometem a

qualidade final do componente, podendo levar à sua não conformidade e, consequentemente, a custos elevados de retrabalho, além de potenciais atrasos na produção. A indústria aeronáutica, pela sua natureza, não admite falhas que possam comprometer a segurança, tornando imperativa a minimização destes erros dimensionais.

Neste contexto, o objectivo geral deste trabalho é avaliar o impacto da temperatura na integridade dimensional de peças de alumínio maquinadas em CNC e identificar estratégias para mitigar os erros térmicos associados.

Para alcançar este objectivo geral, foram definidos os seguintes objectivos específicos:

- Realizar um levantamento do estado da arte sobre os mecanismos de geração de calor na maquinagem CNC, os efeitos da temperatura na precisão dimensional de peças de alumínio e as metodologias existentes para o estudo e mitigação de erros térmicos.
- Recolher e analisar dados de temperatura e dimensionais durante o processo de maquinagem de peças representativas.
- Investigar a correlação entre as variações de temperatura, peças e parâmetros da máquina.
- Propor e discutir potenciais melhorias ou abordagens que possam contribuir para a redução da influência da temperatura no processo, com o objectivo de aumentar a precisão dimensional dos componentes maquinados.

1.6 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada nos seguintes capítulos: O Capítulo 1 introduz o tema, contextualiza o problema no âmbito da empresa Aernnova, define os objectivos e justifica a relevância do estudo. O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica detalhada sobre o estado da arte da maquinagem CNC de alumínio, com foco nos aspectos térmicos, erros dimensionais e estratégias de mitigação. O Capítulo 3 descreve de forma teórica os parâmetros mais influentes no processo de maquinagem CNC da peça em alumínio utilizada. O Capítulo 4 descreve a metodologia de investigação adoptada, incluindo a abordagem para recolha e análise de dados. Finalmente, o Capítulo 5 sumariza as principais conclusões do trabalho, aponta as limitações do estudo e sugere direcções para trabalhos futuros.

2. Revisão bibliográfica

A indústria aeronáutica impõe exigências extremamente rigorosas quanto à precisão dimensional e geométrica dos seus componentes, uma vez que pequenas variações podem comprometer a integridade estrutural, o desempenho e a segurança das aeronaves. As ligas de alumínio são amplamente utilizadas neste sector devido à sua excelente relação resistência-peso e boa usinabilidade. Contudo, a maquinagem por Controlo Numérico Computorizado (CNC) destes materiais, especialmente de peças complexas e de grandes dimensões, é intrinsecamente afetada por variações térmicas. O calor gerado durante o processo de corte, bem como o proveniente de fontes da própria máquina-ferramenta, induz a dilatação térmica do material e dos elementos da máquina, resultando em desvios dimensionais que podem exceder as tolerâncias especificadas. Este capítulo foca-se na problemática da dilatação térmica na maquinagem CNC de componentes aeronáuticos de alumínio, nos instrumentos e metodologias empregues para o seu estudo, e nas abordagens baseadas na observação do comportamento térmico e no ajuste de parâmetros de processo para mitigar estes erros.

2.1 A Problemática da Dilatação Térmica em Componentes Aeronáuticos de Alumínio

Componentes estruturais aeronáuticos, como longarinas, nervuras e painéis, são frequentemente fabricados a partir de blocos maciços de ligas de alumínio através de processos de maquinagem que removem grandes volumes de material. Durante estas operações, o calor gerado na zona de corte, devido à deformação plástica do material e ao atrito entre a ferramenta, a peça e o cavaco, pode ser substancial (Arslan & Çiçek, 2022). As ligas de alumínio, caracterizadas por um coeficiente de dilatação térmica relativamente elevado e alta condutividade térmica, são particularmente sensíveis a estas variações de temperatura. A rápida dissipação de calor pode levar a gradientes térmicos não uniformes na peça, causando distorções complexas e erros dimensionais que são difíceis de prever e controlar (Kuo et al., 2021). Em peças de grandes dimensões, como longarinas, mesmo pequenas variações de temperatura podem resultar em expansões lineares significativas, afetando a precisão de furos, rasgos e superfícies de acoplamento. Estes desvios podem levar à necessidade de retrabalho dispendioso, ao aumento das taxas de rejeição e, em última instância, a um impacto negativo nos custos e prazos de produção, além de potenciais implicações na montagem e funcionalidade da aeronave.

As fontes de calor numa máquina-ferramenta CNC não se limitam à zona de corte. O motor do fuso (spindle), os motores dos eixos, os rolamentos e as guias são também geradores de calor significativos que contribuem para a deformação térmica da estrutura da máquina (Li et al., 2021). Esta deformação da máquina-ferramenta sobrepõe-se à deformação da peça, tornando o erro térmico global um fenómeno complexo e multifatorial. A compreensão detalhada de como estas diferentes fontes de calor interagem e afetam a peça de alumínio em maquinagem é, portanto, crucial para o desenvolvimento de estratégias de mitigação eficazes.

2.2 Instrumentação e Metodologias Experimentais para o Estudo de Efeitos Térmicos

O estudo e a quantificação dos efeitos térmicos na maquinagem CNC exigem a utilização de instrumentação específica e metodologias experimentais rigorosas. A medição precisa da temperatura em diferentes pontos da máquina-ferramenta, da ferramenta e, crucialmente, da peça de trabalho é fundamental. Termopares são amplamente utilizados devido à sua robustez e versatilidade, podendo ser embutidos ou fixados em locais estratégicos para monitorizar a evolução da temperatura ao longo do tempo (Shi et al., 2023). Para medições de temperatura sem contacto, que são particularmente úteis para monitorizar a peça em rotação ou áreas de difícil acesso, são empregues pirómetros e câmaras de imagem térmica por infravermelhos (Kuo et al., 2021). Estas câmaras fornecem mapas de distribuição de temperatura da superfície, permitindo a visualização de gradientes térmicos e a identificação de pontos quentes.

Além da medição de temperatura, a quantificação dos desvios dimensionais e das deformações é essencial. Sensores de deslocamento, como LVDTs (Linear Variable Differential Transformers) e sondas de contacto, podem ser utilizados para medir as deformações da máquina-ferramenta ou da peça em condições controladas. Para a avaliação da precisão dimensional final das peças maquinadas, utilizam-se máquinas de medição por coordenadas (CMM) e outros equipamentos metrológicos. A aquisição de dados síncrona de múltiplos sensores é frequentemente realizada através de sistemas de aquisição de dados (DAQs) dedicados, permitindo a correlação entre as variáveis do processo e os erros térmicos observados.

Os estudos experimentais envolvem tipicamente a maquinagem de peças de teste sob diferentes condições de corte e estratégias de refrigeração. A observação sistemática do comportamento térmico e dos erros dimensionais resultantes permite identificar os parâmetros de processo mais influentes e desenvolver um entendimento

mais profundo dos mecanismos de erro térmico. A análise estatística dos dados recolhidos, como a análise de variância (ANOVA) e a regressão, é frequentemente utilizada para estabelecer relações quantitativas entre as variáveis.

2.3 Mitigação de Erros Térmicos Através da Observação, Análise de Parâmetros e Otimização do Processo

Com base na compreensão obtida através da monitorização e da análise experimental, diversas estratégias podem ser implementadas para mitigar os erros térmicos na maquinagem de componentes aeronáuticos de alumínio, focando na otimização dos parâmetros de processo e nas condições de maquinagem. Uma abordagem fundamental consiste na seleção criteriosa dos parâmetros de corte. Por exemplo, a redução da velocidade de corte ou da profundidade de corte pode diminuir a geração de calor na zona de corte, embora isso possa impactar a produtividade (Li et al., 2021). A otimização destes parâmetros, buscando um equilíbrio entre a precisão dimensional e a eficiência do processo, é um objetivo-chave.

A aplicação eficaz de fluidos de corte e refrigeração desempenha um papel vital na gestão térmica. A seleção do tipo de fluido, do método de aplicação e dos parâmetros de fluxo e pressão pode influenciar significativamente a remoção de calor da zona de corte e da peça, ajudando a estabilizar a temperatura e a reduzir as deformações (Arslan & Çiçek, 2022). Estudos experimentais são frequentemente conduzidos para determinar as estratégias de refrigeração mais eficazes para configurações específicas de maquinagem e materiais.

Outra abordagem envolve o desenvolvimento de ciclos de aquecimento da máquina-ferramenta antes do início da maquinagem de precisão. Ao permitir que a máquina atinja um estado térmico mais estável, é possível reduzir a magnitude das derivações térmicas durante o processo de corte. A observação do tempo necessário para a estabilização térmica, através da monitorização da temperatura em pontos-chave, informa a duração ótima destes ciclos de aquecimento. Adicionalmente, a análise do comportamento térmico da peça durante e após a maquinagem pode levar a estratégias como a introdução de tempos de espera para estabilização térmica antes de operações de acabamento ou medições finais (Zhu et al., 2021).

Em alguns casos, a modificação da sequência de operações de maquinagem ou da estratégia de fixação da peça pode ajudar a minimizar as distorções induzidas termicamente. Por exemplo, maquinar características críticas numa fase posterior do processo, quando a maior parte do volume de material já foi removida e a geração de

calor subsequente é menor, pode ser benéfico. A compreensão de como o calor se propaga na peça e como a rigidez da peça varia com a remoção de material, obtida através de simulação e experimentação, pode guiar estas decisões.

2.4 Aplicações do Random Forest na Compensação de Erros Térmicos em Máquinas CNC

Estudos recentes evidenciam a eficácia da técnica de Random Forest (RF) na modelagem e compensação de erros térmicos em máquinas CNC, especialmente em aplicações de alta precisão na indústria aeronáutica. Zhu et al. (2021) propuseram um modelo baseado em RF para prever o deslocamento térmico do fuso em uma máquina CNC de três eixos, atingindo uma exatidão superior a 95%. O modelo se mostrou mais robusto e exigiu menor volume de dados de treinamento do que redes neurais artificiais tradicionais, sendo especialmente eficaz em ambientes industriais sujeitos a ruídos e variações térmicas imprevisíveis (Zhu et al., 2021). Em uma continuidade desse trabalho, Zhu et al. (2023) desenvolveram um modelo aprimorado, incorporando efeitos de histerese térmica e seleção automática de variáveis com base na localização dos sensores. Os testes confirmaram a manutenção de uma exatidão superior a 90% mesmo sob diferentes condições operacionais, reforçando o desempenho consistente do RF para controle térmico em contextos produtivos (Zhu et al., 2023).

De modo semelhante, Chiu et al. (2021) avaliaram o desempenho do Random Forest na estimativa do erro térmico do spindle utilizando apenas quatro sensores de temperatura distribuídos estrategicamente. O modelo alcançou uma taxa de acertos de 90,5%, sendo comparado ao Gaussian Process Regression (GPR), que, embora também preciso, exigia maior complexidade e volume de dados. O estudo concluiu que a abordagem com RF, além de eficiente, oferece vantagens práticas em ambientes industriais reais, reduzindo a necessidade de instrumentação excessiva e facilitando a implementação (Chiu et al., 2021).

Outro exemplo relevante é o trabalho de Lian et al. (2022), que integraram a técnica de RF com o método LASSO para modelar os erros térmicos em uma máquina multitarefa operando nos modos de fresagem e torneamento. O modelo previu com precisão os desvios térmicos, com erros máximos de apenas 6,08 μm na fresagem e 1,45 μm no torneamento, valores compatíveis com as exigências de integridade dimensional da indústria aeroespacial. A combinação de RF com seleção automática de variáveis demonstrou-se eficaz para lidar com diferentes mecanismos térmicos nos

dois modos de operação, destacando sua versatilidade e desempenho em sistemas complexos (Lian et al., 2022).

Por fim, Lei et al. (2017) exploraram o uso do Random Forest Regression em um cenário com base de dados limitada e de baixa qualidade, comum em ambientes industriais com restrições de medição. O modelo foi comparado com técnicas como regressão linear multivariável e máquinas de vetor de suporte (SVR) otimizadas por algoritmos genéticos. Mesmo com essas limitações, o RF apresentou desempenho igual ou superior aos métodos concorrentes, especialmente na predição da inclinação térmica do fuso. Esses resultados demonstram a robustez do RF em condições adversas e sua aplicabilidade em processos produtivos onde a coleta extensiva de dados é inviável (Lei et al., 2017).

2.5 Avanços Recentes e Perspectivas Futuras

Componentes estruturais aeronáuticos, como longarinas, nervuras e painéis, são frequentemente fabricados a partir de blocos maciços de ligas de alumínio através de processos de maquinagem que removem grandes volumes de material. Durante estas operações, o calor gerado na zona de corte, devido à deformação plástica do material e ao atrito entre a ferramenta, a peça e o cavaco, pode ser substancial (Arslan & Çiçek, 2022). As ligas de alumínio, caracterizadas por um coeficiente de dilatação térmica relativamente elevado e alta condutividade térmica, são particularmente sensíveis a estas variações de temperatura. A rápida dissipação de calor pode levar a gradientes térmicos não uniformes na peça, causando distorções complexas e erros dimensionais que são difíceis de prever e controlar (Zhang et al., 2020). Em peças de grandes dimensões, como longarinas, mesmo pequenas variações de temperatura podem resultar em expansões lineares significativas, afetando a precisão de furos, rasgos e superfícies de acoplamento. Estes desvios podem levar à necessidade de retrabalho dispendioso, ao aumento das taxas de refugo e, em última instância, a um impacto negativo nos custos e prazos de produção, além de potenciais implicações na montagem e funcionalidade da aeronave.

As fontes de calor numa máquina-ferramenta CNC não se limitam à zona de corte. O motor do fuso (spindle), os motores dos eixos, os rolamentos e as guias são também geradores de calor significativos que contribuem para a deformação térmica da estrutura da máquina (LI et al., 2021). Esta deformação da máquina-ferramenta sobrepõe-se à deformação da peça, tornando o erro térmico global um fenómeno complexo e multifatorial. A compreensão detalhada de como estas diferentes fontes de

calor interagem e afetam a peça de alumínio em maquinagem é, portanto, crucial para o desenvolvimento de estratégias de mitigação eficazes.

3. Modelo teórico dos Parâmetros da Máquina

Neste capítulo, apresenta-se de forma teórica os parâmetros mais influentes no funcionamento de uma máquina CNC. Começou-se pela corrente na bobina do motor, que reflecte a conversão de energia eléctrica em binário, e seguiu-se com a carga do spindle, indicador percentual da solicitação mecânica sobre o eixo durante o corte. Em seguida, descrevem-se as velocidades programada e real do spindle e os avanços programado e real da ferramenta sob ajustes de override, assim como as leituras de vibração em RMS, que sinalizam instabilidades dinâmicas. Por fim, abordam-se a profundidade de corte, responsável pela espessura de material removido em cada passagem, encerrando na previsão do seu comportamento. Modelos que fornecem a base para a parte experimental e o desenvolvimento de modelos subsequentes.

3.1. Parâmetros da Máquina

3.4.1 Motor Coil

Numa máquina CNC, a bobina do motor (motor coil) é uma parte fundamental do sistema que converte energia eléctrica em energia mecânica. A corrente que circula através dessa bobina é um factor crucial que determina o desempenho do motor.

$$I = \frac{V}{R} ; \quad P_{el} = V \times I = IR^2 \quad (1)$$

I: Corrente na bobina, em A.

V: Tensão aplicada, em V.

R: Resistência da bobina, em Ω .

P_{el}: Potência elétrica dissipada, em W.

3.4.2 Spindle Load

A carga do spindle reflecte, em percentagem, a quantidade de corrente nominal utilizada pelo eixo durante o corte, funcionando como um indicador indireto do binário necessário e da carga mecânica sobre o motor e os rolamentos.

$$Spindle Load (\%) = \frac{T_{actual}}{T_{max}} \times 100 \quad (2)$$

T_{atual} : Corrente na bobina, em A.

T_{max} : Tensão aplicada, em V.

3.4.3 Spindle Command Speed

A velocidade programada do spindle determina a rotação desejada em rotações por minuto (RPM), considerando tanto a velocidade de corte pretendida como o diâmetro da ferramenta. Isto garante que a aresta cortante atinja uma velocidade periférica apropriada para cada material.

$$n_c = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D} \quad (3)$$

V_c : Velocidade de corte, em m/min.

D : Diâmetro da ferramenta, em mm.

3.4.4 Spindle Actual Speed

A verdadeira velocidade do spindle é influenciada pela aplicação de um override de velocidade, permitindo ajustes dinâmicos na rotação real para mais ou para menos, conforme as condições variáveis de carga e binário durante o corte.

$$n_{real} = n_c \times \frac{\text{Spindle Override (\%)} \times 100}{100} \quad (4)$$

Spindle Override (%): Ajuste percentual em tempo real.

3.4.5 Feed Speed

O avanço programado indica quantos milímetros por minuto (mm/min) a ferramenta se desloca, valor que depende do número total de arestas cortantes, do avanço por dente e das rotações do spindle. Esta métrica define também o volume de material removido por unidade de tempo.

$$v_f = Z \times f_z \times n_c \quad (5)$$

Z : Número de arestas da ferramenta.

f_z : Avanço por dente, em mm/dente.

n_c : RPM programado.

3.4.6 Feed Actual Speed

O avanço real ajusta-se pela aplicação de um override específico, permitindo alterações instantâneas ao avanço previamente estabelecido. Este mecanismo permite ao operador aumentar ou reduzir o volume de material removido consoante as condições da maquinagem.

$$v_{f_{real}} = v_f \times \frac{\text{Feed Override} (\%)}{100} \quad (6)$$

Feed Override (%): Ajuste manual percentual.

3.4.7 Feed Override

O feed override consiste num coeficiente adimensional que transforma a percentagem efectiva num factor multiplicador. Isto permite uma regulação contínua e precisa do avanço actual, sem necessidade de modificar a programação original da máquina.

$$\alpha_f = \frac{\text{Feed Override} (\%)}{100} \quad (7)$$

3.4.8 Vibration

As vibrações geradas são avaliadas através de medições eficazes (RMS) obtidas por sensores instalados. Estas leituras reflectem a energia vibratória no sistema e podem indicar instabilidades dinâmicas com impacto negativo no acabamento superficial e na durabilidade das ferramentas.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2} \quad (8)$$

v_i : Leituras instantâneas de vibração.

3.4.9 Depth of Cut

A profundidade definida representa a espessura retirada em cada passagem da ferramenta, dependendo directamente das variações entre os diâmetros sucessivos nas operações sequenciais. Este parâmetro é essencial para calcular as forças de corte e a transferência térmica na zona de maquinagem.

$$\alpha_e = \frac{\Delta D}{2} ; \quad V_c = \frac{\pi \times D_{cut} \times n}{1000} \quad (9)$$

ΔD : Variação de diâmetro entre passes, em mm.

D_{cut} : Diâmetro efetivo de corte, em mm.

n : RPM real.

3.5.0 *Expansão Térmica e Deformações*

A expansão térmica de um material metálico é diretamente proporcional ao seu coeficiente de expansão linear (α), que quantifica a variação relativa de comprimento por grau de temperatura. Nas ligas de alumínio da série 7000, amplamente utilizadas em estruturas aeronáuticas de alta resistência, α situa-se entre $22,0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e $24,0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (ASM International, 2018). Este valor, embora pequeno, traduz-se em deslocamentos significativos em componentes de grandes dimensões.

A deformação térmica uniaxial é descrita pela expressão:

$$\Delta L = \alpha \times L_0 \times \Delta T \quad (10)$$

Em que:

L_0 : Comprimento inicial.

ΔT : Variação de temperatura absoluta.

ΔL : Variação do comprimento (positiva para aquecimento, negativa para arrefecimento).

4. Ensaio Experimental

No capítulo 4, Ensaio Experimental, apresentam-se de forma integrada os dispositivos, materiais e procedimentos utilizados para avaliar o comportamento térmico durante a maquinagem. Primeiramente, descreveu-se os sensores termopar Tipo K modelo THE-343 e infravermelho MLX90614, os seus princípios de

funcionamento, gamas de medição e ligação aos módulos ESP32 e ESP32-CAM para o condicionamento de sinal, transmissão de dados e captura de imagens em tempo real. De seguida, é apresentado a máquina CNC Makino série A, destacando a sua capacidade de alta velocidade e estabilidade na maquinagem de peças de grandes dimensões, e detalhou-se o uso de ligas de alumínio da série 7000 com as suas propriedades térmicas de condutividade, difusividade e coeficiente de dilatação adequadas a ambientes severos. Posteriormente, explica-se como posicionaram-se os sensores na peça de alumínio, garantindo medições fiáveis na presença de apara e vibrações. Por fim, descreve-se o fluxo de recolha e unificação dos dados de temperatura e dos parâmetros de maquinagem, bem como o tratamento e análise em Python para extração de insights e suporte à modelação.

4.1 Equipamentos do Projeto

4.1.1. Termopar Tipo K

O termopar Tipo K é um sensor de temperatura amplamente utilizado na indústria, capaz de medir temperaturas muito baixas (-200°C) até extremamente elevadas (+1370°C). Funciona com dois fios metálicos diferentes (um de liga níquel-crómio e outro de níquel-alumínio), que geram uma pequena tensão elétrica quando sujeitos a variações de calor. Este princípio, conhecido como efeito Seebeck, permite converter alterações de temperatura em sinais elétricos, os quais são então interpretados por equipamentos de medição.

Figura 2 - Termopar modelo THE-343 K/J.



Fonte: TEKCOPLUS (2024).

Na Figura 2, observa-se um modelo específico deste sensor (THE-343, da APO GOLD), que possui duas entradas de medição (T1 e T2). Isto permite comparar temperaturas em dois pontos diferentes (na superfície da peça e da ferramenta) ou

ajustar a calibração do equipamento (funções ADJ-0 e ADJ-Low). O dispositivo também regista temperaturas máximas e mínimas (MAX/MIN) e mantém leituras em tempo real (HOLD), características úteis para monitorizar processos industriais contínuos, como a maquinagem de peças ou o controlo de motores. A Tabela 1 sintetiza as especificações técnicas do dispositivo:

Tabela 1 - Características do Termopar modelo THE-343 K/J

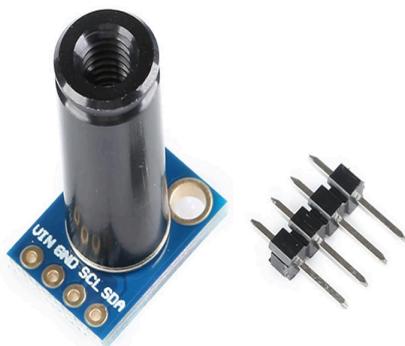
Características	Detalhes
Faixa de temperatura	-200°C a +1372°C
Exatidão	1,5°C
Aplicações	Usinagem, fornos, motores

A exatidão de 1,5°C é garantida por circuitos internos que filtram interferências e compensam erros causados por variações ambientais. Esta fiabilidade permite o uso em aplicações críticas, como o controlo de temperaturas em fundições, na otimização de processos siderúrgicos ou na maquinagem, como neste projeto. A sua instalação simples e resistência a condições adversas (como vibrações ou altas temperaturas) explicam a sua popularidade em ambientes industriais (MUNDO DA ELÉTRICA, 2022).

4.1.2. Sensor de Temperatura IR MLX90614

O sensor infravermelho MLX90614 (Melexis) é um transdutor óptico de medição térmica sem contacto, operando com base na radiação térmica emitida pelos objetos. A sua tecnologia baseia-se na deteção de comprimentos de onda no espectro infravermelho (5 μm a 14 μm), convertendo-os em valores de temperatura com uma exatidão de 0,5°C. É amplamente adotado em aplicações que exigem segurança operacional, destacando-se pela gama termométrica alargada (-70°C a +380°C) e integração simplificada com sistemas microcontrolados (ARDUINO; RASPBERRY PI, 2023).

Figura 3 - Sensor de Temperatura IR Modelo MLX90614



Conforme ilustrado na Figura 3, o sensor possui encapsulamento compacto (17 mm × 11,5 mm), com lente óptica otimizada para captação focada. A interface de comunicação dupla (I2C e PWM) permite compatibilidade com plataformas embarcadas, enquanto a calibração de fábrica assegura precisão metrológica imediata, de acordo com normas internacionais (ISO 80601-2-56, 2017). A Tabela 2 resume os parâmetros técnicos críticos do MLX90614:

Tabela 2 - Características principais do Sensor IR MLX90614.

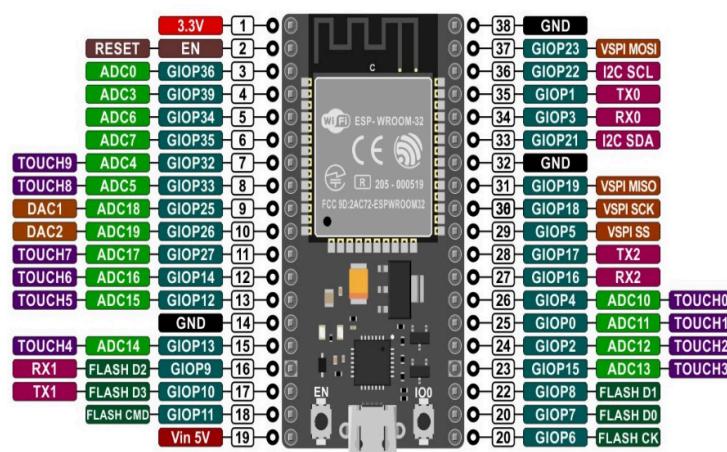
Características	Detalhes
Faixa de temperatura	-70°C a +380°C
Exatidão	0,5°C
Modo de medição	Remoto

O princípio físico que sustenta este sensor é a lei de Stefan-Boltzmann, que estabelece uma relação entre a radiação emitida por um corpo e a sua temperatura absoluta. O MLX90614 utiliza uma termopilha, um conjunto de termopares em série, para captar a energia radiante. Essa energia é processada por um circuito ASIC especialmente projetado para esta função. A compensação automática da temperatura ambiente é feita por um sensor integrado, o que garante medições fiáveis da temperatura do objeto, independentemente das condições externas (MELEXIS, 2021).

4.1.3. Módulo ESP32

O módulo ESP32 (Espressif Systems) é um sistema integrado (System-on-a-Chip) projetado para aplicações de IoT e automação industrial, com processamento (dual-core de 240 MHz) e conectividade (Wi-Fi 2,4 GHz e Bluetooth BLE). Conforme ilustrado na Figura 4, seu encapsulamento compacto (25 mm × 18 mm) permite integração em placas de prototipagem, como a ESP32-DevKitC, com 34 portas GPIO para interface com sensores analógicos e digitais (ESPRESSIF, 2023).

Figura 4 - Módulo ESP32 e Pinagem.



A Tabela 3, possui as especificações técnicas do dispositivo, detalhadas:

Tabela 3 - Especificações técnicas do Módulo ESP32

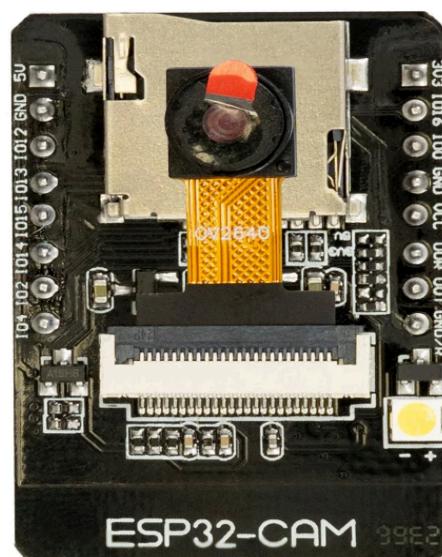
Características	Detalhes
Processamento	Dois núcleos de até 240 MHz
Memória	520 KB SRAM / 4 MB Flash
Comunicação	Wi-Fi, Bluetooth, I ² C
Portas GPIO	34 (12 bits ADC, 8 bits DAC)

Na configuração deste estudo, o módulo foi integrado ao sensor IR MLX90614, responsável por medir temperaturas sem contacto, e programado para transmitir os dados à Arduino Cloud. O sensor, ligado via protocolo I²C, envia leituras de temperatura ambiente e do objeto ao ESP32, que as processa e as transmite para a nuvem por ligação Wi-Fi. A comunicação com a Arduino Cloud permite configurar um dashboard para visualizar em tempo real os dados recolhidos.

4.1.4. Módulo ESP32 - CAM

O módulo ESP32-CAM (Espressif Systems) foi utilizado neste estudo para transmitir simultaneamente dados de temperatura do termopar Tipo K e imagens do visor do instrumento, permitindo monitorização remota integrada. Conforme ilustrado na Figura 5, que mostra a disposição física do sistema, o módulo foi posicionado estratégicamente para captar a interface do termopar com a sua câmara OV2640 (2 MP), enquanto o sinal analógico do sensor era condicionado por um amplificador AD8495 e lido via pino GPIO 33 (ADC de 12 bits).

Figura 5 - Módulo do ESP32-CAM.



As especificações técnicas do dispositivo, detalhadas na Tabela 4, incluem um processador single-core de 160 MHz, 4 MB de memória flash e consumo de 100 mA em funcionamento contínuo, características que viabilizaram a transmissão estável de dados e imagens para a Arduino Cloud via Wi-Fi 2,4 GHz.

Tabela 4 - Especificações do ESP32-CAM

Características	Detalhes
Processamento	Single-core Xtensa® LX6 (160 MHz)
Memória	520 KB SRAM / 4 MB Flash
Comunicação	Wi-Fi 802.11 b/g/n
Portas GPIO	9 (4 dedicadas à câmera)
Resolução da câmera	1600×1200 (máx.)/800×600 (operacional)

4.2 Máquina CNC de Usinagem Horizontal

A Makino introduziu a série A de centros de maquinagem horizontais 5 eixos, concebidos especificamente para maquinagem de alta velocidade e eficiência de componentes aeronáuticos de grande porte e paredes finas, como longarinas, painéis de asas e vigas de piso. A família inclui os modelos A4, A8, A12 e A20, dimensionados para peças de 4 a 20 metros. Equipados com fuso HSK-F80 de 33 000 rpm e potência de 107 hp (80 kW), estes centros atingem taxas de remoção de cavacos de até 5 600 cm³/min, otimizados para alumínio aeronáutico. A arquitetura combina motores lineares (aceleração de 0,8 G no eixo X) e coluna com design FEA (leve e rígida), garantindo estabilidade em movimentos rápidos (Makino, 2023).

Tabela 5 - Resumo dos principais aspectos técnicos dos centros de maquinagem.

Aspectos	Especificações
Modelos	A4, A8, A12, A20
Comprimento de Peças	4 m a 20 m
Velocidade do Spindle	33.000 rpm
Potência do Spindle (padrão)	107 hp (80 kW)
Taxa de Remoção de Cavacos	Até 5.600 cm ³ /min
Tecnologia AST3	Monitoramento e ajuste automático para segurança e eficiência
Opção de Spindle	120 kW, com 50% mais potência e refrigeração pelo spindle

A versatilidade da série é reforçada pelo sistema AST3 (Autonomic Spindle Technology), que monitoriza cargas no fuso e ajusta avanços para evitar danos, além

de permitir a maquinagem 3D precisa através de compensação térmica dinâmica. O fuso opcional de 120 kW, com refrigeração interna, melhora a evacuação de cavacos e prolonga a vida útil das ferramentas, essencial para peças complexas. A Figura 6 apresenta um dos modelos da Série A, evidenciando a sua estrutura e os acessos para operação.

Figura 6 - Centro de maquinagem horizontal 5 eixos da Série A da Makino.



Fonte - Makino (2023)

4.3 Alumínio série 7000

As ligas de alumínio da série 7000, com zinco (Zn) e magnésio (Mg) como principais elementos de liga, destacam-se na indústria aeronáutica pela sua excepcional resistência mecânica e capacidade de suportar cargas críticas. A liga 7075-T6, por exemplo, apresenta resistência à tração de 572 MPa e limite de escoamento de 500 MPa, valores superiores aos de outras séries, como a 2000 (Al-Cu), tornando-a ideal para componentes como longarinas, revestimentos de asas e estruturas de fixação (ASM INTERNATIONAL, 2022). Estas propriedades são conseguidas através de tratamentos térmicos de precipitação (T6), que promovem a formação de fases intermetálicas ($MgZn_2$), responsáveis pelo endurecimento do material (POLMEAR et al., 2017).

A série 7000 apresenta densidade entre 2,6 – 2,8 g/cm³, condutividade térmica de 130 – 180 W/m·K e coeficiente de expansão térmica na faixa de $23,0 - 24,0 \times 10^{-6}$ °C⁻¹, características que garantem estabilidade dimensional sob variações térmicas severas (MATWEB, 2024). A liga 7050, por exemplo, é amplamente utilizada em

secções espessas de aeronaves devido à sua combinação de resistência à fadiga (\approx 240 MPa) e tenacidade à fratura (\approx 30 MPa· $\sqrt{\text{m}}$), mesmo em ambientes corrosivos (HEINZ; SCHEIB, 2023). Já a 7049 se destaca pela resistência à corrosão sob tensão, com condutividade térmica de 130 – 150 W/m·K, ideal para engrenagens de trem de aterrissagem e componentes de motores (MACHINEMFG, 2024).

Apesar da elevada resistência mecânica, as ligas da série 7000 apresentam menor resistência à corrosão comparativamente a outras séries, especialmente em ambientes húmidos ou salinos. Para mitigar este problema, técnicas como anodização e revestimentos à base de cromatos são empregues em componentes de fuselagem e asas (VARGEL, 2020). Além disso, a soldabilidade limitada obriga ao uso de métodos alternativos de união, como rebitagem ou parafusos estruturais, em montagens aeronáuticas (HIRSCH, 2018). A tabela 6 a seguir demonstra as principais propriedades das ligas da série 7000:

Tabela 6 - Principais propriedades das ligas da série 7000.

Propriedade	Valor Típico	Unidade
Teor de Cobre (Cu)	5,6 – 8,0	%
Teor de Magnésio (Mg)	2,1 – 2,7	%
Teor de Manganês (Mn)	1,2 – 2,3	%
Resistência à Tração	515 – 750	MPa
Limite de Escoamento	455 – 700	MPa
Alongamento	10 – 15	%
Densidade	2,6 – 2,8	g/cm ³
Coeficiente de Expansão Térmica	23,0 – 24,0	$\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
Condutividade Térmica	130 – 180	W/m·K
Resistência à Corrosão	Moderada - Baixa	-
Temperatura Máxima de Serviço	Até 150	°C

4.4 Descrição do Processo

4.4.1 Sensor IR MLX90614

O projecto do arranjo experimental com o sensor infravermelho (IR) diferiu daquele adotado para o termopar, tendo como principal objectivo permitir o bom funcionamento do sensor sem interferências externas, como as partículas de alumínio provenientes da maquinagem, que poderiam afectar as medições térmicas. Assim, foi desenvolvido um sistema capaz de realizar a aquisição de dados da temperatura da peça usinada, bem como possibilitar a inspeção visual em caso de detecção de anomalias operacionais. Neste contexto, seleccionou-se uma caixa de acrílico de dimensões reduzidas como suporte estrutural para a montagem do microcontrolador ESP32, alimentado por um power bank de 5 000 mA, e dos condutores tipo jumper

que interligam eletricamente o sensor IR ao módulo de processamento, conforme ilustrado no diagrama esquemático a seguir:

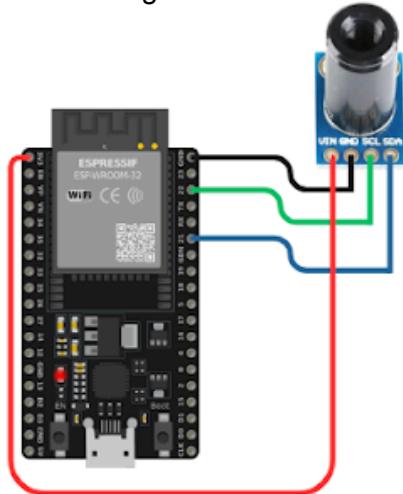


Figura 7 - Diagrama do projeto para o Sensor IR

Paralelamente, foi incorporado um sensor de temperatura e humidade DHT22 para quantificar a temperatura ambiente interna da máquina. Contudo, os resultados obtidos durante as fases preliminares de validação revelaram que a resolução temporal e a precisão do DHT22 não satisfaziam os requisitos metrológicos estipulados, apresentando leituras com desvio-padrão incompatível com os limites de erro definidos pelo projecto. Em virtude dessas constatações, optou-se pela remoção do DHT22 nas etapas experimentais subsequentes. As Figuras 8 e 9 apresentam a configuração final do protótipo implementado:

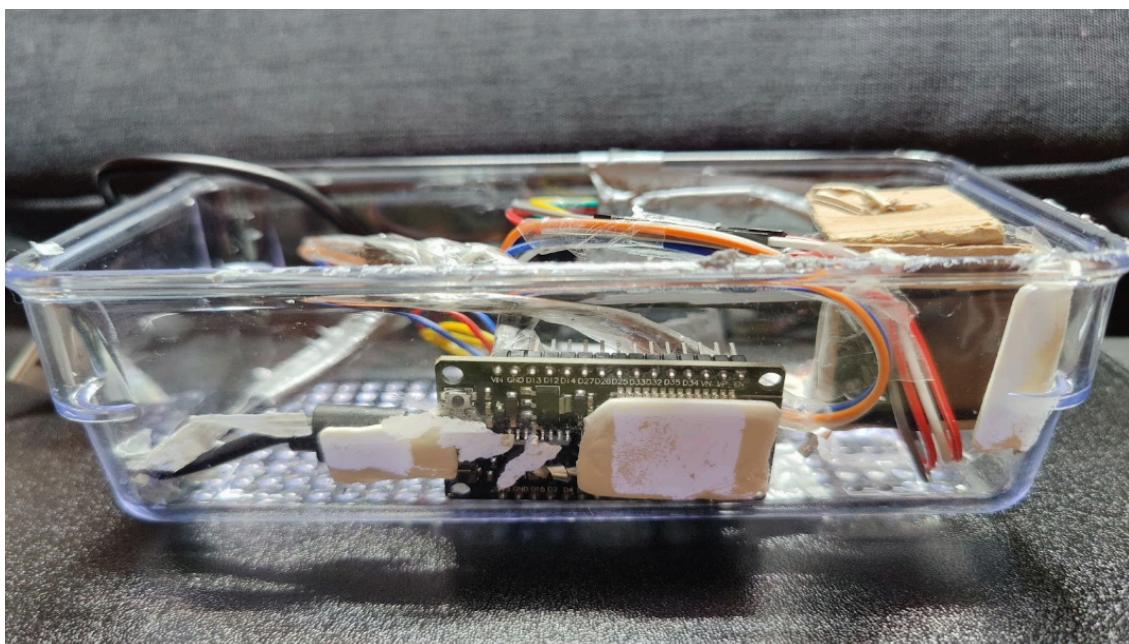


Figura 8 – Lateral do protótipo implementado

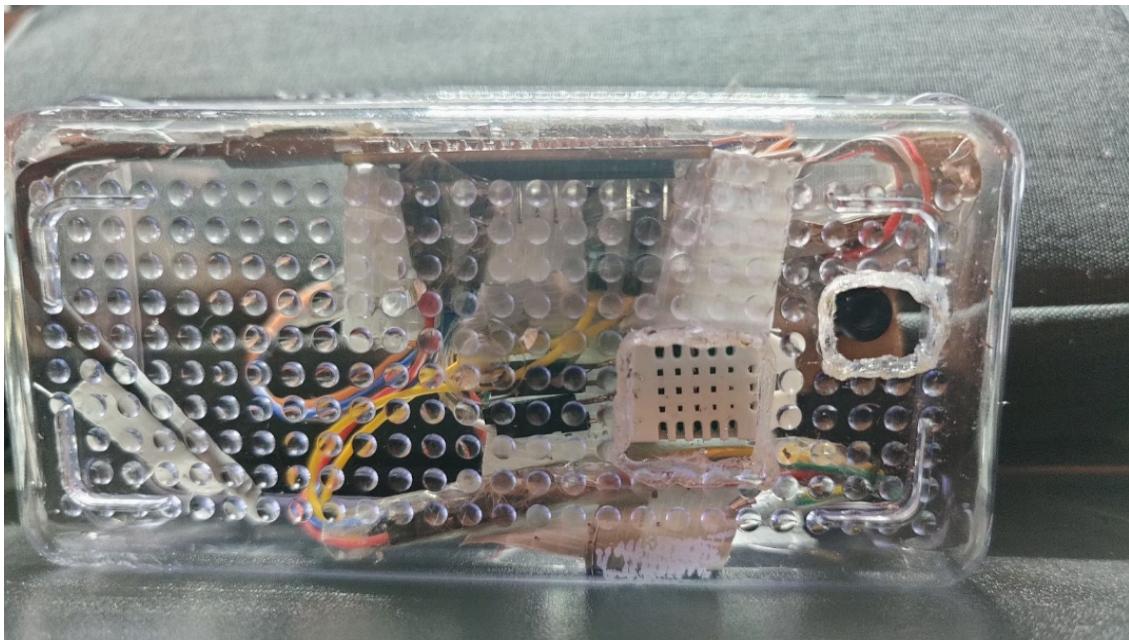


Figura 9 – Parte Frontal do protótipo implementado

Um outro ponto importante do projecto foi a aplicação de camadas de fita cola para reforçar a protecção do sistema. Além disso, foi adicionado um tubo, conforme mostra a Figura 9, que protegia o sensor de possíveis fragmentos de alumínio resultantes da maquinagem, evitando que entrassem no sensor e alterassem a medição.

4.4.2 Termopar K/J THE-343

No projecto com termopar, o sensor foi concebido com objectivo semelhante ao do sensor IR. Ao contrário do sensor infravermelho, o termopar possui dois canais (T1 e T2) que requerem contacto directo com a peça para medir a temperatura. Esta característica facilitou o isolamento do sensor e do ESP32-CAM dentro de uma caixa de acrílico, de modo que apenas os cabos dos canais e a antena ficassem do lado de fora. No interior da caixa, posicionaram-se o termopar e, como não era possível ler os valores sem acesso físico ao ecrã, acrescentou-se o ESP32-CAM em frente ao visor do sensor, transmitindo em tempo real as imagens da temperatura. Para alimentar o módulo, utilizou-se um power bank de 5 000 mAh, garantindo autonomia durante todo o processo, e instalou-se uma antena externa no ESP32-CAM como medida de segurança contra eventuais perdas de sinal. Foi possível aceder a essas imagens através de um servidor web numa plataforma que permitia configurar a captura e efectuar o download quando necessário. Desta forma, recolheram-se todos os dados de temperatura ao longo do processo de maquinagem. O resultado pode ser observado nas figuras seguintes:

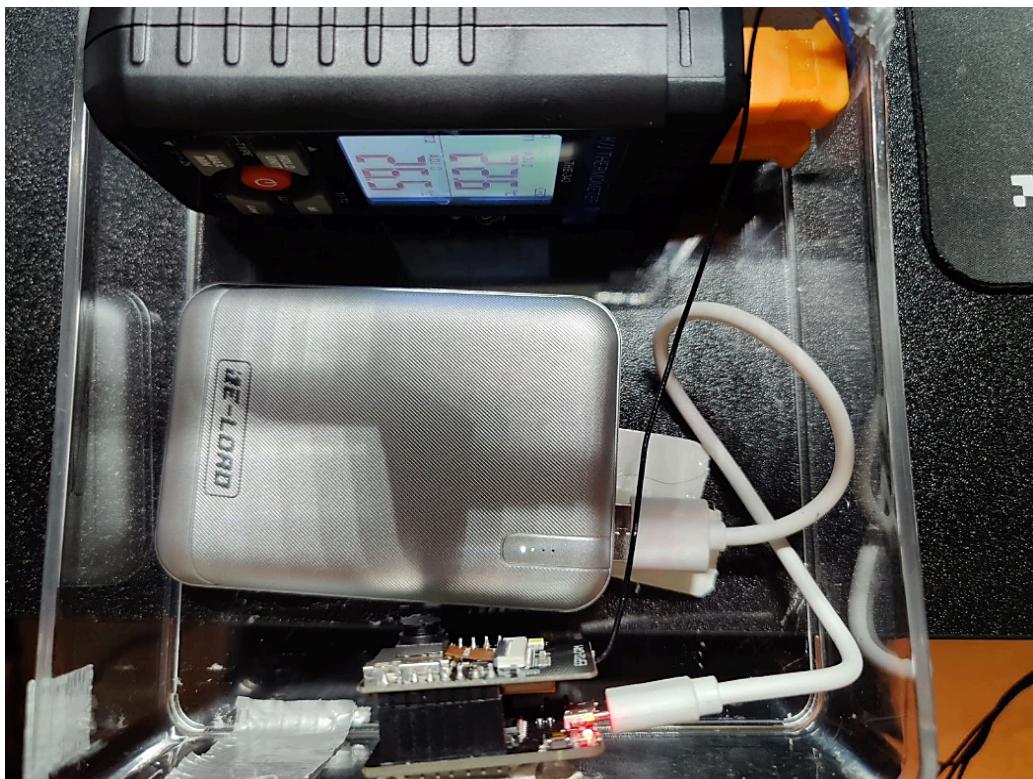


Figura 10 - Caixa com Termopar, ESP32-CAM e Power Bank.



Figura 11 - Termopar posicionado no projeto.

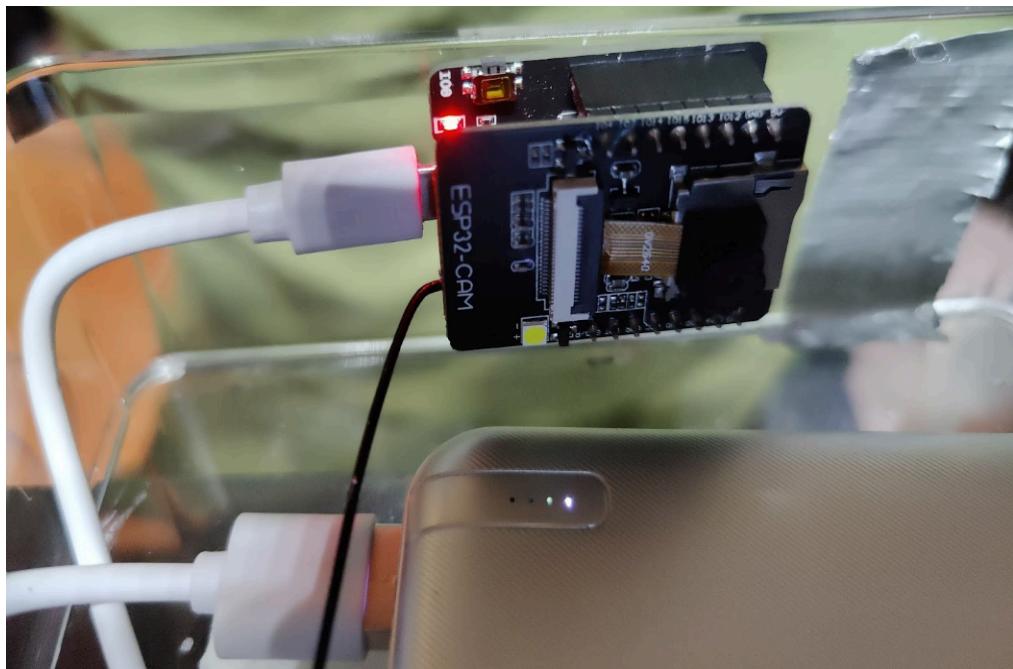


Figura 12 - ESP32-CAM posicionado no projeto.

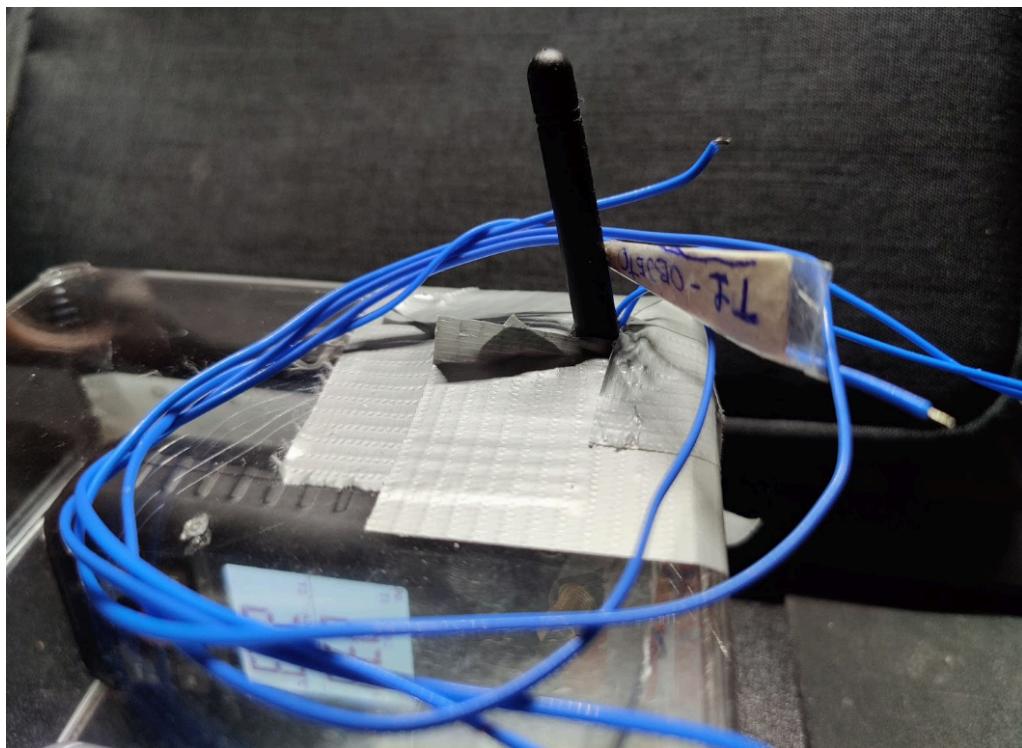


Figura 13 - Antena do ESP32-CAM e fios dos canais T1 e T2.

4.4.3 Procedimentos

Tendo em conta que, segundo a Aernnova, peças com maiores dimensões são mais afetadas pela dilatação térmica, o que potencia erros

dimensionais, para o ensaio escolheu-se uma peça propositadamente suscetível a esses problemas. Assim, optou-se por uma peça de 12 metros de comprimento, considerando a sua sensibilidade térmica e o historial de deformações em processos anteriores. Outro factor importante na escolha da peça foi verificar se se encontrava no início do processo de maquinagem, para que se pudesse registar o comportamento desde a fase inicial. A numeração da peça escolhida foi PN1, a qual foi maquinada na máquina Makino A20#1, com capacidade para peças de até 20 metros. Concluída a escolha da peça, o passo seguinte foi conceber uma forma de fixar os sensores de modo a obter o comportamento da temperatura na peça em tempo real.

Assim que a peça entrou na máquina, verificou-se que, conforme referido anteriormente, a melhor zona para fixação seria na extremidade da peça, pela proximidade à porta da máquina, facilitando intervenções rápidas. Utilizando fita cola 3M, fixou-se a caixa de acrílico contendo o termopar e os seus componentes auxiliares. Uma vez fixada, posicionaram-se os cabos que transmitiriam os valores da temperatura para o termopar: um cabo na superfície da ferramenta e outro na superfície da base da peça, evitando assim que o motor da máquina danificasse o termopar ou os cabos. Conforme se pode ver na Figura 14:

Figura 14 - Caixa do Termopar e ESP32-CAM acoplados na máquina



Para o sensor IR, adotou-se uma abordagem diferente, tendo em conta as suas características. Como não requer contacto directo, pensou-se colocá-lo o mais próximo possível da peça, mas sem risco de ser atingido pelo motor ou de receber detritos de alumínio que prejudicassem a medição. Desta forma, escolheu-se um espaço no ferramental, lateral à peça, sem risco de colisão com a máquina e numa posição livre de aparas de alumínio usinado, e fixou-se também com fita cola 3M. A estrutura do sensor estava alojada numa caixa de acrílico reforçada com fita cola para maior resistência, conforme mostra a Figura 15:



Figura 15 - Caixa do Sensor de Temperatura IR MLX90614 Acoplados na Máquina.

Por fim, confirmou-se que tudo estava devidamente instalado e a funcionar conforme o planeado. Abriu-se o dashboard na Arduino Cloud, que recebia em tempo real as temperaturas captadas pelo sensor IR, e verificou-se a página do ESP32-CAM que transmitia o vídeo em tempo real do termopar, permitindo acompanhar cada minuto de operação sem interrupções. Ambos os sistemas estavam a funcionar corretamente. Assim, de cinco em cinco minutos, eram recolhidos os dados térmicos pelas duas plataformas e introduzidos numa folha de cálculo em Excel, criada para registar os dados, ao mesmo tempo que as condições da máquina eram registadas pela própria CNC. Abaixo podem observar-se as duas plataformas utilizadas no processo:

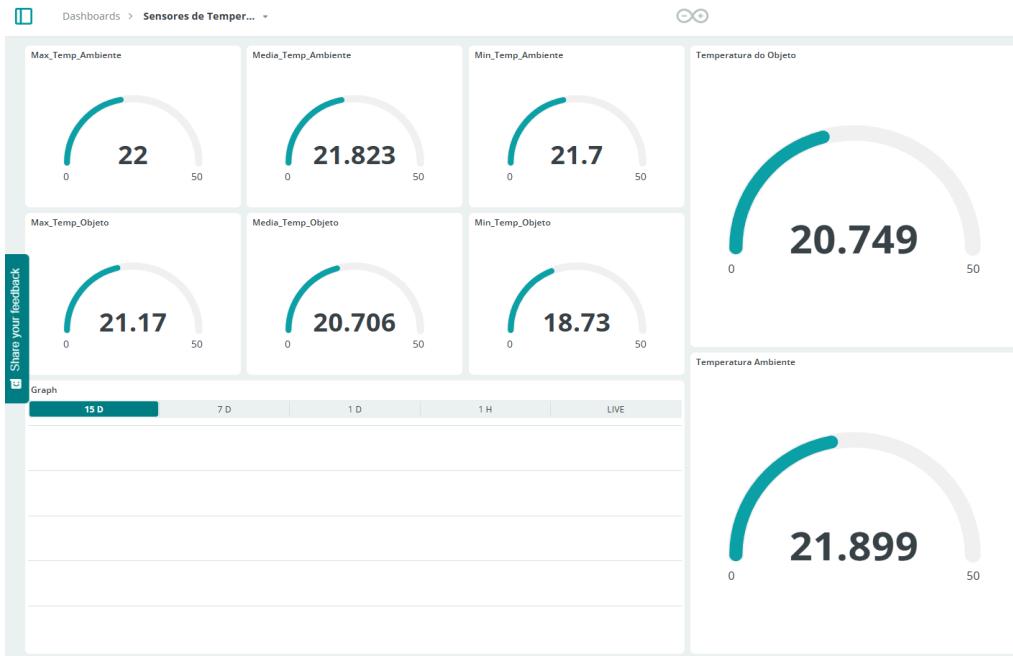


Figura 16 – Dashboard na plataforma do Arduino Cloud

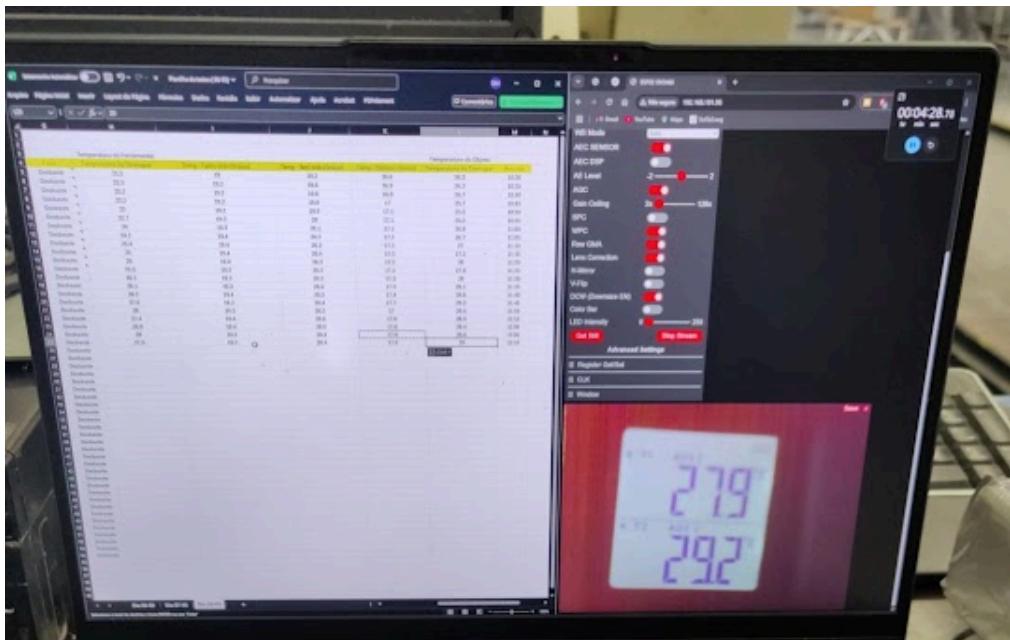


Figura 17 - Plataforma para Visualização em Vídeo do termopar

4.4.4 Registro e Tratamento dos dados

Os dados foram recolhidos num ambiente real de maquinagem, utilizando dois sensores: um termopar (com um canal dedicado à peça usinada e outro ao ferramental) e um sensor de infravermelhos apontado para a superfície da peça. Para

auxiliar na aquisição dos dados dos sensores, utilizou-se um microcontrolador ESP32 que, via servidor web interno, enviava as leituras dos dois sensores. No caso do sensor IR, as leituras eram armazenadas na Arduino Cloud, conforme ilustrado na Figura 16, para visualização no dashboard. Já o ESP32-CAM transmitia a imagem do ecrã do termopar, com os valores em tempo real, para um servidor local.

No final do ensaio, as medições de temperatura da peça e do ferramental foram devidamente recolhidas e organizadas numa folha de cálculo que continha aproximadamente 400 registos ao longo de 8 horas de operação. Essa base de dados foi cuidadosamente revista para assegurar que não existissem marcas de tempo duplicadas ou em falta, e todos os valores numéricos e colunas de texto foram padronizados.

Em complemento, solicitaram-se à Aernnova os dados dos parâmetros da máquina utilizados nesse mesmo turno. O ficheiro incluía inúmeras variáveis, tendo sido efetuada uma filtragem para analisar apenas aquelas com maior grau de importância, de forma a evitar erros e otimizar os cálculos. Assim, obtiveram-se as variáveis operacionais mais relevantes: corrente do motor (MOTOR COIL), nível de vibração (VIBRATION), carga do spindle (SPINDLE LOAD), velocidade real do spindle (SPINDLE ACTUAL SPEED), velocidade de avanço programada (FEED SPEED), override de avanço (FEED OVERRIDE), velocidade real de avanço (FEED ACTUAL SPEED) e profundidade de corte (DI_CUT). Após a obtenção das duas folhas de cálculo, iniciou-se o processo de unificação num único ficheiro que relaciona cada registo de temperatura ao vetor completo de parâmetros de maquinagem nesse instante. Para tal, as séries temporais de 5 em 5 minutos (temperatura) e as de frequência variável (parâmetros da máquina) foram padronizadas e alinhadas por minuto. A folha resultante contém cerca de 200 linhas e mais de 25 colunas.

Para organizar e reproduzir todo este fluxo de trabalho, desenvolveu-se um script em Python que integra a leitura e padronização das folhas de cálculo, usando a biblioteca pandas, criando novas variáveis temporais (médias móveis, atrasos) e aplicando diferentes métodos de interpolação (linear, quadrática e cúbica via scipy). De seguida, o mesmo programa estima a Mutual Information e a Distance Correlation das variáveis, ajusta modelos in-sample (OLS, ARIMAX e Random Forest) e gera automaticamente gráficos de correlação, curvas de interpolação, dispersões com suavização LOWESS e previsões comparativas. Este pipeline totalmente documentado assegura reprodutibilidade, agilidade na experimentação de novos parâmetros e consistência entre todas as etapas de pré-processamento e análise.

5 Resultados

Neste capítulo, apresentam-se e discutem-se os principais resultados obtidos ao longo do projeto, com base nas análises estatísticas, nos gráficos gerados e na interpretação dos comportamentos térmicos observados.

5.1. Resultados

O presente estudo dedicou-se à avaliação do impacto da temperatura na integridade dimensional de peças em alumínio – no caso da peça-teste, que era de liga 7050-T5471, usinada em centros de Controlo Numérico Computorizado (CNC). O objetivo primordial foi identificar fatores ou parâmetros que pudessem estar a afetar a precisão dimensional das peças, abordado através de uma investigação multifacetada em colaboração com a Aernnova. A análise dos dados experimentais recolhidos e processados com o auxílio do programa Python forneceu a base para as conclusões aqui apresentadas.

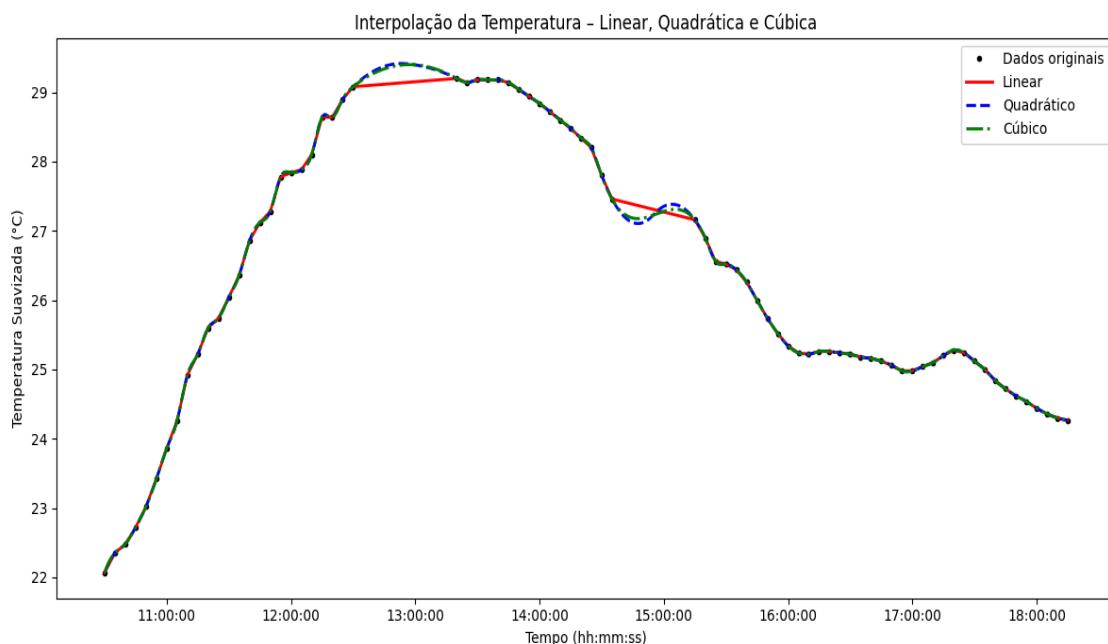


Figura 18 - Interpolação da Temperatura - Linear, Quadrática e Cúbica

A compreensão da dinâmica da temperatura da peça foi um ponto de partida crucial. A visualização da interpolação da temperatura (linear, quadrática e cúbica) na Figura 18 foi essencial para esse fim. Este gráfico compara diferentes métodos de interpolação aplicados à série temporal de temperatura. Observou-se que as interpolações quadrática e cúbica apresentam representações mais suaves e

contínuas da evolução térmica. Essa escolha metodológica permitiu obter uma representação mais fiel do comportamento da temperatura ao longo de todo o ciclo de trabalho da máquina, revelando curvas e pormenores que não seriam captados apenas pelos dados crus. Isso é fundamental para a compreensão inicial dos erros térmicos.

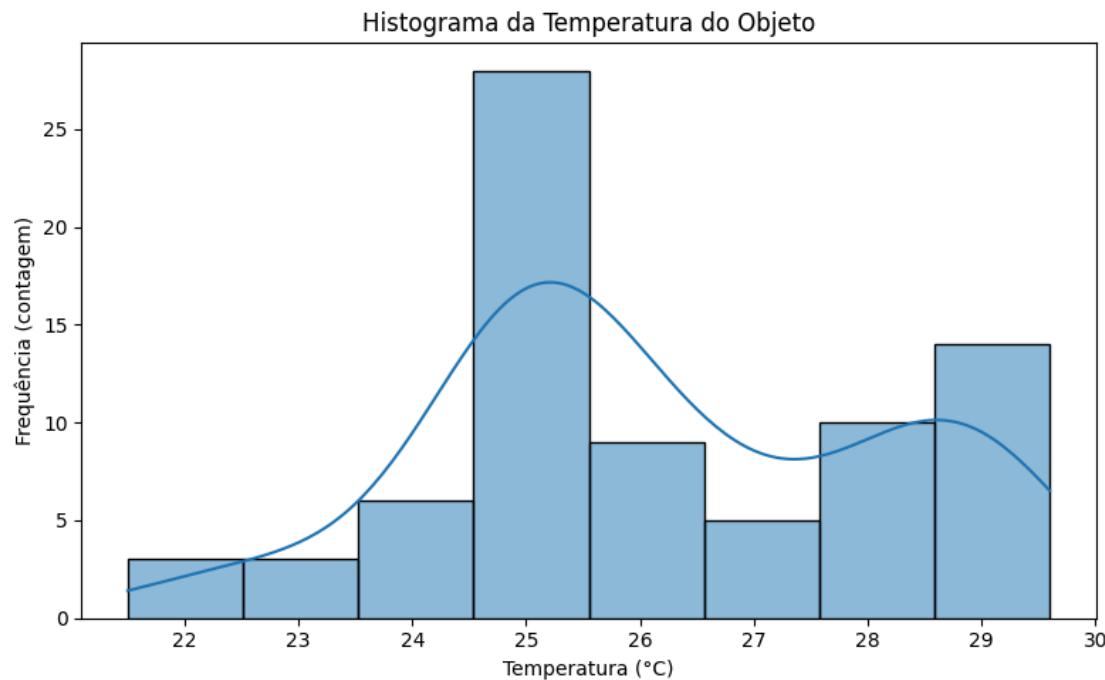


Figura 19 - Histograma do Comportamento da Temperatura

Para compreender a distribuição estatística da temperatura, utilizaram-se histogramas. O histograma do comportamento da temperatura, complementado com uma curva KDE (estimativa de densidade de probabilidade), fornece uma perspetiva mais aprofundada. A Figura 19 revela uma distribuição bimodal dos valores de temperatura do objeto, com concentrações em torno de 25–26 °C e 28–29 °C. Este achado é significativo, pois indica a existência de pelo menos dois regimes térmicos distintos durante o processo de maquinagem, possivelmente associados a etapas diferentes de corte ou a variações nos parâmetros da máquina. Essa bimodalidade orienta as análises de correlação e modelação, sugerindo que fatores distintos podem ser dominantes em cada regime térmico, um ponto crucial para desenvolver estratégias de controlo adaptativas.

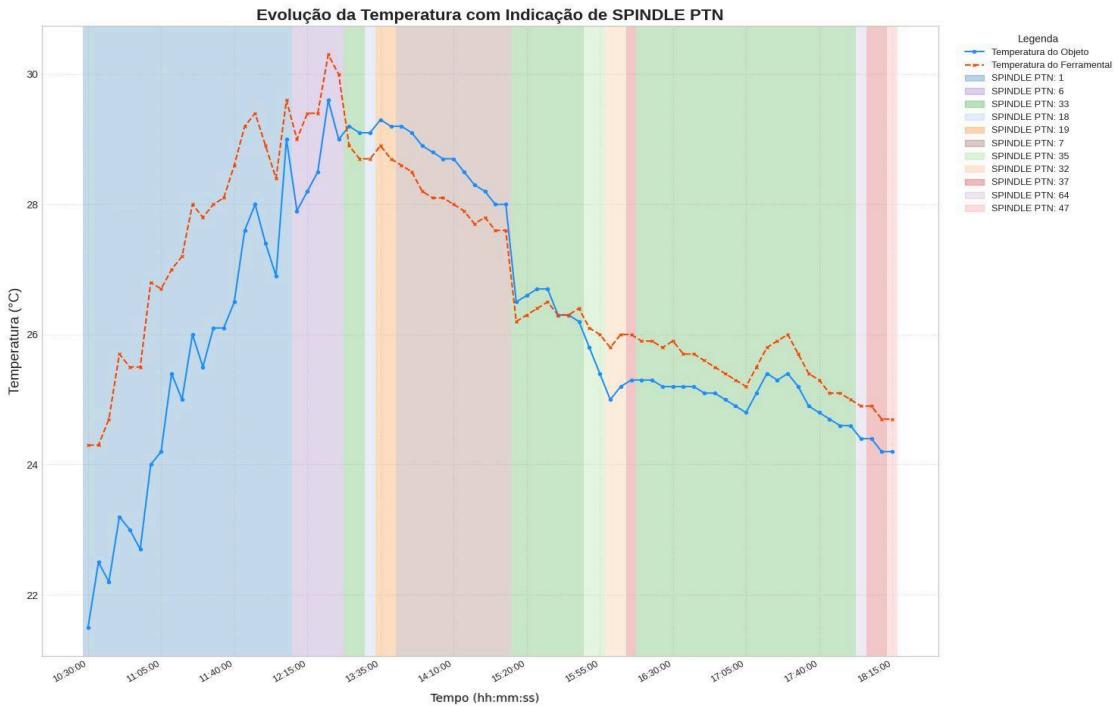


Figura 20 - Evolução da Temperatura com indicação de SPINDLE PTN

A evolução da temperatura da peça, com indicação de cada SPINDLE PTN (Figura 20), revela o comportamento térmico ao longo do processo e mostra como cada ferramenta contribui, direta ou indiretamente, para as variações observadas. Na fase inicial (Ferramenta T1), a peça aquece suavemente de aproximadamente 21,5 °C para cerca de 27 °C, indicando acúmulo gradual de calor devido ao contacto prolongado. As transições para T6 e T19 geram saltos mais abruptos, ultrapassando os 28 °C, o que sugere concentrações localizadas de calor; essas ferramentas, pelas suas características geométricas ou materiais, poderão ser alvo de estudos futuros para investigar o seu grau de influência nesse aumento e como mitigá-lo. Quando o sistema muda para T7 e PTN 35, nota-se um arrefecimento eficaz, com a temperatura a regressar para cerca de 24–25 °C, indicando que esses parâmetros favorecem a dispersão térmica da peça. Durante a longa permanência em T18, a curva mantém-se praticamente plana (flutuações inferiores a 0,5 °C), demonstrando um regime estável, ideal para operações prolongadas. Breves incursões em T32 e T37 provocam elevações moderadas, mas controladas, evidenciando oportunidades de otimização na seleção ou modificação dessas ferramentas. Estes insights permitem identificar quais PTNs afetam mais o perfil térmico da peça, não apenas nos picos de aquecimento, mas também na capacidade de manter ou reduzir a temperatura média, orientando

estudos práticos para substituir ou ajustar PTNs que contribuam para instabilidades térmicas.

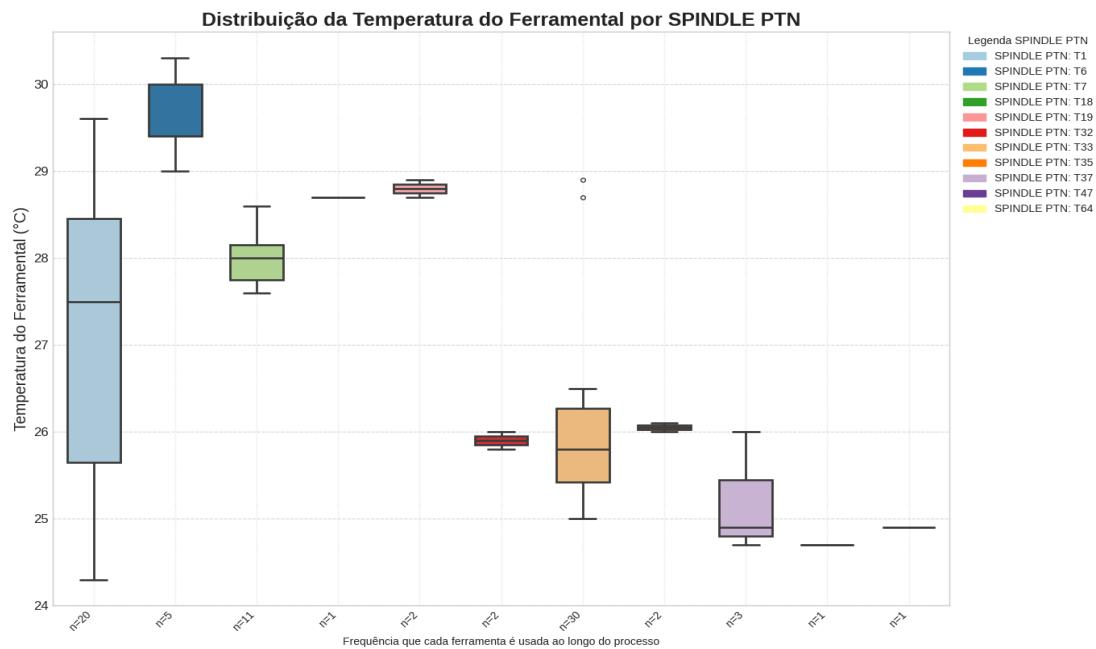
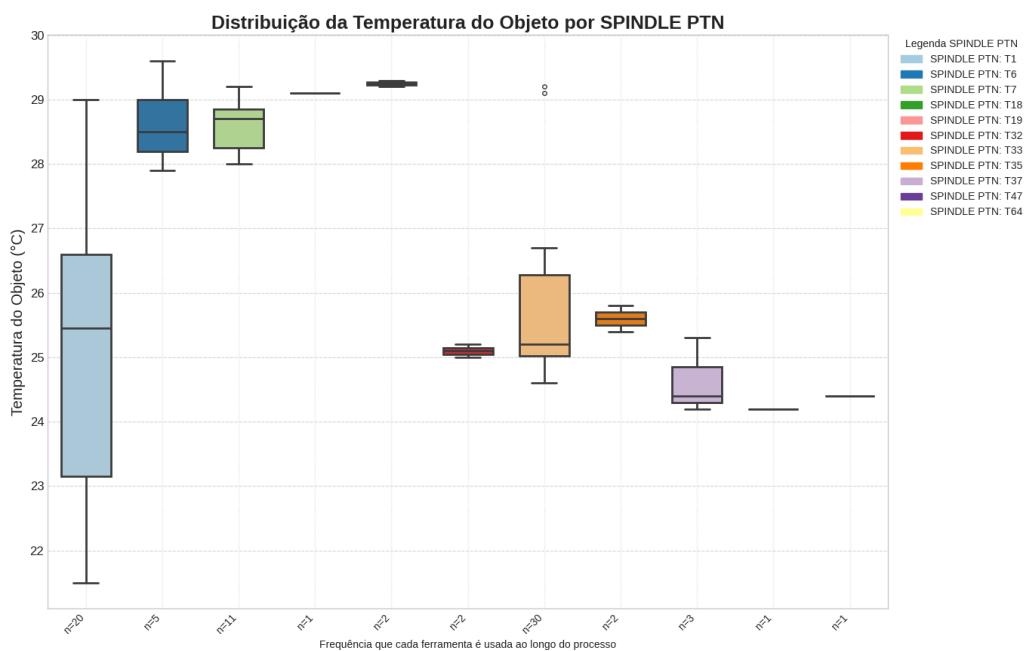


Figura 21 - Distribuição da Temperatura do Ferramental por SPINDLE PTN

As figuras a seguir confirmam que a frequência de uso influencia diretamente a variabilidade térmica. No ferramental (Figura 21), a T1 ($n=20$) apresenta mediana em torno de $27,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e IQR amplo ($26\text{--}29\text{ }^{\circ}\text{C}$), com valores extremos próximos a $30,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, refletindo ciclos repetidos de carga térmica intensa. Em contrapartida, PTNs de uso esporádico (T7, T19, T33, T47, T64) mostram medianas entre $25\text{--}26\text{ }^{\circ}\text{C}$ e dispersão mínima ($< 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$), indicando que intervenções pontuais mal afetam o aquecimento.

Figura 22 - Distribuição da Temperatura do Objeto por SPINDLE PTN



Na peça (Figura 22), o padrão é semelhante, mas as temperaturas surgem sistematicamente cerca de 1 °C abaixo das do ferramental, devido à transferência de calor e à subsequente dissipação no material. Assim, operações contínuas elevam ambas as distribuições, enquanto pausas breves ou ferramentas pouco exigidas mantêm o sistema em condições quase isotérmicas. Estes resultados reforçam a necessidade de investigar os PTNs com maior variabilidade e de testar sequências alternativas, otimização ou substituições que minimizem picos térmicos, promovendo maior estabilidade e eficiência no processo de maquinagem.

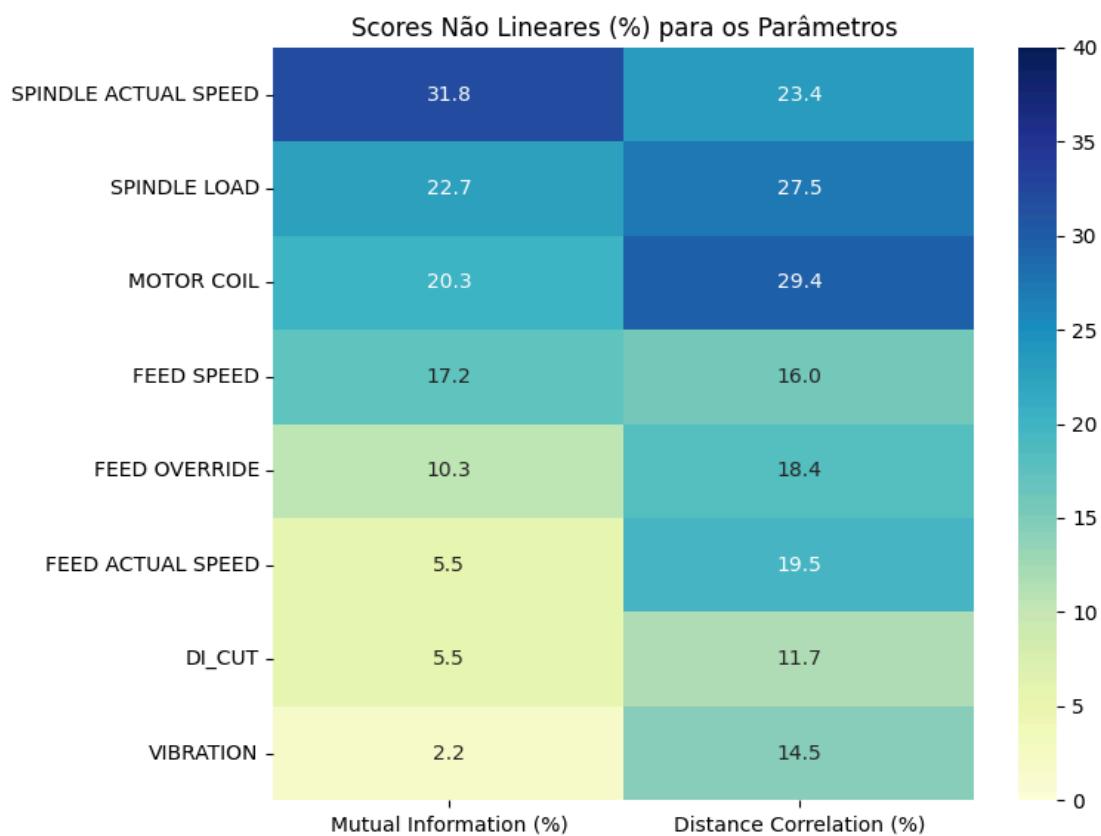


Figura 23 - Scores Não Lineares (%) para os Parâmetros

Portanto, reconhecendo que os processos de maquinagem frequentemente envolvem interações não lineares, a análise foi aprofundada com os “Scores Não Lineares (%) para os Parâmetros”, utilizando Mutual Information e Distance Correlation. Esta abordagem revelou a importância de parâmetros como SPINDLE LOAD e SPINDLE ACTUAL SPEED, cujas influências complexas não seriam captadas por métricas lineares simples. A combinação destas métricas de correlação contribuiu diretamente para o objetivo de identificar as principais fontes de variação térmica.

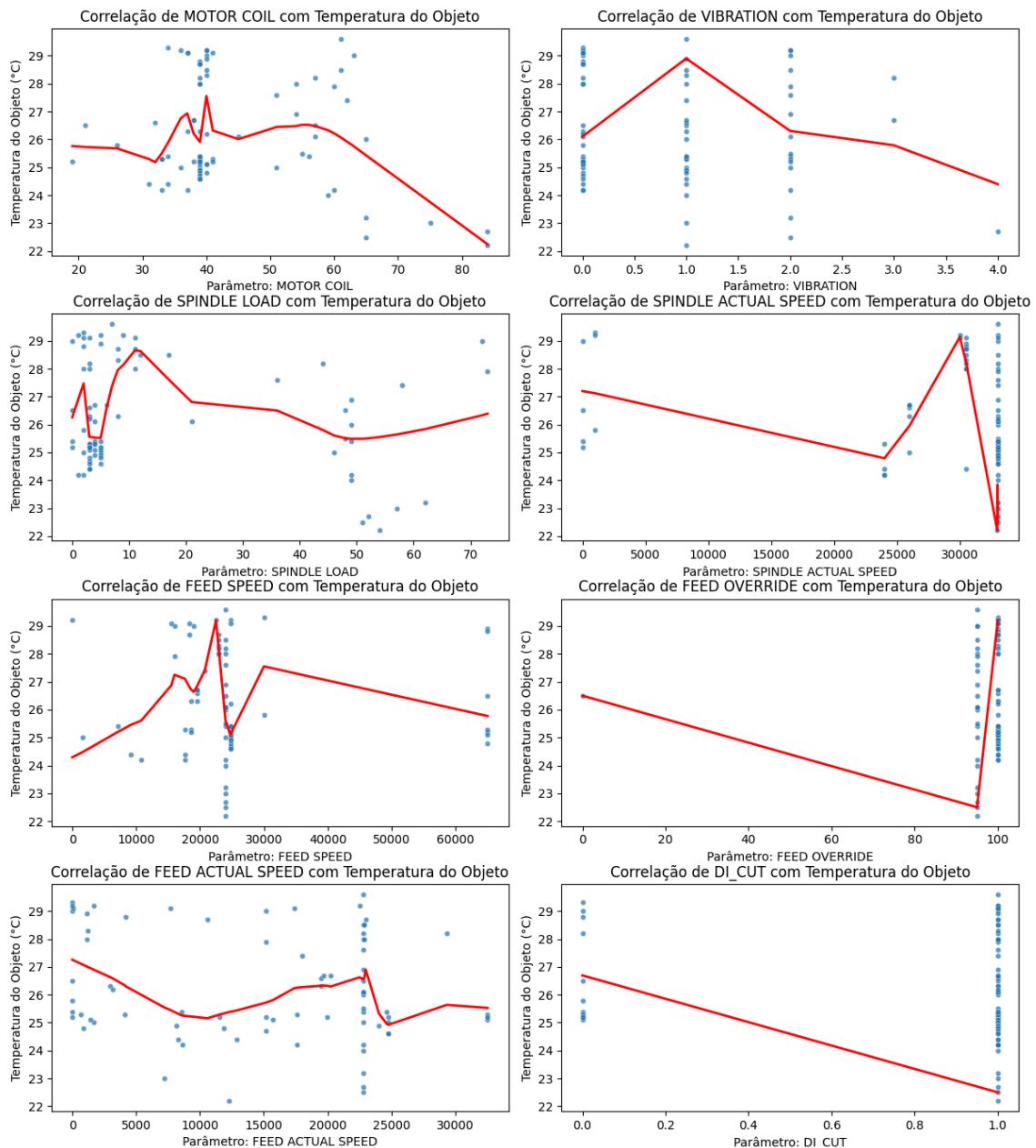


Figura 24 - Gráficos de Dispersão com LOWESS

Para uma exploração visual mais detalhada das relações individuais, foram utilizados gráficos de dispersão complementados por curvas LOWESS. Esta matriz de gráficos permitiu visualizar a relação entre cada parâmetro da máquina selecionado e a Temp_Objeto (temperatura do objeto), com a curva LOWESS a evidenciar a tendência central, mesmo quando não linear. Estes gráficos mostraram de forma detalhada as relações, revelando tendências, limiares e comportamentos não monotónicos que se perderiam numa regressão linear simples, facilitando uma compreensão mais profunda de como cada parâmetro influencia individualmente a temperatura.

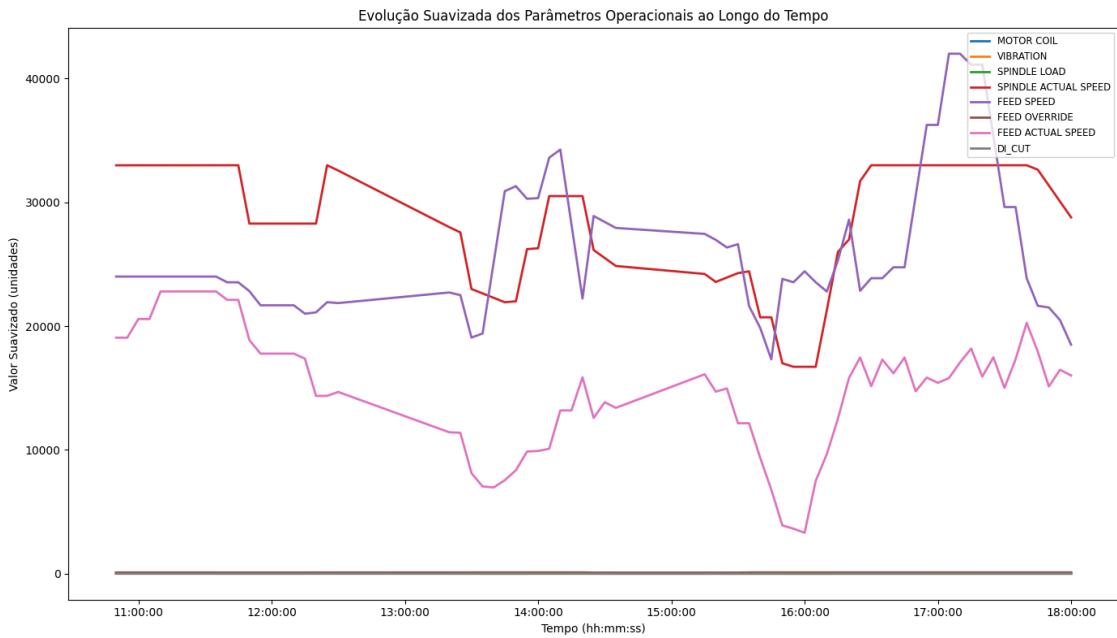
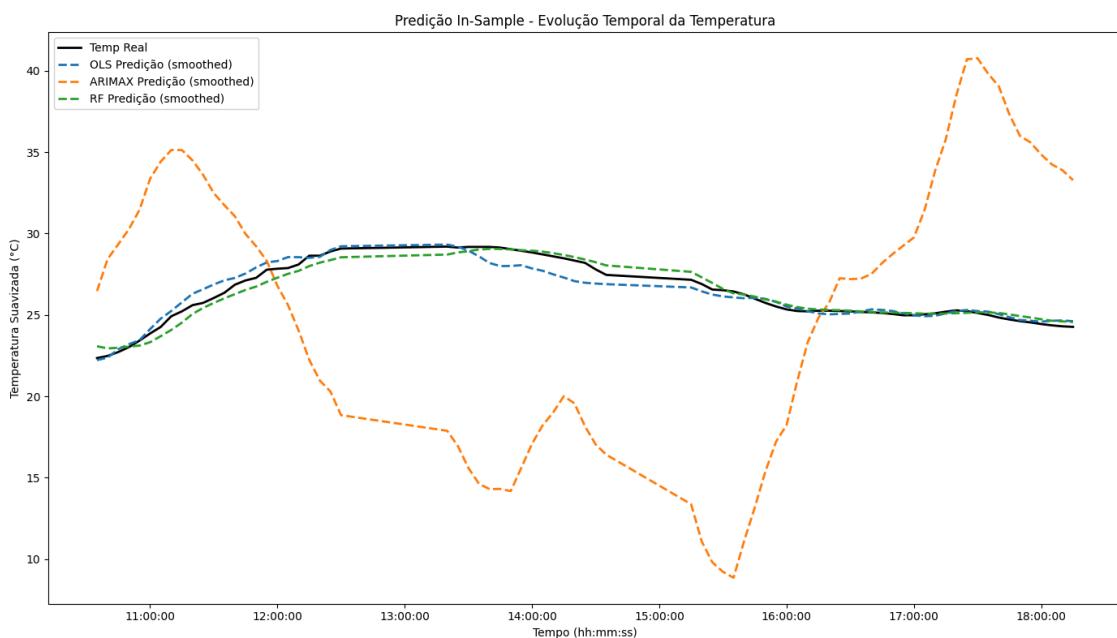


Figura 25 - Evolução Suavizada dos Parâmetros Operacionais

O contexto temporal das operações foi fornecido pela evolução suavizada dos parâmetros operacionais. Este gráfico mostrou a evolução temporal de múltiplos parâmetros da máquina de forma simultânea, com suavização para destacar as tendências principais. Visualizar a evolução temporal dos parâmetros é essencial para compreender o contexto em que as variações de temperatura ocorrem, permitindo correlacionar, por exemplo, um aumento na temperatura da peça com um aumento sustentado na carga do spindle ou na velocidade de avanço.

Figura 26 - Predição In-Sample - Evolução Completa



A capacidade de antever o comportamento térmico foi avaliada através do desenvolvimento e comparação de modelos preditivos. O gráfico de Predição In-Sample - Evolução Completa da Série comparou o desempenho dos modelos OLS, ARIMAX e Random Forest. Esta visualização direta da exatidão dos modelos em relação à temperatura real observada destacou a superioridade do modelo Random Forest. Este modelo não linear demonstrou uma capacidade notável de acompanhar a temperatura real suavizada, indicando o seu potencial para capturar as interações complexas que governam o comportamento térmico da peça. A performance do Random Forest sublinha a viabilidade da implementação de sistemas de controlo preditivo baseados em machine learning para a compensação proativa de erros térmicos.

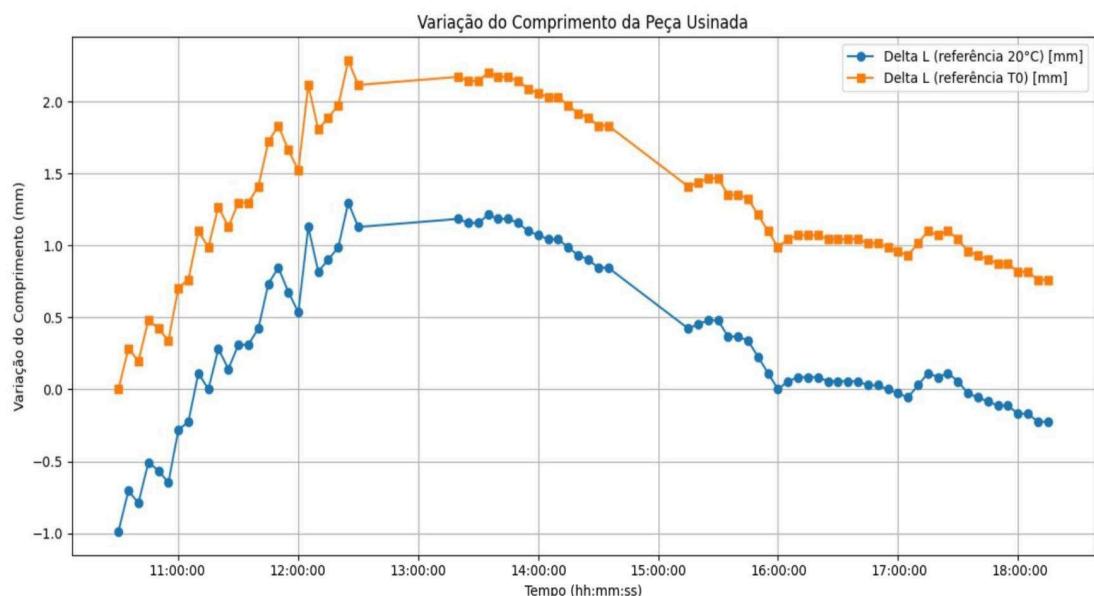


Figura 27 – Variação do Comprimento da Peça Usinada

A liga de alumínio 7050-T5471, material central deste estudo, é reconhecida pela sua alta resistência e tenacidade, características essenciais para aplicações estruturais aeronáuticas. No entanto, o seu coeficiente de dilatação térmica ($\alpha \approx 23 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$) a torna intrinsecamente suscetível a variações dimensionais significativas face a gradientes de temperatura. Os resultados experimentais, suportados pelas análises gráficas detalhadas acima, confirmaram que as flutuações de temperatura durante o ciclo de maquinagem, induzidas tanto pelo processo de corte quanto por fontes de calor da máquina-ferramenta, podem, de facto, levar a desvios que comprometem as tolerâncias dimensionais exigidas.

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste último capítulo será sumarizado os resultados obtidos durante a realização do trabalho de projeto, será feita uma análise das alterações testadas e consequentemente das melhorias implementadas. Serão também apresentadas propostas de trabalhos futuros para dar continuidade à melhoria do processo.

6.1. Conclusões

Neste projecto, foi confirmado, através de testes práticos e de análises estatísticas, que as variações de temperatura registadas (entre 21,5 °C e 29 °C) resultam em dilatações lineares de até 2,1 mm em componentes de alumínio 7050-T5471 com 12 m de comprimento, excedendo a tolerância de fabrico. O histograma da temperatura revelou uma distribuição bimodal, com picos centrados em 25,5 °C e 28,0 °C, o que indica dois regimes térmicos bem distintos, um regime de aquecimento gradual durante operações de desbaste e outro de picos abruptos associados a etapas específicas de acabamento. Esta caracterização fundamenta a necessidade de desenvolver estratégias de controlo térmico diferenciadas, adaptadas a cada fase de corte.

Para estabelecer a relação entre o comportamento térmico e os parâmetros de processo, aplicou-se métodos lineares (ANOVA para análise de variância entre grupos de temperatura; coeficiente de Pearson para relações diretas) e técnicas não lineares (Informação Mútua para identificar dependências complexas; Distance Correlation para quantificar associações não lineares). Os resultados destacaram, em particular, o SPINDLE LOAD e o SPINDLE ACTUAL SPEED como variáveis preponderantes na geração de calor. As curvas LOWESS em gráficos de dispersão evidenciaram pontos de inflexão que coincidem com mudanças de ferramenta ou subidas bruscas de carga, sublinhando interações complexas que não seriam captadas com abordagens exclusivamente lineares.

No domínio da predição, foi implementado e comparou-se três modelos: OLS (Ordinary Least Squares), ARIMAX (modelos autorregressivos com variáveis exógenas) e Random Forest. O modelo de Random Forest obteve 94 % de precisão na previsão da evolução da temperatura, superior ao modelo OLS e principalmente ao ARIMAX. Este factor deve-se à capacidade do Random Forest de capturar padrões não lineares e interações de ordem superior, o que não ocorre nos demais modelos testados. Estes resultados apontam para a viabilidade de integrar algoritmos de

aprendizagem automática em sistemas de controlo em tempo real, permitindo antecipar desvios térmicos e aplicar correções antes que ocorram dilatações críticas.

A nível metodológico, foi desenvolvido um protocolo que integra a instalação de termopares tipo K e sensores IR MLX90614, ligados a módulos ESP32/ESP32-CAM, garantindo aquisição de dados sincronizada a intervalos de 5 minuto ao longo de ciclos, que neste projeto, durou por volta de 8 h. As leituras foram processadas em Python, que gerou os gráficos utilizados no estudo dos resultados.

Identificou-se duas limitações que orientam trabalhos futuros: (1) para que a aplicação dos resultados sejam ampliados e os modelos preditivos atinjam sua função completa e viabilize a sua utilização no processo em tempo real, seria ideal que tivesse um banco de dados significativamente maior. Isso demandaria a replicação dos ensaios em diversas peças com diferentes geometrias e tamanhos; (2) as vibrações, partículas de cavaco e características de funcionamento da máquina dificultaram a colocação permanente e ideal dos sensores. Para contornar essas limitações, a melhor opção seria replicar os ensaios em diferentes centros CNC, com distintas geometrias de peças e configurações de refrigeração, garantindo assim validação estatística dos modelos preditivos.

6.2. Trabalhos futuros

Com base nos resultados e conclusões desta dissertação sobre os efeitos térmicos na maquinagem CNC de alumínio 7050-T5471, as investigações futuras deverão concentrar-se no avanço de soluções práticas e objetivas para a indústria. Uma direção prioritária é o desenvolvimento de um sistema robusto de monitorização e controlo térmico em tempo real. Isto implicará o aperfeiçoamento da integração de sensores, como termopares e câmaras de infravermelhos, para uma aquisição de dados abrangente e precisa. Modelos de machine learning, com destaque para o Random Forest, deverão ser implementados para a predição contínua da temperatura da peça, permitindo o controlo adaptativo dos parâmetros de maquinagem, incluindo velocidade de avanço, rotação do spindle e aplicação de fluido de corte, visando a manutenção da peça dentro de uma janela térmica ótima.

Subsequentemente, a validação experimental rigorosa do sistema de controlo adaptativo será fundamental. Esta etapa envolverá a realização de ensaios sistemáticos em condições que simulem o ambiente de produção real, bem como em cenários de produção efetiva. A performance do sistema será comparada com métodos de maquinagem convencionais, avaliando-se criticamente os ganhos em

precisão dimensional, tempos de ciclo, consumo de energia e desgaste da ferramenta, para quantificar o valor acrescentado da abordagem proposta.

Paralelamente, a modelagem avançada dos efeitos térmicos deverá ser aprofundada. Propõe-se estender os modelos preditivos para incluir a deformação térmica da peça, o que poderá ser alcançado através da integração com simulações por Elementos Finitos (FEM) alimentadas por dados de temperatura em tempo real. Adicionalmente, a investigação deverá abranger o impacto do desgaste progressivo da ferramenta e de outros fatores dinâmicos, como vibrações, no comportamento térmico e na qualidade superficial final do componente maquinado.

A implementação de otimização de processos multiobjectivo constitui outra vertente relevante. Serão desenvolvidos algoritmos capazes de encontrar um equilíbrio ótimo entre objetivos concorrentes, como a minimização do erro dimensional, a maximização da taxa de remoção de material e a minimização do consumo energético, sempre sob as restrições impostas pelo controlo térmico e pelas capacidades do processo.

Finalmente, a exploração de tecnologias emergentes de sensorização e refrigeração poderá desbloquear novos níveis de performance. Recomenda-se a investigação de sensores inovadores, como os baseados em fibra ótica para medições de temperatura mais diretas, e o desenvolvimento de sistemas de refrigeração avançados, como a refrigeração localizada, para uma gestão térmica mais eficaz e precisa durante a maquinagem.

A concretização destas linhas de investigação focadas e objetivas impulsionará a inovação na maquinagem de precisão, resultando numa melhoria significativa da qualidade dos componentes, na redução dos custos de fabrico e no aumento da eficiência, com particular relevância para a indústria aeronáutica e outros setores que exigem elevada precisão.

Referências

- AERNOVA. *Relatório anual*. [S.I.]: Aernnova, 2022. Disponível em: <https://www.aereo.jor.br/2022/05/02/embraer-e-aernnova-concluem-acordo-de-parceria-estrategica-em-evora/>. Acesso em: 2 mai. 2025.
- ALUMINUM-ALLOYS. *Ligas de alumínio série 7000 | Mingtai*. [S.I.]: [s.n.], 2024. Disponível em: <https://www.aluminum-alloys.com.br/1-2-7000-series-aluminum-alloys.html>. Acesso em: 8 mai. 2025.
- AMERICAN MACHINIST. *Five-Axis High-Flyer for Aluminum Structures*. [S.I.]: [s.n.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.americanmachinist.com/machining-cutting/article/21897815/five-axis-high-flyer-for-aluminum-structures>. Acesso em: 9 mar. 2025.
- APO GOLD. *Manual do Usuário: Medidor de Temperatura THE-343*. [S.I.]: Apo Gold, 2023.
- ARSLAN, A.; ÇIÇEK, A. Correction and compensation of thermally-induced errors in CNC milling via integrated CAD/CAM/FEA operations for AL 7075. *Erciyes University Journal of Institute of Science and Technology*, v. 38, n. 3, p. 629–643, 2022.
- ASM INTERNATIONAL. *Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials*. 2. ed. Materials Park, OH: ASM International, 2020. (ASM Handbook, v. 2).
- ASM INTERNATIONAL. *Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials*. 2. ed. Materials Park, OH: ASM International, 2022. (ASM Handbook, v. 2).
- BRAGA, A. P. V. *Propriedades térmicas e mecânicas de ligas de alumínio para aplicações estruturais*. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- CHIU, Y.-C.; HSIEH, Y.-C.; CHEN, S.-H. Thermal error estimation of the machine tool spindle based on machine learning. *Machines*, v. 9, n. 9, p. 184, 2021.
- DAVIS, J. R. *Aluminum and aluminum alloys*. Materials Park, OH: ASM International, 2019.
- ELKAMEHR. *2000 Series Aluminum Alloy: Comprehensive Analysis*. [S.I.]: [s.n.], 2024. Disponível em:

<https://elkamehr.com/en/2000-series-aluminum-alloy-comprehensive-analysis/>. Acesso em: 8 mai. 2025.

ELKAMEHR. *In-Depth Analysis of 2000 Series Aluminum Alloys: Composition, Properties, Processing and Applications*. [S.I.]: [s.n.], 2024. Disponível em: <https://elkamehr.com/en/in-depth-analysis-of-2000-series-aluminum-alloys-composition-properties-processing-and-applications/>. Acesso em: 8 mai. 2025.

EMBRAER. *Anúncio da aquisição*. [S.I.]: [s.n.], 2022. Disponível em: https://www.sapo.pt/noticias/economia/concluida-venda-das-fabricas-de-evora-da_62712096ab0ea7509249baed. Acesso em: 2 mai. 2025.

EUROCONTROL. *Tendências do setor aeroespacial*. [S.I.]: [s.n.], 2023. Disponível em: <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/3368208/embraer-vende-ativos-portugal-aernnova-172-milhoes>. Acesso em: 2 mai. 2025.

GUOXIN. *Liga de alumínio, série 7000*. [S.I.]: [s.n.], 2015. Disponível em: <https://www.gxaluminum.com/pt/product/7000-series-aluminum-alloy.html>. Acesso em: 8 mai. 2025.

IMPERIO DOS METAIS. *Saiba tudo sobre as ligas de alumínio aeronáutico*. [S.I.]: [s.n.], 2024. Disponível em: <https://www.imperiodosmetais.com.br/blog/ligas-de-aluminio-aeronautico>. Acesso em: 8 mai. 2025.

INFOMET. *Ligas Al-Zn | Informações Técnicas | Alumínio | Metais & Ligas*. [S.I.]: [s.n.], 2024. Disponível em: <https://www.infomet.com.br/ligas-al-zn>. Acesso em: 8 mai. 2025.

KREITH, F.; GOSWAMI, D. Y. *Principles of heat transfer*. 8. ed. Boston: Cengage Learning, 2017.

KUMAR, S. et al. Tensile properties and fractography of three AA 2000 series aluminum alloys used for aerospace applications. *Materials Today: Proceedings*, v. 80, p. 1564–1570, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323024006>. Acesso em: 2 mai. 2025.

KUO, C.-H.; CHEN, P.-C. On-machine measurement and error compensation for 6061 aluminum alloy hexagonal punch using a turn-milling machine. *Machines*, v. 9, art. 180, 2021.

LI, Y. et al. A review of thermal error modeling methods for machine tools. *Applied Sciences*, v. 11, art. 5216, 2021.

LIANG, Y. et al. Thermal error compensation of CNC machining tools based on Elman neural network. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 56, p. 1096–1105, 2020.

LIU, C. et al. Thermal error modeling based on BiLSTM deep learning for CNC machine tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 113, p. 215–228, 2021.

LEI, Z.; YANG, H.; XI, L. Thermal error modeling with dirty and small training sample base for high-precision grinding machine. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 93, p. 571–586, 2017.

LIAN, Q.; ZHANG, B.; YU, J.; WANG, X. Two-mode integral approach for thermal error modeling in CNC milling-turning center. *IEEE Access*, v. 10, p. 1–10, 2022.

MACHADO, I. V. P. *Discussões sobre efeitos de tratamentos térmicos e corrosão em ligas de alumínio da série 7000*. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2021.

MAKINO. *A-Series Horizontal Machining Centers*. [S.I.]: Makino, 2023. Disponível em: <http://www.makino.com>. Acesso em: 20 abril. 2025.

MARTINS, P.; SILVA, R.; COSTA, F. Influência das propriedades térmicas do alumínio na maquinagem de alta velocidade. *Journal of Materials Engineering*, v. 32, n. 4, p. 56–68, 2020.

MÖHRING, H.-C. et al. Intelligent tools for predictive process control in CNC machining. *Procedia CIRP*, v. 72, p. 1453–1458, 2018.

O AVIÃO. *Alumínio aeronáutico: conheça as vantagens e aplicações deste material no setor de aviação*. [S.I.]: [s.n.], 2023. Disponível em: <https://www.oaviao.com.br/blog/categorias/artigos/aluminio-aeronautico-conheca-as-vantagens-e-aplicacoes-deste-material-no-setor-de-aviao>. Acesso em: 7 mai. 2025.

OMEGA ENGINEERING. *Thermocouple Reference Guide*. [S.I.]: Omega Engineering, 2022. Disponível em: <https://www.omega.co.uk/temperature/z/tcref.html>. Acesso em: 20 abril. 2025.

PAILIAN ALUMINIO. *Para que serve o alumínio da série 7000*. [S.I.]: [s.n.], 2023. Disponível em: <https://www.pailianaluminio.com.pt/news/para-que-serve-o-aluminio-da-serie-7000-66899398.html>. Acesso em: 5 mai. 2025.

POLMEAR, I. J. et al. *Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals*. 5. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.

POLY LANEMA. *Liga de alumínio AW 7075*. [S.I.]: [s.n.], 2024. Disponível em: <https://www.lanema.pt/pt/produtos/ligas-de-aluminio/aw-7075>. Acesso em: 8 mai. 2025.

PRATES, P. *Estudo de processos de maquinagem aeroespacial de um estabilizador vertical*. 2024. Projeto de Mestrado (Engenharia Mecatrónica) – Universidade de Évora, Évora, 2024. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10174/37075>. Acesso em: 20 abril. 2025.

SHI, H. et al. Thermal error modeling of machine tool based on dimensional error of machined parts in automatic production line. *ISA Transactions*, v. 135, p. 575–584, 2023.

SILVA, A.; SOUZA, M. Estudo comparativo das ligas de alumínio série 2000 e 7000 para aplicações estruturais. *Revista de Engenharia de Materiais*, v. 15, n. 2, p. 105–119, 2018.

SILVA, E. N. da. Difusividade térmica do alumínio: um estudo de caso como ferramenta de ensino. *Revista Caderno Pedagógico*, v. 21, n. 6, p. 1–21, 2024.

TEKCOPLUS. Thermocouple Thermometer with 4 K Type Thermocouple, Digital Dual Channel K/J Type HVAC Thermometer, Temperature Range -328 to 3000 F, Thermometer with Alarm, ADJ Compensation. Amazon.co.jp, 2024. Disponível em: <https://amzn.asia/d/iiKAW8J>. Acesso em: 24 set. 2025.

UNIRV. *Efeitos dos tratamentos térmicos em ligas de alumínio*. Rio Verde: Universidade de Rio Verde, 2023. Disponível em: <https://www.unirv.edu.br/conteudos/fckfiles/files/EFEITOS%20DOS%20TRATAMENTO%20TERMICOS%20EM%20LIGAS%20DE%20ALUMINIO.pdf>. Acesso em: 7 mai. 2025.

VARANDA, R. et al. Análise das ligas metálicas na fabricação de componentes aeronáuticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AEROESPACIAL, 3., 2021, São José dos Campos. Anais [...] São José dos Campos: ITA, 2021.

VARGEL, C. *Corrosion of Aluminium*. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2020.

WANG, Y. et al. A review of the application of machine learning techniques in thermal error compensation for CNC machine tools. *Measurement*, v. 243, art. 116341, 2024.

ZHU, X.; LI, Y.; WANG, Z.; ZHANG, H. Thermal error modeling for CNC machine tools using a random forest algorithm. In: *Proceedings of the 21st International Conference*

of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (EUSPEN),
2021. p. 100–107.

ZHU, X.; LI, Y.; WANG, Z.; ZHANG, H. Robust modeling method for thermal error of
CNC machine tools based on random forest. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 34,
p. 2013–2026, 2023.