

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PROJETO E FABRICAÇÃO DE DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO COM CONTROLE DE
TEMPERATURA PARA FRESAMENTO TERMICAMENTE ASSISTIDO

por

Mauro Vinícius Bruno de Azevedo

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, setembro de 2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Bruno Azevedo, Mauro Vinicius
PROJETO E FABRICAÇÃO DE DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO COM
CONTROLE DE TEMPERATURA PARA FRESAMENTO TERMICAMENTE
ASSISTIDO / Mauro Vinicius Bruno Azevedo. -- 2023.
30 f.
Orientador: Heraldo José de Amorim.

Coorientador: Emerson dos Santos Passari.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2023.

1. Projeto. 2. Fabricação. 3. Fresamento
Termicamente Assistido. I. de Amorim, Heraldo José,
orient. II. dos Santos Passari, Emerson, coorient.
III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Mauro Vinícius Bruno de Azevedo

PROJETO E FABRICAÇÃO DE DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO COM CONTROLE DE
TEMPERATURA PARA FRESAMENTO TERMICAMENTE ASSISTIDO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Ignacio Iturrioz
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Processos de Fabricação**

Orientador: Prof. Heraldo José de Amorim

Coorientador: Me Émerson dos Santos Passari

Comissão de Avaliação:

Prof. Heraldo José de Amorim (Presidente)

Prof. André João de Souza

Prof. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 06 de setembro de 2023

*Às pessoas mais importantes da minha vida:
minha família.*

AGRADECIMENTOS

Ao colega João Souza, pelo desenvolvimento da parte de controle e aquisição de dados deste trabalho.

À Empresa Favorit Aços Especiais, pelo fornecimento de matéria prima para a construção do projeto.

*“A engenharia é a profissão que transforma conhecimento em utilidade,
movendo o mundo da teoria para a prática.”*

Mario Quintana

AZEVEDO, Mauro V. B.. *Projeto e fabricação de dispositivo de fixação com controle de temperatura para fresamento termicamente assistido*. 2023. 30f. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

RESUMO

O presente trabalho visa o desenvolvimento de um dispositivo de fixação que permita o aquecimento de uma peça durante o processo de usinagem. O dispositivo é projetado para permitir que o corpo de prova atinja e mantenha temperaturas de 100 a 400 °C enquanto montado em um dinamômetro piezoelétrico. Para evitar o superaquecimento dos instrumentos eletrônicos, o dispositivo é equipado com um sistema de resfriamento, evitando assim a transmissão excessiva de calor para o dinamômetro onde o dispositivo de fixação está acoplado. Ao longo do desenvolvimento do dispositivo, vários critérios técnicos foram considerados e avaliados, incluindo condução térmica, inércia térmica, resistência à corrosão, dureza, ductilidade e tenacidade. Esses critérios desempenharam um papel fundamental na seleção dos materiais e técnicas de fabricação utilizados no dispositivo. Portanto, este estudo tem como objetivo obter um dispositivo de fixação eficiente e confiável, capaz de fornecer um controle térmico preciso durante o processo de usinagem.

Palavras-chave: fresamento termicamente assistido, dispositivo de controle de temperatura, projeto mecânico.

AZEVEDO, Mauro V. B.. *Design and manufacturing of a fixing device with temperature control for thermally-assisted milling*. 2023. Mechanical Engineering End-of-Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

ABSTRACT

The main goal of this study is the development of a fixturing device which allows heating a workpiece during the milling process. The device is designed to allow the test specimen to reach and maintain temperatures from 100 to 400 °C while mounted on a piezoelectric dynamometer. To avoid overheating of the electronic instruments, the device is equipped with a cooling system, thus preventing excessive heat transmission to the dynamometer where the test specimen is mounted. Throughout the device's development, several technical criteria were considered and evaluated, including thermal conduction, thermal inertia, corrosion resistance, hardness, ductility, and toughness. These criteria played a fundamental role in determining the manufacturing process and selecting the materials employed in the device. Therefore, this study aims to obtain an efficient and reliable fixturing device capable of providing precise thermal control during the machining process.

Keywords: thermally-assisted milling, temperature controlling device, mechanical design.

NOMENCLATURA

Símbolos

F_a	Força de Atrito	[N]
N	Força Normal	[N]
m	Vazão Mássica	[kg·s ⁻¹]

Símbolos Gregos

ρ	Massa específica do sólido	[kg·m ⁻³]
μ	Coefficiente de atrito estático	[adm]

Abreviaturas e Acrônimos

CP	Corpo de Prova
LAUS	Laboratório de Usinagem da UFRGS
TAM	<i>Thermally-Assisted Machining</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	METODOLOGIA.....	3
2.1	Requisitos de Projeto	3
2.2	Projeto Conceitual.....	4
2.2.1	Fixação do corpo de prova	4
2.2.2	Limitações Geométricas.....	4
3	DIMENSIONAMENTO.....	5
3.1	Esforços Considerados na Fixação do Corpo de Prova	5
3.2	Aquecimento do Corpo de Prova.....	7
3.3	Seleção do Material.....	8
3.4	Arrefecimento do Dispositivo de Fixação	9
3.5	Projeto do Sistema de Controle de Temperatura	10
3.6	Fabricação dos Componentes	10
3.6.1	Corpo e Mordente	10
3.6.2	Resistência de Aquecimento	11
4	RESULTADOS	12
5	CONCLUSÕES	13
6	REFERÊNCIAS	14
	ANEXOS	16
	APÊNDICE	18

1 INTRODUÇÃO

A usinagem de materiais é um processo fundamental na fabricação de peças e componentes em diversas indústrias, incluindo automotiva, aeroespacial e metalúrgica. A precisão e a qualidade das peças usinadas dependem de diversos fatores, incluindo a fixação adequada do corpo de prova e, em alguns casos, a manipulação da temperatura durante o processo [Machado et al., 2015].

A fixação adequada do corpo de prova é essencial para garantir a estabilidade durante a usinagem, evitando vibrações indesejadas e assegurando a exatidão das dimensões finais da peça. No entanto, em certos cenários, a simples fixação mecânica pode não ser suficiente para obter os resultados desejados, especialmente quando se lida com materiais de difícil usinagem ou quando é necessário minimizar a distorção térmica.

A usinagem termicamente assistida é uma técnica que combina os princípios da usinagem convencional com o controle preciso da temperatura durante o processo de fabricação. Esse procedimento envolve o uso de dispositivos que aplicam calor ao corpo de prova durante a usinagem, com o objetivo de alterar as características do material processado para facilitar a usinagem. Tal assistência térmica pode reduzir a resistência do material, aumentar a ductilidade, diminuir o desgaste da ferramenta de corte e, em muitos casos, permitir a usinagem de materiais de difícil processamento. Ao aplicar calor de forma controlada, a usinagem termicamente assistida pode reduzir a formação de tensões residuais compressivas, diminuir o risco de trincas e melhorar a qualidade superficial da peça final, abrindo novas possibilidades para a fabricação de componentes de alta precisão e desempenho [Sun et al., 2010]. Nesse contexto, a utilização de um dispositivo que permita a fixação do corpo de prova enquanto promove o aquecimento controlado pode ser uma abordagem inovadora e eficaz. Este dispositivo pode ser projetado para atender a necessidades específicas de usinagem, como o fresamento e furação de materiais de alta resistência, de ligas especiais, ou quando a expansão térmica pode influenciar negativamente a precisão dimensional do furo final [Ganta et al., 2017].

A combinação de fixação e aquecimento controlado pode oferecer uma série de benefícios, incluindo a redução de tensões residuais compressivas, a consequente diminuição dos desgastes da ferramenta de corte (permitindo assim o uso de velocidades de corte mais elevadas), e a melhoria da qualidade superficial das peças usinadas. Além disso, essa abordagem pode permitir a execução de operações de corte que seriam difíceis de serem realizadas por métodos convencionais de usinagem [Sun et al., 2010].

Lei e Pfefferkorn (2007) realizaram uma revisão sobre a usinagem termicamente assistida (TAM – *Thermally-Assisted Machining*), mencionando as vantagens e desvantagens de cada uma das formas de aquecimento, conforme Tabela 1.

Madhavulu e Ahmed (1994) introduziram a TAM no processo de torneamento usando arco de plasma, destacando os benefícios de produtividade, redução de forças de corte e consumo de energia. Os testes em aço inoxidável AISI 410 indicaram aumento de 1,80 vezes na taxa de remoção de metal e de 1,67 vezes na vida da ferramenta. Embora a potência total requerida para a máquina-ferramenta e para o sistema de aquecimento sejam maiores, a análise de custo mostrou que os custos com a energia consumida são menores que com as ferramentas de corte. Egorov (2013) também abordou o torneamento de aço carbono com diferentes microestruturas, observando a redução das forças em temperaturas elevadas (400 e 500 °C) e o aumento da vida da ferramenta na usinagem de microestrutura bainítica. No entanto, o autor observou um aumento do desgaste de flanco da ferramenta na usinagem de microestrutura ferrítica-perlítica com o incremento da temperatura, ainda que com menores forças de usinagem.

Maity e Swain (2008) investigaram o TAM no torneamento aplicando uma tocha (queimava uma mistura de gás de petróleo e oxigênio), no aquecimento do corpo de prova de aço com alto teor de manganês, utilizando ferramentas de metal duro. As temperaturas variaram entre 200 e

600 °C, sendo realizado um projeto de experimentos para avaliar a importância de cada variável. Os autores observaram que o aumento do avanço resultava em maiores forças de usinagem, enquanto o aumento da temperatura tinha um efeito inverso. Concluíram que a vida da ferramenta era influenciada principalmente pela temperatura da peça, seguida por velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. A temperatura de recristalização da peça limita o valor máximo da temperatura durante a usinagem, e o coeficiente de redução de cavacos diminui com o aumento da temperatura.

Tabela 1 – Métodos de aquecimento utilizados na TAM [Lei e Pfefferkorn, 2007].

Método de Aquecimento	Vantagens	Desvantagens
Aquecimento em forno	Método mais simples, temperatura uniforme da peça	A peça resfria durante o corte, ineficiente em termos energéticos, manipulação de materiais
Aquecimento por resistência	Fácil controle e limpeza	Perda de energia na interface ferramenta-cavaco, ferramenta de cerâmica não pode ser usada, isolamento do equipamento de usinagem
Aquecimento por indução	Conveniente e limpo, aquecimento em volume	Baixa densidade de potência, acoplamento com a ferramenta de corte
Aquecimento por arco elétrico	Barato, densidade de energia moderada	Necessidade de equipamento para ignição e estabilização do arco, proteção ocular para o trabalhador
Aquecimento por chama de gás	Equipamento de baixo custo	Baixa densidade de potência, baixa controlabilidade
Aquecimento por arco de plasma	Alta densidade de potência, a peça não precisa ser condutora	Necessidade de proteção ocular para o operador
Aquecimento a laser	Muito alta densidade de potência, controle preciso do tamanho, localização e comprimento de onda do feixe	Alto custo de capital, necessidade de adaptar o comprimento de onda às propriedades do material para máxima absorção
Aquecimento por feixe de elétrons	Maior densidade de potência, grande profundidade de penetração	Custo mais alto, funciona apenas em metais, requer vácuo

Mac et al. (2018) analisaram as forças geradas durante a TAM do aço ferramenta SKD11 por meio de aquecimento por indução no processo de fresamento. Os parâmetros otimizados pelos autores foram: velocidade de corte de 280 m/min, velocidade de avanço de 230 mm/min, profundidade de corte de 0,5 mm e temperatura de 400 °C. Foi observada uma redução máxima de 66,9% nas forças de usinagem comparadas à usinagem convencional, e os autores desenvolveram um modelo de previsão de forças baseado na temperatura.

Ao projetar um dispositivo para a TAM em fresamento, é essencial considerar fatores como a fonte de calor, a forma de transferência de calor para o corpo de prova, a capacidade de controle da temperatura, a seleção de materiais, o dimensionamento do dispositivo em relação à peça a ser usinada e a segurança operacional. Com a devida análise e projeto cuidadoso, um dispositivo dessa natureza pode impulsionar a eficiência do processo de usinagem, permitindo a fabricação de peças com maior qualidade [Weippert, 2020].

Motivado pela perspectiva de auxiliar no desenvolvimento de experimentos que envolvem o estudo da TAM, objetiva-se desenvolver um dispositivo de fixação para a usinagem por fresamento que promova o aquecimento controlado do material a ser usinado, e que possa ser acoplado a um dinamômetro piezelétrico para aquisição de forças de usinagem.

2 METODOLOGIA

A metodologia é um ponto importante para o sucesso do projeto, analisando o problema e elencando as possíveis soluções, passando por pesquisa, cálculos e análise de viabilidade. Como recursos e o tempo não são infinitos, resultados satisfatórios ao invés do ótimo também são aceitos.

2.1 Requisitos de Projeto

Por se tratar de um dispositivo que atenderá a requisitos técnicos específicos e auxiliará estudos em usinagem termicamente assistida, é importante minimizar as incertezas e os desvios que possam afetar os dados experimentais. Assim, as principais condições de contorno foram sumarizadas conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Etapas do processo e condições de contorno.

Etapa	Condições de Contorno
Esboço de projeto virtual	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensão não superior a 100 x 100 x 50 mm. • Volume destinado para o sistema de fixação do corpo de prova. • Volume destinado para o sistema de aquecimento do corpo de prova. • Volume destinado para o sistema de arrefecimento do dispositivo de fixação. • Volume destinado para o sistema de fixação do dispositivo no dinamômetro.
Projeto virtual mecânico	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensão não superior a 100 x 100 x 50 mm. • Capacidade de fixação com segurança para evitar soltura do corpo de prova e possível quebra de ferramenta ou máquina. • Espaço destinado ao sistema de aquecimento do corpo de prova. • Espaço destinado à refrigeração.
Escolha do material	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa condutividade térmica. • Alta rigidez. • Alta tenacidade. • Resistência a corrosão. • Resistência à fadiga. • Resistência a altas temperaturas (sem perder as propriedades mecânicas).
Projeto termodinâmico	<ul style="list-style-type: none"> • Aquecer o corpo de prova entre 100 e 400 °C. • Manter a temperatura da interface com o dinamômetro abaixo de 50 °C. • Vazão de fluido do centro de usinagem: 400 l/h.
Projeto eletroeletrônico	<ul style="list-style-type: none"> • Coletar dados de temperatura do dispositivo de fixação e do corpo de prova. • Manter a temperatura constante durante a usinagem. • Desligamento com alarme caso a interface com o dinamômetro exceda 50 °C.
Fabricação	<ul style="list-style-type: none"> • Ser fabricável na própria oficina.

Há três abordagens distintas para este projeto: mecânica, eletroeletrônica e termodinâmica. Cada uma delas implica em projetos, considerados individualmente, relativamente simples.

Na parte mecânica, é necessário fixar um corpo de prova (CP) com dimensões de 30 x 70 x 10 mm para usinagem por fresamento. Existem morsas disponíveis no mercado a preços acessíveis para essa finalidade.

No aspecto eletroeletrônico, é requerido aquecer o corpo de prova a uma temperatura variando entre 100 e 400 °C. Essa faixa de temperatura pode ser facilmente alcançada através de métodos como aquecimento por indução, resistência, tochas de calor ou sopradores térmicos. Estas opções também estão disponíveis a baixos custos.

Na abordagem termodinâmica, é imperativo que a temperatura na interface entre o dispositivo e o dinamômetro mantenha-se abaixo de 50 °C para prevenir danos ao equipamento de medição de forças. Para atingir esse objetivo, uma estratégia viável é aplicar um fluido de arrefecimento em todo o sistema. Contudo, é importante ressaltar que a usinagem do corpo de prova é realizada a seco, o que inviabiliza a aplicação deste método de resfriamento.

Deste modo, o desafio reside em encontrar uma solução capaz de integrar todas essas condições de contorno em um único dispositivo. Embora tenha sido realizada uma busca no mercado, não foi possível identificar um equipamento que possa simultaneamente desempenhar todas as funções necessárias.

O fluxograma apresentado na Figura 1 ilustra as etapas para a realização do projeto e fabricação até a etapa da escrita do relatório final.

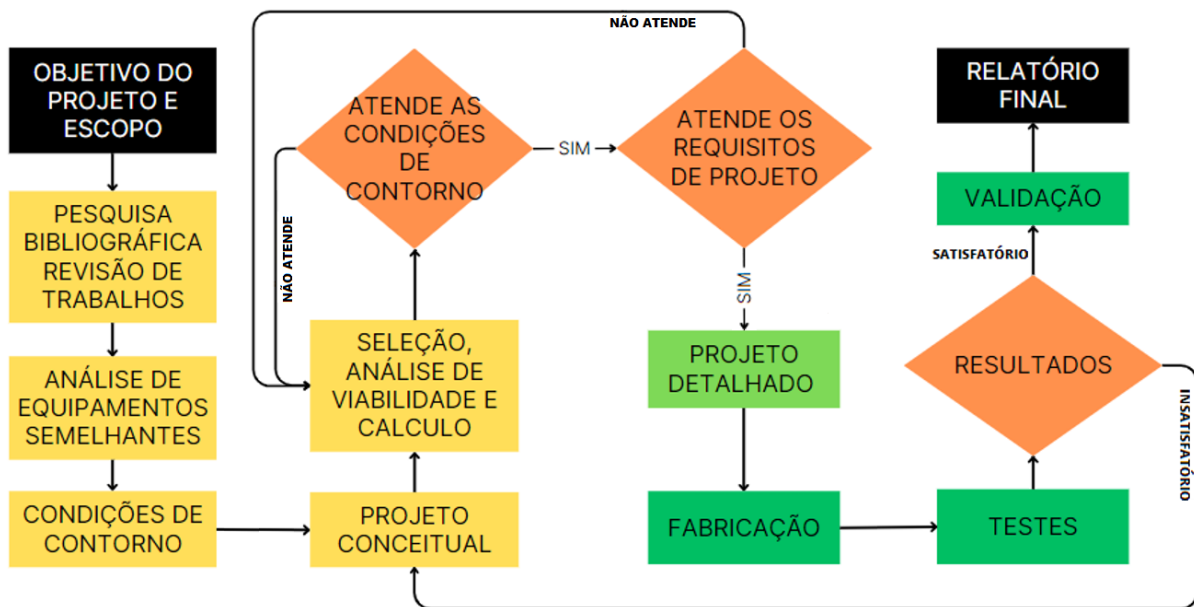


Figura 1 – Fluxograma de projeto.

2.2 Projeto Conceitual

Os desafios associados ao projeto conceitual envolvem o sistema de fixação do corpo de prova e suas limitações geométricas.

2.2.1 Fixação do corpo de prova

Dispositivos comerciais podem ser utilizados como base para essa etapa do projeto, como morsas comuns (Fig. 2). Esses dispositivos são bastante utilizados em fresadoras, restringindo os seis graus de liberdade do corpo de prova.

2.2.2 Limitações Geométricas

Descrito o problema e as condições de contorno, o esboço é concebido com o intuito de estimar o espaço disponível para cada item que compõe o dispositivo, incluindo as dimensões

do corpo de prova, posição e diâmetro dos furos para fixação no dinamômetro, além das dimensões máximas do equipamento. A Figura 3 ilustra um esboço inicial do projeto, em que são apresentadas regiões importantes para que os requisitos de projeto sejam atendidos: corpo de prova, espaço para fixação do corpo de prova, espaço para o sistema de aquecimento, volume estimado para a refrigeração do corpo do dispositivo e pontos de fixação do dispositivo no dinamômetro



Figura 2 – Morsa para fresadora amplamente utilizada em processos de fresamento.

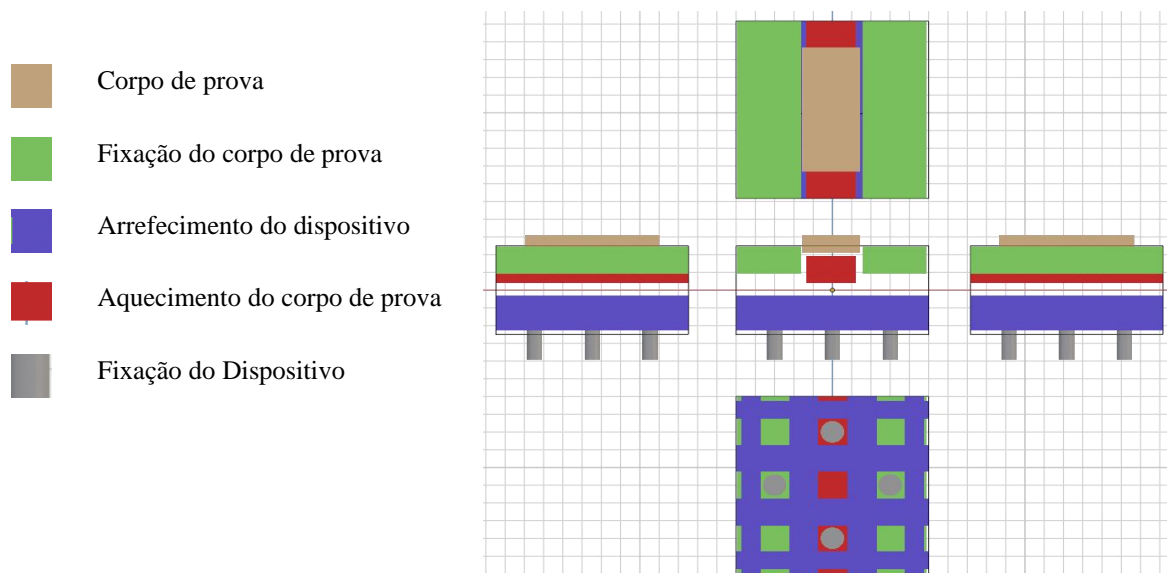


Figura 3 – Esboço do projeto virtual com definições dos espaços para cada item.

3 DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento do dispositivo de fixação para o fresamento termicamente assistido deve considerar os esforços envolvidos na usinagem, a maneira de aquecer o corpo de prova (CP), a seleção adequada do material, a estratégia para refrigerar a base (interface com o dinamômetro piezoeletrico), o sistema eletrônico para o controle de temperatura do corpo de prova e a fabricação dos componentes do dispositivo.

3.1 Esforços Considerados na Fixação do Corpo de Prova

O corpo de prova possui 10 mm de espessura, que deve ser dividida em duas partes: zona de usinagem e zona de fixação. A primeira estimativa para início dos cálculos é de 4 mm para

a fixação, destinando assim cerca de 6 mm para a usinagem. Para o dimensionamento, é necessário conhecer as forças de usinagem a seco do corpo de prova (aço inoxidável). No fresamento frontal com fresa de topo, Garcia (2019) obteve forças máximas de usinagem de aproximadamente 450 N na usinagem do aço inoxidável duplex 2205.

Os cálculos podem ser realizados a partir dos dados de acabamento da superfície e da área de fixação. A força de atrito entre as superfícies dos mordentes (Eq. 1) e do corpo de prova (CP) deve então ser superior a 450 N (Eq. 2) para a efetividade de agarre do CP. A força de aperto de um parafuso pode ser calculada utilizando a Equação (3), onde a força axial do parafuso (F_p) é a força normal que age no mordente (Eq. 4) [Shigley et al., 2011].

- Força de atrito $F_a = \mu \cdot N$ (1)

- Condição para agarre $F_a \geq F_u$ (2)

- Torque no parafuso $T = F_p \cdot k \cdot d$ (3)

- Força axial do parafuso $N = F_p$ (4)

A seleção dos parafusos foi realizada em função do torque máximo que cada medida de parafuso pode suportar [Indufix, 2023] e da força de aperto que esse torque proporciona. A força de aperto é a normal da força de atrito necessária. Conforme o esboço do projeto virtual, o espaço disponível para a inserção dos parafusos permite diâmetros de até 10 mm. A Tabela 3 exibe os torques máximos em parafusos. A força de atrito máxima para os diâmetros considerados é apresentada na Tabela 4.

Tabela 3 – Torque máximo em parafusos classe 6.9 [Indufix, 2023].

Diâmetro do Parafuso	M4	M6	M8	M10
Torque Máximo [N.m]	2,851	8,795	21,200	42,450

Tabela 4 – Forças de atrito calculadas conforme diâmetros dos parafusos.

Diâmetro do Parafuso	M4	M6	M8	M10
T [N.m]	2,851	8,795	21,2	42,45
D [m]	0,004	0,006	0,008	0,01
F_a [N] máx	534,5625	1099,375	1987,5	3183,75

Todos os diâmetros de parafusos citados permitem atingir as condições necessárias para a correta fixação do CP. Por apresentar um coeficiente de segurança baixo, não se considerou o uso de parafusos M4. O espaço limitado também desaconselha o uso de parafusos M10 devido à pequena espessura da parede que restaria no topo do dispositivo. Tanto parafusos M6 quanto M8 atendem os requisitos de projeto. Desse modo, selecionou-se parafusos M8 para maior segurança. Apesar de sobredimensionado para o equipamento, o uso de parafusos M8 não acarreta elevação significativa no custo, colaborando para um coeficiente de segurança maior. O torque a ser aplicado nos parafusos, segundo cálculos, é de no máximo 10 Nm, evitando danos ao dispositivo. Quanto aos parafusos para a fixação do dispositivo no dinamômetro, esses devem atender aos padrões de medidas pré-existentes, de modo que não foi necessário dimensioná-los. A Figura 4 ilustra o dispositivo de fixação em desenvolvimento.

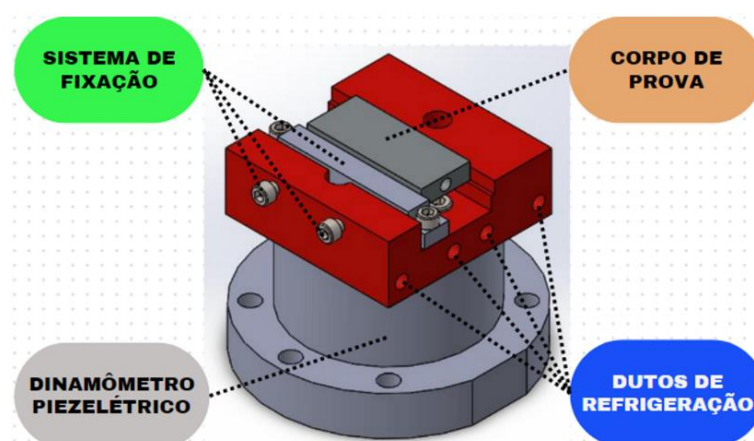


Figura 4 – Projeto mecânico do dispositivo de fixação e aquecimento acoplado ao dinamômetro piezométrico.

3.2 Aquecimento do Corpo de Prova

Como os requisitos de projeto incluem o aquecimento do corpo de prova até 400 °C, o espaço para aquecimento deve ser previsto, de modo que é necessário a escolha do método de aquecimento mais adequado ao projeto. Os métodos apresentados na Tabela 1 [Lei e Pfefferkorn, 2007] foram analisados e classificados em função do atendimento aos requisitos de projeto para aquecimento do corpo de prova, identificados de R1 a R6:

- R1: Aquecer o corpo de prova até 400 °C.
- R2: Atender as restrições dimensionais.
- R3: Permitir o controle de temperatura durante a usinagem.
- R4: Facilitar a fabricação.
- R5: Apresentar custo estimado viável.
- R6: Viabilizar o uso no centro de usinagem do LAUS-UFRGS.

O detalhamento do valor de cada requisito para cada método consta no APÊNDICE.

A análise de valoração, apresentada na Tabela 5, indica a viabilidade do uso do aquecimento por resistência. Esse método é simples e bastante utilizado em diversos tipos de dispositivos de aquecimento, tanto de fluidos como sólidos. O espaço destinado à resistência de aquecimento, (ver Fig. 3), é de aproximadamente 80 x 24 x 11 mm (C x L x A), e deve comportar a resistência e seu suporte cerâmico.

Uma das premissas da TAM é a uniformidade de temperatura no corpo de prova; desse modo, a fim de obter um aquecimento homogêneo, é importante que a resistência tenha dimensões similares às do CP. Resistências em espiral são bastante comuns, sendo usadas em aquecedores, chuveiros e secadores de cabelo, entre outras aplicações. A Figura 5 ilustra o suporte da resistência, que pode ser fabricado com cimento refratário para forno ou outro material similar. Conforme a cavidade, há espaço para uma resistência helicoidal de cerca de 5 mm de diâmetro por 152 mm de comprimento. O passo determina o comprimento total do filamento, cuja resistência pode ser medida com auxílio de um multímetro digital.

Tabela 5 – Valoração dos métodos de aquecimento para usinagem termicamente assistida.

Método de Aquecimento	R1	R2	R3	R4	R5	R6	TOTAL
Aquecimento em forno	5	5	1	1	3	5	20

Aquecimento por resistência	5	5	5	5	5	5	30
Aquecimento por indução	NA	5	5	5	5	5	25
Aquecimento por arco elétrico	3	5	3	3	3	3	20
Aquecimento por chama de gás	5	5	5	3	3	3	24
Aquecimento por arco de plasma	5	3	5	1	1	3	18
Aquecimento a laser	5	5	5	1	1	3	20
Aquecimento por feixe de elétrons	5	5	5	1	1	NA	17

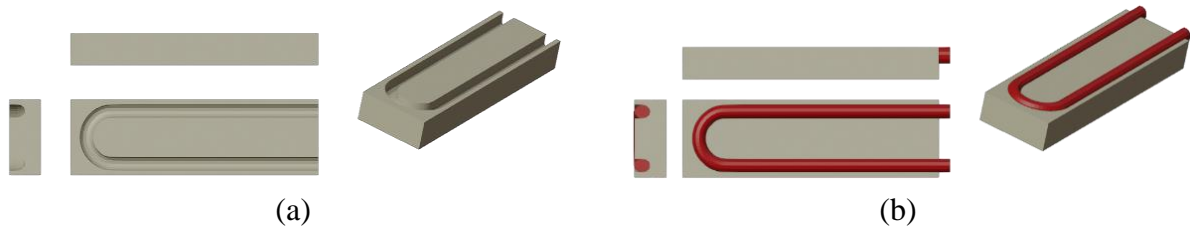


Figura 5 – Projeto: (a) suporte em material cerâmico; (b) suporte com a resistência.

Segundo Callister e Rethwisch (2013), materiais para confecção de resistências expostas ao ar devem ser ligas com alto teor de cromo e níquel. O aço inoxidável AISI 304L pode atingir com segurança temperaturas próximas a 875 °C, suficientes para atender às condições de contorno do projeto. Optou-se então por utilizar um filamento com 0,45 mm de diâmetro, com a potência utilizada sendo controlada através do ajuste da tensão com potenciômetro variável.

3.3 Seleção do Material

A seleção do material é realizada visando o melhor desempenho do dispositivo em relação aos requisitos de projeto, os materiais e suas principais propriedades são listados na Tabela 6 e foram inseridos na lista seguindo critérios como:

- mais utilizados na fabricação de morsas para fresadoras: ferros fundidos;
- amplamente utilizado na construção de peças para máquinas e equipamentos: AISI 4043;
- de baixo custo e o mais comum entre os aços carbono: AISI 1020;
- amplamente utilizados na indústria para construção de equipamentos de precisão, cirúrgicos, máquinas para o segmento alimentício entre outros: aços inoxidáveis AISI 304, AISI 308 e AISI 420.

Os valores das propriedades destes materiais foram obtidos da literatura [Callister e Rethwisch, 2013; Diniz et al, 2014; Lgsteel, 2023; Rosa, 2017; Shigley et al., 2011]; alguns dados também constam nas Tabelas A3, A4, A5 e A6 nos ANEXOS. Fica estabelecido que os materiais listados são aqueles com possibilidade de usinagem em oficina própria.

A Tabela 7 apresenta o resultado da valoração realizada em função das características dos materiais. Com base nas informações apresentadas, optou-se por usar o aço inoxidável martensítico AISI 420C. Esse material é conhecido por sua alta resistência ao desgaste e corrosão, sendo amplamente utilizado em aplicações que exigem ótima resistência mecânica, como instrumentos cirúrgicos e peças de máquinas. Sua tensão de escoamento varia entre 285 e 375 MPa sem tratamento térmico, apresentando uma resistência mecânica consideravelmente superior à dos demais aços inoxidáveis da tabela. A composição desse material está na Tabela A1 (ANEXOS). Baseado na importância de cada propriedade, um fator multiplicativo foi adicionado a fim de priorizar os principais requisitos de projeto.

Tabela 6 – Propriedades de materiais utilizados na fabricação de componentes mecânicos.

	Condutividade Térmica [W/m·K]	Tensão de escoamento [MPa]	Tenacidade [J/cm ²]	Resistência à corrosão
Fofo cinzento	40-80	120-200	Baixa	Baixa
Fofo nodular	40-80	190-250	Baixa	Baixa
AISI 4340	44-55	460-550	Média-Alta	Média a Alta
AISI 1020	40-50	210-390	Média-Baixa	Média-Baixa
AISI 304 (inox)	16-20	210-280	Alta	Alta
AISI 308 (inox)	15-18	170-250	Média	Alta
AISI 420 (inox)	24-28	285-375	Alta	Alta

Tabela 7 – Valoração para a seleção do material do dispositivo de fixação.

	Condutividade térmica(x5)	Tensão de escoamento (x4)	Tenacidade (x3)	Resistência à corrosão (x2)	TOTAL
Fofo cinzento	2	1	1	1	19
Fofo nodular	2	2	1	1	23
AISI 4340	1	5	4	4	45
AISI 1020	2	2	2	2	28
AISI 304 (inox)	5	2	5	5	58
AISI 308 (inox)	5	2	3	5	52
AISI 420 (inox)	4	4	5	5	61

3.4 Arrefecimento do Dispositivo de Fixação

Considerando que o dispositivo desenvolvido aplicará temperaturas elevadas no corpo de prova e que ela é fixada sobre o dinamômetro piezelétrico, é importante garantir que as temperaturas em sua base se mantenham em níveis controlados. Para tanto, optou-se pelo uso de um sistema de arrefecimento com dutos internos, permitindo, com algumas adaptações para redução da pressão, o uso do sistema de refrigeração do próprio centro de usinagem.

A vazão do fluido lubrificante no centro de usinagem do LAUS é de aproximadamente 400 l/h. Visando um melhor controle da temperatura, optou-se por usar o maior número de dutos possível dentro da região compreendida entre o espaço destinado à resistência de aquecimento e os espaços remanescentes entre os parafusos de fixação do dispositivo. O material do dispositivo de fixação foi selecionado levando também em consideração sua baixa condutividade térmica. O projeto para arrefecimento é composto por quatro furos de 8 mm dispostos conforme a Figura 6. Essa configuração é determinada pela disposição dos furos dos parafusos, e o mais próximo o possível da interface com o dinamômetro.

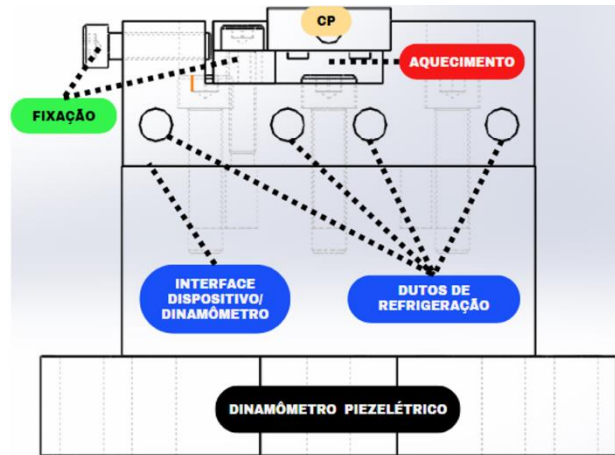


Figura 6 – Disposição dos dutos de arrefecimento

3.5 Projeto do Sistema de Controle de Temperatura

O sistema realimentado responsável por controlar a temperatura do corpo de prova é composto por um controlador PID Novus N1200 (Fig. 7), termopares tipo K e resistência.



Figura 7 – Dispositivo de controle e coleta de dados de temperatura Nivus N1200

Um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) é um dispositivo usado para controlar sistemas em malha fechada, de forma a mantê-los próximos a um valor desejado (*setpoint*). Ele utiliza três componentes principais para realizar esse controle: proporcional, integral e derivativo. O controlador PID combina esses três componentes para gerar o sinal de controle total, que é aplicado ao sistema para ajustar a variável controlada em direção ao *setpoint*. Os parâmetros do controlador precisam ser ajustados de acordo com as características específicas do sistema controlado para obter um desempenho ideal. Isso é feito através de testes e ajustes iterativos, muitas vezes chamados de "sintonia", para garantir que o controlador opere de maneira estável, rápida e sem oscilações indesejadas [Silva e Almeida, 2014].

3.6 Fabricação dos Componentes

O processo consistiu em fabricar os componentes do dispositivo de fixação em aço inoxidável AISI 420C e a resistência de aquecimento do corpo de prova.

3.6.1 Corpo e Mordente

A fabricação do corpo do dispositivo foi realizada em oficina própria do autor e envolveu predominantemente os processos de fresamento e furação utilizando uma fresadora

convencional equipada com avanço automático no eixo X. O material base possui dimensões de 105 × 105 × 80 mm. Portanto, foi necessário realizar o esquadrejamento utilizando uma fresa de topo, atuando nos eixos X e Y nas laterais do paralelepípedo. Após a usinagem da lateral, esta foi posicionada com a face já usinada voltada para baixo, procedendo-se ao faceamento da face oposta, repetindo o primeiro passo descrito. Dessa forma, obteve-se o conjunto de três pares de faces, que são ortogonais entre si e paralelas aos respectivos pares.

Com o material base esquadrejado, o desbaste foi feito para a aquisição da geometria desejada conforme a sequência de processos apresentada na Figura 8: primeiro o esquadrejamento (Fig. 8a), seguido pela obtenção da altura de 50 mm requerida para o projeto. Foi necessário realizar a furação por conta da posição conflitante entre os furos e a borda do alojamento de fixação (Fig. 8b). Por fim, o desbaste da cavidade de fixação foi realizado (Fig. 8c), inicialmente nas laterais com uma fresa de topo de 6 mm e posteriormente com uma ferramenta de porta inserto de 25 mm (bailarina) para desbaste da parte central.

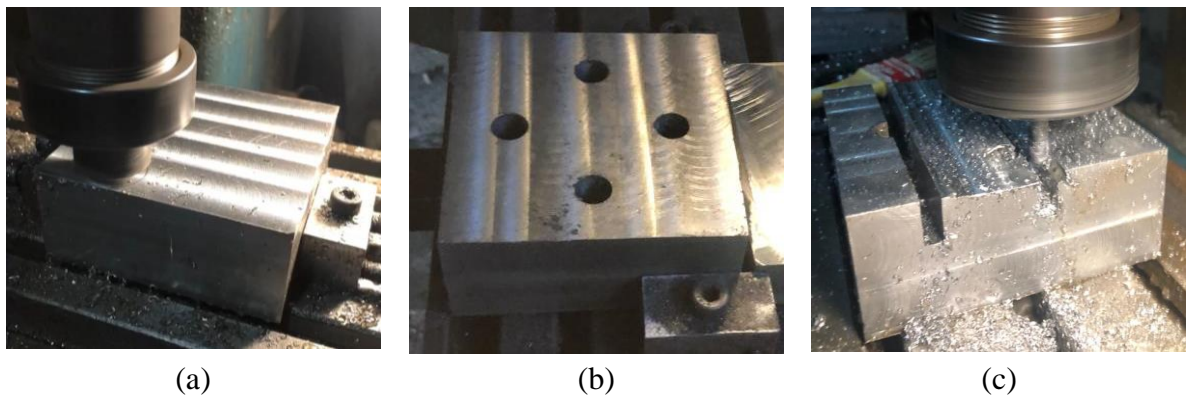


Figura 8 – Etapas da usinagem do dispositivo: (a) esquadrejamento e altura; (b) furos para a fixação no dinamômetro; (c) desbaste da cavidade de fixação.

Os furos para arrefecimento devem ter diâmetro superior a 8 mm por conta do comprimento das brocas disponíveis, e 10 mm de diâmetro máximo para não perfurar os furos dos parafusos de fixação. Assim, os furos foram realizados em uma furadeira de bancada.

3.6.2 Resistência de Aquecimento

A resistência foi produzida através do enrolamento do filamento em uma haste cilíndrica com auxílio de uma parafusadeira, como ilustra a Figura 9. Para atender os requisitos de projeto, essa resistência deve ter em torno de 4,5 mm de diâmetro e 152 mm de comprimento, sendo conformada em forma de “U” para posterior encaixe na base cerâmica (ver Fig. 5).



Figura 9 – Fabricação da resistência de aquecimento do corpo de prova.

4 RESULTADOS

Os testes de aquecimento e arrefecimento foram realizados em uma bancada experimental (Fig. 10). Os itens que compõem a bancada são: dispositivo de fixação, resistência, regulador de tensão, fonte de fluido refrigerante, mangueiras, termômetro de contato, pirômetro, corpo de prova, recipiente de medição de líquido, cronômetro, multímetro digital.



Figura 10 – Bancada experimental para testes de temperatura

A fonte de fluido refrigerante foi conectada nas duas entradas localizadas próximo à base do dispositivo de fixação. O fluido foi aplicado a uma vazão de fluido de 400 l/h, conforme requerimento de projeto. A resistência foi conectada em série com o regulador de tensão permitindo assim o ajuste da potência fornecida à resistência. O corpo de prova foi pintado de preto visando facilitar a leitura com o pirômetro. O potenciômetro variável foi ajustado gradualmente até que a temperatura do CP atingisse temperaturas próximas a 400 °C. O tempo necessário para o aquecimento foi de 10 min. A medição da temperatura na base do dispositivo foi efetuada pelo termômetro de contato em quatro orifícios, sendo um em cada face lateral e próximos à base. Os dados de temperatura foram coletados em intervalos de 1 min, e organizados no gráfico da Figura 11.

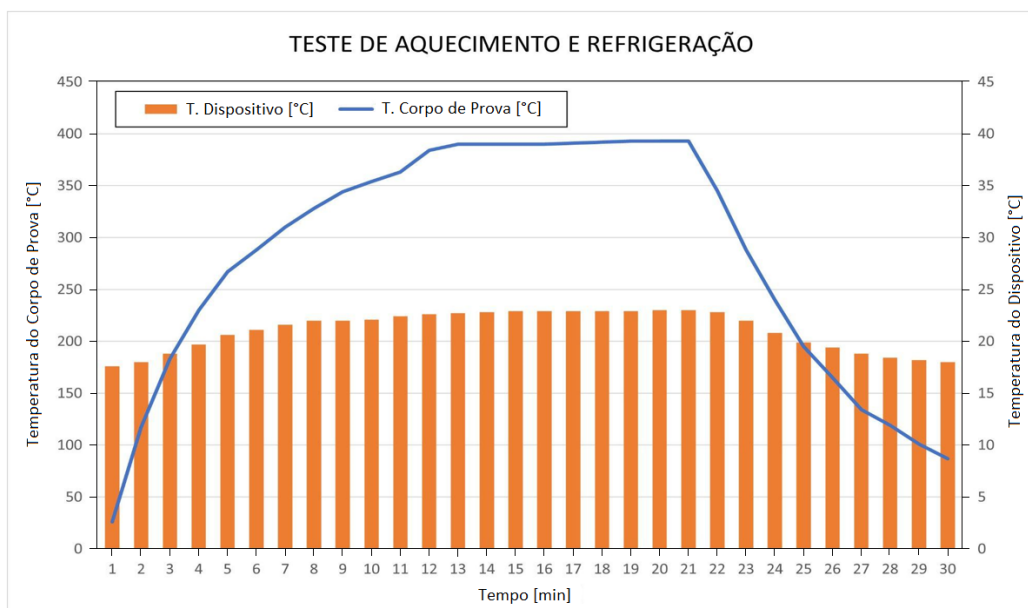


Figura 11 – Temperaturas do corpo de prova (linha azul) na escala de 0 a 450 °C e na base do dispositivo de fixação (colunas laranjas) na escala de 0 a 45 °C, ao longo de 30 min.

Observa-se que o CP atingiu a temperatura esperada (cerca de 400 °C), enquanto a temperatura na base do dispositivo se manteve significativamente abaixo dos 23 °C. As temperaturas estabilizaram após 12 min. Aos 20 min, a resistência foi desligada e a coleta de dados prosseguiu até os 30 min.

O teste de fixação do corpo de prova foi realizado no centro de usinagem (LAUS-UFRGS), com a montagem do dispositivo de fixação sobre o dinamômetro piezelétrico e este na base da máquina operatriz (Fig. 12). Foram realizados 15 passes de fresamento frontal a seco, em três corpos de prova, em ambas as faces, variando-se os parâmetros de corte. A força de usinagem máxima medida foi de aproximadamente 400 N na condição com velocidade de corte de 100 m/min, avanço por dente de 0,1 mm/dente e profundidade de corte de 0,6 mm (com VB = 0,5 mm). Em nenhum dos passes, o CP se deslocou ou se despreendeu do equipamento.

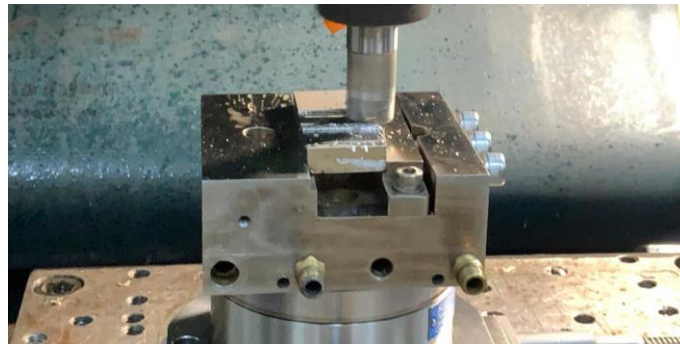


Figura 12 – Montagem do dispositivo no centro de usinagem e fresamento do corpo de prova.

5 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi o projeto e a fabricação de um dispositivo de fixação e aquecimento de corpos de prova utilizado para o fresamento termicamente assistido. Visando garantir a obtenção de resultados confiáveis nesse processo, é fundamental que o equipamento atenda de forma eficiente e segura os requisitos de projeto estabelecidos.

Com base nos testes realizados na bancada experimental, constatou-se que o dispositivo atendeu de forma satisfatória os requisitos de projeto, sendo capaz de aquecer o corpo de prova nas temperaturas preestabelecidas, ao mesmo tempo em que mantém a temperatura na interface com o dinamômetro em patamares seguros para o dispositivo. Os testes de usinagem puderam também comprovar a eficácia do dispositivo na fixação da peça submetida a uma força de usinagem de aproximadamente 400 N.

Os principais desafios enfrentados durante o desenvolvimento do projeto estiveram atrelados às restrições geométricas (espaço disponível). Mesmo assim, o dispositivo obteve um desempenho aceitável em relação ao propósito para o qual foi concebido.

Apesar dos resultados positivos, oportunidades de melhorias foram identificadas. A incorporação de um amperímetro em série com a resistência pode permitir um ajuste mais preciso da potência utilizada. Também deve-se estabelecer um controle da pressão do sistema de lubrificação-refrigeração da máquina-ferramenta para que se possa utilizá-lo no arrefecimento do dispositivo de fixação. Ambas merecem uma análise mais detalhada em estudos futuros.

6 REFERÊNCIAS

Callister, W. D., Rethwisch, D. G., 2013. “**Materials Science and Engineering: An Introduction**”. 9. ed., Hoboken, Wiley.

Chaves, D. F., 2016. “**Caracterização das propriedades mecânicas do ferro fundido nodular GGG-40 para modelagem computacional em componentes automotivos**”. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Automotiva, UNB/FGA, Brasília, DF.

Diniz, A. E, Marcondes, F. C., Coppini. N. L., 2014. “**Tecnologia da Usinagem dos Metais**”. 9. ed., São Paulo, Artliber.

Egorov, F., 2013 “Hot machining: utilization of the forging heat for efficient turning at elevated temperatures”. **Advanced Materials Research**, v. 769, p. 93-100.

Favorit, 2023. “**Nossos-Produtos/Acos-Inoxidaveis/Aco-Aisi-420-C**” Disponível em: <<https://favorit.com.br/nossos-produtos/acos-inoxidaveis/aco-aisi-420-c>>. Acesso em 01/08/2023.

Favorit, 2023. “**Tabelas/ Aços Inoxidáveis**” Disponível em: <https://favorit.com.br/tabelas/acos_inoxidaveis.html>. Acesso em 01/08/2023.

Ganta, V., Sagar, K. S., Chakradhar, D., 2017, “Multi objective optimisation of thermally enhanced machining parameters of Inconel 718 using grey relational analysis”. **International Journal of Machining and Machinability of Materials**, v. 19, n. 1, p. 57-75.

Garcia, R. F., 2019. “**Análise comparativa do fresamento frontal de acabamento em aços inoxidáveis duplex DX 2205 e LDX 2101**”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, RS.

Gaskell, D. 2008. “**Introduction to the Thermodynamics of Materials.**” 5. ed., Boca Raton, CRC Press.

Indufix, 2023. “**Torque de Parafuso**” Disponível em <<https://www.indufix.com.br/tag/torque-de-parafuso/>> Acesso em 20/07/2023.

Lei, S., Pfefferkorn, F., 2007. “A review of thermally assisted machining”. **Proceedings of the ASME International Conference on Manufacturing Science and Engineering**, Atlanta, GA, October 15-18, p. 1–12.

Lgsteel, 2023. “**Propriedades Mecânicas dos Aços Inoxidáveis**” Disponível em: <<http://lgsteel.com.br/propriedade-mecanica-dos-inoxidaveis.htm>>. Acesso em: 01/08/2023.

Lgsteel, 2023. “**Propriedades Mecânicas Dos Aços.**” Disponível em: <<http://lgsteel.com.br/propriedades-mecanicas-do-carbono.htm>>. Acesso em: 01/08/2023.

Mac, T. B., Dinh, V. C., Banh, T. L., Nguyen, D. T., 2018 “Cutting force model for thermal-assisted machining of tool steel based on the Taguchi method”. **Metals**, v. 8, p. 992.

Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Silva, M. B., 2015 “**Fundamentos da Usinagem dos Metais**”, 2. ed., São Paulo, Blucher.

Madhavulu, G., Ahmed, B., 1994. “Hot machining process for improved metal removal rates in turning operations” **Journal of Materials Processing Technology**, v. 44, n. 3-4, p. 199-206.

Maity, K. P., Swain, P. K. 2008 “An experimental investigation of hot-machining to predict tool life” **Journal of Materials Processing Technology**, v 198, n. 1–3, p. 344-349.

Rosa, G. C., 2017. “**Estudo da usinabilidade no torneamento a seco do aço inoxidável martensítico AISI 420 c endurecido com ferramenta de metal-duro**”. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, RS.

Santos; S. C. E Sales, W. F., 2007 “**Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**”, São Paulo, Artliber.

Shigley, J. E., Mitchell, L. D., Saunders, H., 2011. **Mechanical Engineering Design**. 9. ed., Ney York, McGraw-Hill.

Silva, V. D., Almeida, W. A., 2014. “**Desenvolvimento de controlador PID digital de nível com Arduino e sensor capacitivo**” Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, Instituto Doctum de Educação e Tecnologia, Caratinga, MG.

ANEXOS

Tabela A1 – Composição do aço inoxidável AISI 304L da resistência [Favorit, 2023]

Composição do aço inoxidável AISI 304L		
Carbono	% máx	0,03
Manganês	% máx	2
Fósforo	% máx	0,045
Cromo	%	17,5 a 19,5
Níquel	%	8 a 12

Tabela A2 – Composição do material selecionado [Favorit, 2023]

Componentes químicos que constituem a liga de aço inoxidável AISI 420		
Carbono	(%)	0.15 min
Manganês	(%)	1.00 máx
Fósforo	(%)	0.040 máx
Enxofre	(%)	0.030 máx
Silício	(%)	1.00 máx
Cromo	(%)	12.00 a 14.00

Tabela A3 – Propriedades de metais utilizados na indústria automotiva [Chaves, 2016]

Liga	Limite de resistência à tração [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Módulo de elasticidade [GPa]	Alongamento Percentual	Coefficiente de Poisson
Ferro fundido nodular GGG-40	444	305	253	12	0,28
Ferro fundido maleável ASTM A-197	276	-	172	5	0,28
Ferro fundido Cinzento ASTM 2	179	-	67	0,6	0,28
Aço estrutural A36	400	250	200	30	0,32
Aço inoxidável 304	517	207	193	40	0,27

Tabela A4- Propriedades de aço inoxidável martensítico [Lgsteel, 2023]

Tipo de Aço ABNT	Estado	Resistência à tração [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Dureza Rockwell
410	recozido	490,0	315,0	B 80
420	recozido	665,0	350,0	B 92

Tabela A5 – Propriedades de aço inoxidável austenítico [Lgsteel, 2023]

Tipo de Aço ABNT	Estado	Resistência à tração [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Dureza Rockwell
304	recozido	588,0	294,0	B 80
304L	recozido	567,0	273,0	B 79

Tabela A6 – Propriedades mecânicas dos aços [Lgsteel, 2023]

Tipo de Aço AISI	Estado	Resistência à tração [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Dureza HB
1020	recozido	395	295	111
4340	recozido	650	475	217

APÊNDICE

Valoração dos métodos de aquecimento para o corpo de prova (CP):

Aquecimento em Forno		Conceito
R1	O método é capaz de elevar a temperatura do corpo de prova até a temperatura de 400 °C com distribuição próxima a uniforme	Ótimo
R2	Sistema externo ao dispositivo	Ótimo
R3	O método não permite o controle de temperatura durante a usinagem	Ruim
R4	Além do sistema de resistência ou chama de gás o equipamento necessita de cofre de aquecimento com estrutura metálica revestida com material refratário	Ruim
R5	Disponível para venda e com custos de fabricação de valores razoáveis	Médio
R6	Plenamente viável o seu uso no LAUS	Ótimo

Aquecimento por Resistência		Conceito
R1	O método é capaz de elevar a temperatura do corpo de prova até a temperatura de 400 °C com distribuição próxima a uniforme	Ótimo
R2	Permite a instalação no espaço restrito abaixo do CP	Ótimo
R3	O método permite o controle de temperatura de forma controlada durante a usinagem	Ótimo
R4	Sistema de fácil fabricação	Ótimo
R5	Sistema com valor irrisório	Ótimo
R6	Plenamente viável o seu uso no LAUS	Ótimo

Aquecimento por Indução		Conceito
R1	Não exerce aquecimento por indução em metais não ferro magnéticos	NA
R2	Permite a instalação no espaço restrito abaixo do CP	Ótimo
R3	O método permite o controle de temperatura de forma controlada durante a usinagem (no caso de ferro magnéticos)	Ótimo
R4	Sistema de fácil fabricação	Ótimo
R5	Sistema de baixo custo	Ótimo
R6	Plenamente viável o seu uso no LAUS	Ótimo

Aquecimento por Arco Elétrico		Conceito
R1	O método é capaz de elevar a temperatura do corpo de prova até a temperatura de 400 °C de forma não uniforme	Médio
R2	Sistema externo ao dispositivo	Ótimo
R3	O método permite o controle razoável de temperatura durante a usinagem	Médio
R4	Sistema de grau médio de complexidade para fabricação	Médio
R5	Inversores e transformadores de solda com custos razoáveis	Médio
R6	Viável o seu uso no LAUS	Médio

Aquecimento por Chama de Gás		Conceito
R1	O método é capaz de elevar a temperatura do corpo de prova até a temperatura de 400 °C com distribuição próxima a uniforme	Ótimo
R2	Sistema externo ao dispositivo ou instalado no espaço restrito abaixo do CP.	Ótimo
R3	O método permite o controle razoável de temperatura durante a usinagem	Médio
R4	Sistema de grau médio de complexidade para fabricação	Médio
R5	Necessita de cilindros de gás mangueiras, e sistema de segurança elaborado	Médio
R6	Viável o seu uso no LAUS (com adaptações de segurança)	Médio

Aquecimento por Arco de Plasma		Conceito
R1	O método é capaz de elevar a temperatura do corpo de prova até a temperatura de 400 °C de forma não uniforme	Médio
R2	Sistema externo ao dispositivo	Ótimo
R3	O método permite o controle razoável de temperatura durante a usinagem	Médio
R4	Sistema de elevado grau de complexidade para fabricação	Médio
R5	Conjunto para produzir arco de plasma com custo médio para alto (Inversora, cilindro de gás ionizado, cilindro de gás inerte, tocha,	Médio
R6	Viável o seu uso no LAUS com moderadas adaptações	Médio

Aquecimento por Feixe de Elétrons		Conceito
R1	O método é capaz de elevar a temperatura do corpo de prova até a temperatura de 400 °C com distribuição próxima a uniforme	Ótimo
R2	Sistema externo ao dispositivo	Ótimo
R3	O método permite o controle de temperatura durante a usinagem	Ótimo
R4	Sistema de alta complexidade para fabricação	Ruim
R5	Método de alto custo para aquisição	Ruim
R6	Necessita de vácuo	NA