



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

LUIZ GUILHERME MARECO VIANA

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE UMA MÁQUINA PARA
REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO**

ANANINDEUA – PA
2024

LUIZ GUILHERME MARECO VIANA

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE UMA MÁQUINA PARA
REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais, da Universidade Federal do Pará, Campus Ananindeua, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Edemarino Araújo Hildebrando.

Coorientador: Prof. Dr. Pedro Paulo Guimarães Ribeiro

LUIZ GUILHERME MARECO VIANA

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE UMA MÁQUINA PARA
REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais, da Universidade Federal do Pará, Campus Ananindeua, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Data de aprovação: 26/09/2024

Conceito: Excelente

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Edemarino Araújo Hildebrando
(FEMat/CANAN/UFPA – Orientador)

Prof. Dr. Pedro Paulo Guimarães Ribeiro
(FEMat/CANAN/UFPA – Coorientador)

Prof. Dr. Marcos Benedito Caldas Costa
(FEMat/CANAN/UFPA)

Prof. Me. Alacid do Socorro Siqueira Neves
(FEMat/CANAN/UFPA)

Aos meus pais, que nunca me deixaram faltar amor, apoio e incentivo para que isso se tornasse possível.

AGRADECIMENTOS

A Deus,

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus por me conceder a vida e por nunca me desamparar nos momentos em que pensei em desistir.

Aos meus pais, Sandro Viana e Rosane Mareco, que sempre me apoiaram e incentivaram em todas as áreas da minha vida. Sem eles, nada disso seria possível. Um agradecimento especial ao meu pai, que esteve ao meu lado, correndo para cima e para baixo durante a confecção do projeto. Obrigado, pai.

Ao meu irmão, Marcos Viana, que nunca me disse "não" quando precisei de sua ajuda e auxílio. Agradeço também por me dar o maior presente da minha vida: meu afilhado.

Ao meu afilhado, Caetano Viana, que, mesmo sem saber, foi essencial para me reerguer com cada abraço e sorriso.

Aos meus amigos do LAFOC, com quem tive a sorte de compartilhar esta jornada: Jenniffer Santos, Maria Bria, João Ferreira, Andreza Dias, Andrio Pinheiro, Michele Santos, e Rochelle Matos. Vocês tornaram minha trajetória acadêmica mais tranquila e feliz. Nossas conversas estarão para sempre em minhas memórias.

À minha companheira, Sarah Souza, que esteve ao meu lado durante esse processo, me apoiando, acreditando em mim e ajudando diretamente neste trabalho. Você foi mais essencial do que imagina e sem você eu não teria conseguido, muito obrigado momo, para sempre eu serei grato a você por tudo que fez por mim, dentro e fora deste trabalho.

Aos meus amigos que compartilharam comigo a jornada como "Bolsistas" na Coordenação, em especial Elayne Siqueira, Manoel Monteiro e Nathalia Nogueira. Obrigado pelos momentos de distração e alegria em meio ao estresse diário.

À minha amiga Thaissa Costa, por acreditar em meu potencial e por tornar minhas manhãs de trabalho mais leves e divertidas.

Ao meu amigo e colega de laboratório Adailton Borges por ter me auxiliado e ser meu parceiro na produção dos corpos de provas utilizados neste trabalho, além de fornecer dados essenciais para produção deste presente trabalho.

Ao Prof. Dr. Edemarino Hildebrando, meu orientador, por toda a paciência, por acreditar na minha capacidade de realizar este trabalho e por me fornecer todo o conhecimento, apoio e suporte necessário. Ao Prof. Dr. Pedro Ribeiro, meu coorientador, pela disponibilidade e suporte para a finalização deste trabalho.

À Faculdade de Engenharia de Materiais – FEMat, por todo o suporte fornecido ao longo desses anos, e ao corpo docente por todo o conhecimento compartilhado dentro e fora da sala de aula. Ao Campus Universitário de Ananindeua e a UFPA pela oportunidade de ter uma profissão, pelo suporte e por me proporcionar tantas experiências incríveis.

“Slow down you crazy child

Take the phone off the hook and disappear for a while

It's alright, you can afford to lose a day or two (ooh)

When will you realize, Vienna waits for you?”

VIENNA (Billy Joel, 1977)

RESUMO

A evolução dos materiais na indústria tem sido constante ao longo da história, com períodos dedicados à pesquisa de novos materiais e suas possíveis aplicações. Nesse contexto, a realização de ensaios mecânicos desempenha um papel fundamental para compreender as propriedades mecânicas visando a melhor aplicação em projetos de engenharia. O presente trabalho teve como objetivo projetar e construir um protótipo de uma máquina de ensaios mecânicos portátil e de baixo custo, voltada para a realização de ensaios de resistência à flexão de 3 pontos em materiais cerâmicos, com finalidades didáticas. O protótipo foi projetado por meio de software de modelagem 3D (SketchUP), e na confecção de seus componentes estruturais utilizou-se em sua maioria produtos reutilizados, oriundos de oficinas mecânicas, “ferro velho” dentre outros, com intuito de tornar o projeto mais acessível economicamente. Utilizando o princípio de momento, foram calculadas todas as medidas e massas necessárias para garantir a geração da força mínima exigida para os ensaios de resistência à flexão em materiais cerâmicos, mais precisamente cerâmicas vermelhas (telhas e tijolos), conforme estabelecido pelas Normas ABNT NBR 15310/2009 e ABNT NBR 15270/2017. Os corpos de prova empregados na validação dos resultados do equipamento e o método de ensaio foram baseados na norma ASTM C674-13/2018, que estabelece os parâmetros para a realização de ensaios de flexão em corpos de prova cerâmicos. Para validar os resultados do protótipo, foram comparados os resultados de ensaios do protótipo com o de uma máquina universal de ensaios comercial, InterMetric modelo iM50. A Análise de Variância (ANOVA) foi a ferramenta estatística utilizada para verificar se houve diferenças significativas nas médias entre os grupos, seguida pelo teste de Tukey com um nível de confiança de 95%. Os resultados mostraram que esse trabalho alcançou seus objetivos em projetar e construir um protótipo de máquina de ensaios de Resistência à Flexão (MRF) de 3 pontos, atendendo os objetivos do projeto com uma margem de erro de 2,34% a 7,64%. A comparação dos ensaios indicou que o protótipo é capaz de gerar dados úteis para fins didáticos.

Palavras-chave: Ensaios Mecânicos; Baixo custo; Resistência à flexão; Princípio de Momento.

ABSTRACT

The evolution of materials in the industry has been constant throughout history, with periods dedicated to the research of new materials and their possible applications. In this context, performing mechanical tests plays a fundamental role in understanding the mechanical properties, aiming for the best application in engineering projects. The present work aimed to design and build a prototype of a portable and low-cost mechanical testing machine, intended for three-point flexural strength testing of ceramic materials, with didactic purposes. The prototype was designed using 3D modeling software (SketchUP), and during the fabrication of its structural components, mostly reused materials were utilized, sourced from mechanical workshops, scrapyards, among others, with the goal of making the project more economically accessible. Using the principle of moment, all the necessary measurements and masses were calculated to ensure the generation of the minimum force required for flexural strength tests on ceramic materials, more specifically red ceramics (roof tiles and bricks), as established by the Standards ABNT NBR 15310/2009 and ABNT NBR 15270/2017. The test specimens used in validating the results of the equipment and the testing method were based on the ASTM C674-13/2018 standard, which sets the parameters for performing flexural tests on ceramic test specimens. To validate the prototype's results, they were compared with those from a commercial universal testing machine, InterMetric model iM50. Analysis of Variance (ANOVA) was the statistical tool used to verify if there were significant differences in the means between the groups, followed by the Tukey test with a 95% confidence level. The results showed that this work achieved its objectives in designing and building a prototype of a three-point Flexural Strength Testing Machine (MRF), meeting the project goals with an error margin ranging from 2.34% to 7.64%. The comparison of the tests indicated that the prototype is capable of generating useful data for educational purposes.

Keywords: Mechanical Testing; Low Cost; Flexural Strength; Moment Principle

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Representação de um corpo de prova durante um ensaio de flexão	21
Figura 02 - Parâmetros para seções transversais retangular e circulares.....	22
Figura 03 - Máquina Universal de Ensaio InterMetric	25
Figura 04 - Momento de uma força	27
Figura 05 - Princípio de momentos	27
Figura 06 - Tipos de alavanca e as forças aplicadas sobre elas	28
Figura 07 - Primeira versão do protótipo.....	32
Figura 08 - Mecanismo de variação de força da primeira versão.....	33
Figura 09 - Segunda versão do Protótipo vista lateral.....	33
Figura 10 - Variação da distância do peso	34
Figura 11 - Braço de alavanca	34
Figura 12 - Base H do protótipo	35
Figura 13 - Confeção do cutelo.....	35
Figura 14 - Carrinho	36
Figura 15 - Sistema de movimento.....	37
Figura 16 - Torque de uma força sobre o braço de alavanca	37
Figura 17 - Elemento de massa dm	38
Figura 18 - Aplicação do centro de massa nos braços de alavanca	39
Figura 19 - Forças envolvidas no sistema	39
Figura 20 - Sistema de contrapeso.....	41
Figura 21 - DCL para cálculo de massa mínima	42
Figura 22 - Célula de carga.....	43
Figura 23 - (a) m_1 à $0,15m$ do eixo O; (b) m_1 à $0,3m$ do eixo O; (c) m_1 à $0,8m$ do eixo O..	44
Figura 24 - Forças do sistema aplicadas nas células do Excel	45
Figura 25 - Programação em blocos	46
Figura 26 - Interface de usuário.....	47
Figura 27 - Cálculo em blocos de programação	48
Figura 28 - Matriz de Corpo de prova	50
Figura 29 - Corpos de Prova.....	51
Figura 30 - Ensaio testes na máquina universal	52
Figura 31 - Aparato para conter célula de carga.....	54

Figura 32 - Esticador de corrente	54
Figura 33 - Ensaio de MRF - (a) Máquina Universal de ensaios; (b) Protótipo	56
Figura 34 - Desvio padrão dos resultados encontrados a partir da máquina universal	57
Figura 35 - Desvio padrão dos resultados encontrados a partir do protótipo	58
Figura 36 - Comparação de médias de MRF	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Parâmetros para seções transversais retangular e circular	22
Tabela 02 - Materiais utilizados.....	31
Tabela 03 - Relação Distância x Força	45
Tabela 04 - Variáveis do APP	47
Tabela 05 - Parâmetros ANOVA.....	49
Tabela 06 - Comparativo de resultados preliminares	53
Tabela 07 - Resultados pós modificações.....	55
Tabela 08 - Módulos de resistência à flexão máquina comercial	56
Tabela 09 - Módulos de resistência à flexão obtidos no protótipo	57
Tabela 10 - Análise de variância entre os grupos	59
Tabela 11 - Teste de Tukey entre grupos	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

σ	.....	Tensão
μ	.....	Densidade linear
ABNT	.....	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	.....	American Society for Testing and Materials
b	.....	Largura dos corpos de prova
c	.....	Distância do eixo neutro
cm	.....	Centímetros
CP	.....	Corpo de prova
Dms	.....	diferença mínima significativa
F	.....	Força
\vec{F}_m	.....	Força mínima
g	.....	Gramas
h	.....	Espessura dos corpos de prova
I	.....	Momento de inércia da seção da seção transversal
in	.....	Polegadas
kg	.....	Quilograma
kgf	.....	Quilograma força
M	.....	Momento fletor máximo
MPa	.....	Megapascal
MRF	.....	Módulo de Ruptura à Flexão
M_0	.....	Momento de força
N	.....	Newton
\vec{P}_{co}	.....	Força gerada pela massa da corrente
\vec{P}_c	.....	Força gerada pela massa da coroa
\vec{P}_{xm}	.....	Força gerada pela massa do braço de alavanca
$\vec{P}_{x'm}$	.....	Força gerada pela massa do braço de contrapeso
\vec{P}_b	.....	Força gerada pela massa de contrapeso
\vec{P}_a	.....	Massa necessária
R	.....	Raio
Un	.....	Unidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
1.2	JUSTIFICATIVA	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	ENSAIOS MECÂNICOS DOS MATERIAIS	18
2.1.1	Ensaio Destrutivo e Não Destrutivo	19
2.1.2	Ensaio de Flexão	20
2.2	ENSAIOS MECÂNICOS EM MATERIAIS CERÂMICOS	23
2.3	MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIO	24
2.3.1	Corpo de prova	25
2.4	PRINCÍPIO DE MOMENTO DE UMA FORÇA	26
2.4.1	Estudo do mecanismo de alavancas	28
2.5	TEORIA DO ERRO	29
2.6	PREPOSIÇÃO DO PROJETO	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	PROJETO	31
3.1.1	Materiais para confecção	31
3.1.2	Modelagem do Projeto	32
3.1.3	Montagem do Protótipo	34
3.2	MEMORIAL DE CÁLCULOS DE PROJETO	37
3.2.1	Torque de uma força sobre a barra	37
3.2.2	Encontrando o equilíbrio do sistema	39
3.2.3	Força mínima de ensaio	41
3.2.4	Regulando e quantificando as forças de ensaio	44
3.2.5	Desenvolvimento do Aplicativo Mobile para Cálculo de Força e Resistência à Flexão	46
3.2.6	Análise estatística	48
3.2.7	Confecção de Corpos de Prova para Ensaios	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52

4.1 TESTES INICIAIS	52
4.2 MODIFICAÇÕES PROPOSTAS	53
4.3 CALIBRAÇÃO.....	55
4.4 ENSAIOS COMPARATIVOS PARA VALIDAÇÃO	55
4.4.1 Ensaio máquina universal.....	56
4.4.2 Ensaio protótipo.....	57
4.4.3 Validação dos resultados	59
5 CONCLUSÃO	61
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
REFERÊNCIAS.....	63
APÊNDICE A - MEMORIAL DE CÁLCULO DO PROJETO MECÂNICO.....	66
APÊNDICE B - DESENHOS DE PEÇAS MECÂNICAS DO EQUIPAMENTO.....	71

1 INTRODUÇÃO

Desde os tempos antigos, a busca pela evolução dos materiais é constante, sendo desenvolvidos e introduzidos na indústria, como por exemplo, em determinados espaços de tempo no decorrer da história, houve décadas em que a pesquisa estava descobrindo e estudando diferentes tipos de materiais com objetivo de obter conhecimento acerca de suas propriedades e possíveis aplicações (Nejeliski, 2021).

Segundo Callister (2021), pode-se classificar os materiais sólidos em 3 (três) categorias básicas, sendo elas os metais, polímeros e cerâmicas. O delineamento desse esquema se fundamenta essencialmente na composição química e na organização estrutural em nível atômico. Além disso, há os compósitos, que são construções planejadas que combinam duas ou mais substâncias em uma única estrutura. Portanto, é crucial ter um conhecimento prévio desses materiais, a fim de realizar ensaios adequados para o tipo de material em questão e, posteriormente, compreender sua resposta aos esforços mecânicos.

O comportamento mecânico de um material reflete a relação entre sua resposta ou deformação sob a ação de uma carga ou força aplicada, dessa forma, as propriedades mecânicas essenciais para o projeto incluem rigidez, resistência, dureza, ductilidade e tenacidade.

A avaliação das propriedades mecânicas dos materiais é realizada por meio de experimentos de laboratório cuidadosamente planejados, que reproduzem, da maneira mais precisa possível, as condições reais de uso, para isso, são conseguidas com o emprego de técnicas de ensaio padronizadas. Dentre os fatores a serem considerados, destacam-se a natureza da carga aplicada, sua duração e as condições ambientais envolvidas.

A carga pode ser de tração, compressão ou cisalhamento, e sua magnitude pode ser constante ao longo do tempo ou variável. As propriedades mecânicas são objeto de interesse de diversos grupos, como fabricantes e consumidores de materiais, organizações de pesquisa e agências governamentais, cada um com seus próprios interesses. Portanto, é crucial que haja consistência na realização dos testes e na interpretação dos resultados obtidos (Callister, 2021).

O Brasil tem usufruído, ao longo de várias décadas, da importação de equipamentos científicos, ferramentas e máquinas de ensaio de outros países. No entanto, com o decorrer do tempo, muitas vezes esses equipamentos se encontram em estado precário ou desatualizados, apesar dos investimentos públicos em reformas e aquisição de novos dispositivos. Isso gera dificuldades na revitalização desses equipamentos, os quais são fundamentais para apoiar o

ensino prático e garantir uma formação de qualidade para os estudantes na área de tecnologia (Nakazato, 2019).

Ainda segundo Nakazato (2019), é importante ressaltar que o aprendizado prático desempenha um papel crucial ao incentivar a continuidade dos estudos e a formação de futuros pesquisadores altamente qualificados em diversas áreas do conhecimento no país. Portanto, o propósito deste estudo consiste em desenvolver e fabricar um protótipo de uma Máquina de Ensaio Mecânico portátil, de baixo custo, com finalidades educacionais.

Para isso, utilizou-se como referência o ensaio de flexão de 3 (três) pontos, o qual envolve a aplicação progressiva de uma carga em pontos definidos de uma barra de geometria conhecida, comumente apoiada em dois pontos ou com suportes fixos em suas extremidades, onde o mesmo é comumente utilizado para realizar ensaios em materiais cerâmicos, isto, pois é possível obter dados quanto ao módulo de resistência à flexão do material cerâmico, e assim, possibilitando explorar conceitos relacionados ao comportamento mecânico dos mesmos. Essa máquina portátil poderá ser facilmente transportada para uma sala de aula, promovendo assim uma compreensão e assimilação mais efetivas do conteúdo por parte dos alunos.

1.1 **Objetivos**

1.1.1 Objetivo Geral

Projetar e construir um protótipo de uma Máquina de Ensaio Mecânico portátil, de baixo custo, para fins didáticos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Montar e produzir um artefato/protótipo para determinação do módulo de ruptura à flexão de 3 pontos de materiais cerâmicos utilizando o conceito do princípio da alavanca;
- Calibrar, testar e validar os resultados do protótipo através de testes comparativos com máquinas de ensaios comerciais;
- Contribuir com o ensino prático e experimental usando um equipamento de construção simples, leve e compacto, de fácil transporte e baixo custo de manutenção.

1.2 Justificativa

A escolha pela construção do protótipo de uma máquina de ensaio de resistência à flexão justifica-se pelo fato de os equipamentos estarem, muitas vezes, defasados ou sucateados, prejudicando o aprendizado prático ou aplicado, que também acaba por motivar e incentivar a continuidade dos estudos. Esse aprendizado é parte fundamental na formação de potenciais pesquisadores, que futuramente poderão realizar descobertas tecnológicas e inovadoras nas diversas áreas do conhecimento.

Com base nessa necessidade, juntamente com o alto custo para obtenção de uma máquina universal de ensaios (US\$55.000,00), a proposta desse projeto é a de desenvolver um equipamento didático que realize ensaios mecânicos de resistência à flexão em materiais cerâmicos e que auxilie no ensino das disciplinas cerâmica física, formulação e processamento de cerâmicas, ensaios de materiais, mecânica dos sólidos e física experimental. Assim, o presente trabalho partiu da necessidade de obtenção de uma máquina capaz de conduzir ensaios de resistência à flexão no laboratório de materiais cerâmicos, com intuito de facilitar a compreensão do conteúdo teórico apresentado em sala de aula e sua aplicação prática, promovendo um melhor aproveitamento dos alunos na assimilação dos conceitos abordados nas disciplinas. Além disso, correlacionar com a interdisciplinaridade, uma vez que o projeto torna possível o contato com diferentes conceitos de diferentes disciplinas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ensaio Mecânicos dos Materiais

Os profissionais responsáveis pela qualidade e resistência de seus produtos necessitam de um conhecimento aprofundado sobre os materiais disponíveis, incluindo suas propriedades e comportamento sob solicitações externas. Ao realizar a seleção, esses profissionais devem considerar propriedades como resistência mecânica, condutividade térmica e/ou elétrica, densidade, entre outras. Portanto, o desenvolvimento de um componente mecânico, assim como qualquer projeto de engenharia, exige um profundo entendimento das características, propriedades e comportamento dos materiais disponíveis. A seleção de materiais, sejam eles cerâmicos, metálicos, poliméricos, compósitos ou outros, depende diretamente de suas propriedades mecânicas, que são influenciadas tanto pela estrutura interna do material quanto pelas exigências específicas do projeto (Van Vlack, 1988 e Mendes, 2018).

Os critérios de especificação ou seleção de materiais requerem a condução de ensaios utilizando métodos padronizados, visando obter informações sobre as propriedades mecânicas e o desempenho desses materiais sob condições específicas de carga. A normalização desses ensaios é essencial para estabelecer uma linguagem consensual entre os fornecedores e usuários dos materiais. É prática comum realizar ensaios de recebimento dos materiais encomendados, por meio de uma amostragem estatística representativa da quantidade recebida. Diante da necessidade de solucionar os desafios técnicos enfrentados ao longo do desenvolvimento humano, foram criadas máquinas e procedimentos de teste (Ferreira *et al.*, 2020).

Os ensaios mecânicos são indispensáveis para determinação de parâmetro dos materiais em condições de trabalho. Dentre as principais solicitações mecânicas para processos de fabricação, pode-se encontrar a tração, compressão, cisalhamento e flexão, nos quais buscam avaliar as principais propriedades mecânicas, tais como resistência que define a máxima tensão que pode ser sustentada por uma estrutura; elasticidade: determina quanto o material se deforma em função da aplicação de tensão e como essa deformação desaparece quando a tensão é retirada; plasticidade: verifica a capacidade de sofrer deformação permanente sem que ocorra a ruptura; resiliência: avalia a capacidade do material de absorver energia quando é deformado elasticamente e, com o descarregamento posterior, ter essa energia recuperada; tenacidade: determina quanto de energia o material absorve desde seu estado inicial até a ruptura (Mendes, 2018 e Callister, 2021).

Em suma, ao analisarmos propriedades mecânicas, obtemos respostas cruciais sobre o comportamento dos materiais submetidos a diferentes condições. Essas características fundamentais proporcionam uma compreensão abrangente da resposta do material a esforços e deformações. No próximo tópico, será direcionada a atenção para uma perspectiva mais aprofundada por meio dos ensaios, explorando tanto os destrutivos quanto os não destrutivos, que oferecerão uma visão mais abrangente do desempenho e da integridade dos materiais em questão.

2.1.1 Ensaio Destrutivo e Não Destrutivo

Pode-se entender que muitos projetos têm como objetivo desenvolver produtos com a capacidade de resistir às forças ou cargas aplicadas. É essencial obter conhecimento sobre as características dos materiais a serem utilizados, de modo a garantir que os projetos atendam a essas demandas sem ocorrer fraturas. Para obter informações sobre as propriedades dos materiais que conferem a capacidade de suportar as cargas às quais serão submetidos, são realizados ensaios em laboratórios. Esses ensaios reproduzem de maneira fiel as possíveis condições de serviço enfrentadas pelos produtos desenvolvidos.

Portanto, esses ensaios são categorizados como destrutivos e não destrutivos. A abordagem não destrutiva é uma alternativa viável para a inspeção e avaliação econômica e eficiente do estado de conservação de estruturas civis. Esses métodos constituem uma das principais ferramentas de controle de qualidade de materiais e produtos (Lorenzi, 2016). Os mesmos são realizados em materiais acabados ou semiacabados para detectar a presença ou ausência de descontinuidades ou defeitos.

Esses ensaios são conduzidos com base em princípios físicos estabelecidos, sem alterar as características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais dos materiais, e sem interferir em seu uso posterior. São amplamente utilizados na fabricação, construção, montagem, inspeção em serviço e manutenção. Além disso, têm uma aplicação significativa em soldagens, fundições, forjamentos e laminações (Silva, 2019).

Enquanto que os ensaios destrutivos são amplamente empregados para determinar ou verificar as propriedades dos materiais e avaliar a capacidade de um componente suportar esforços. Esses ensaios levam esse nome por resultarem na inutilização do material ou corpo de prova - CP testado, mesmo que o dano aparente ser mínimo. Eles desempenham um papel essencial no processo produtivo ao identificar falhas e fornecer informações quantitativas sobre as propriedades mecânicas dos materiais.

Em muitos casos, o conhecimento dessas propriedades só é possível quando o material investigado é completamente destruído. Por isso, é comum utilizar corpos de prova fabricados com o mesmo material que será usado no projeto, seguindo normas específicas para cada tipo de ensaio e material, de forma a reproduzir as condições de serviço (Mendes, 2018). Como por exemplo, o ensaio de flexão que será abordado em detalhes mais adiante no presente trabalho.

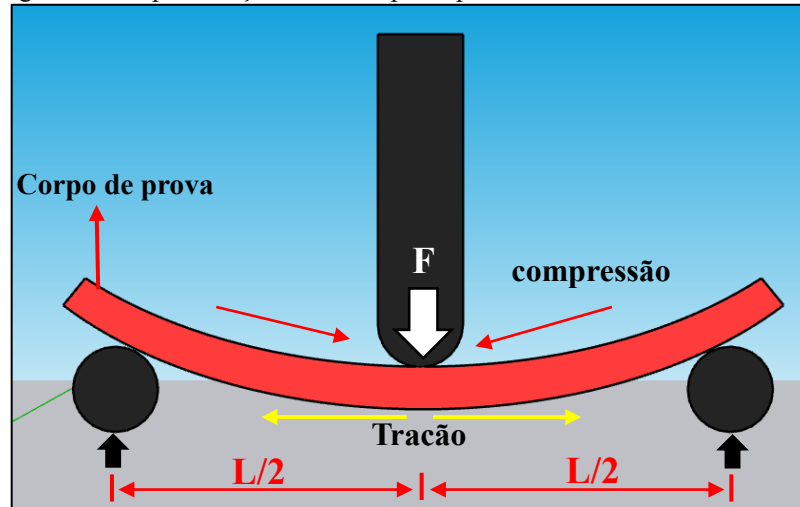
2.1.2 Ensaio de Flexão

Devido à simplicidade experimental para sua determinação e à sensibilidade às matérias-primas e variáveis de processamento, a resistência à flexão é frequentemente utilizada como um parâmetro de controle de qualidade dos corpos cerâmicos (Silva, 2012). A resistência de um material ao ser submetido a flexão de 3 (três) pontos é um aspecto crucial e pode ser avaliada por meio do ensaio de flexão, no qual uma carga é aplicada em pontos específicos de um corpo de prova ou peça ensaiada. Na análise de materiais cerâmicos, é comum recorrer a ensaios de flexão transversal devido aos desafios associados aos ensaios de tração, tais como a preparação e teste de amostras com geometria adequada, a fixação de materiais frágeis sem induzir fraturas e a necessidade de alinhamento preciso para evitar tensões de flexão. Portanto, o ensaio de flexão transversal tem se mostrado mais apropriado para caracterizar o comportamento tensão-deformação em cerâmicas frágeis (Callister, 2021).

Existem diferentes tipos de testes que podem fornecer informações sobre como o material pode se deformar ou quebrar, os principais ensaios de flexão realizados são do tipo em três pontos, em quatro pontos e engastado, os quais fornecem resultados da tensão de escoamento máxima em flexão, módulo de ruptura em flexão, módulo de elasticidade, módulo de resiliência, módulo de tenacidade entre outros (Prates, 2024).

Nesse método de ensaio, o corpo de prova, sustentado por dois apoios, é sujeito a uma carga transversal, resultando em uma deformação no corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 01. Esse processo gera forças compressivas na região acima da linha neutra do corpo de prova e forças trativas na região abaixo desta. Testes realizados dentro da região elástica são chamados de ensaios de flexão, enquanto aqueles que alcançam o regime plástico do material são designados como ensaios de dobramento (Nakazato, 2019).

Figura 01 - Representação de um corpo de prova durante um ensaio de flexão



Fonte: Adaptado de Callister (2021).

A resistência a flexão é definida como a tensão máxima de tração na ruptura e é denominada frequentemente como Módulo de Ruptura a Flexão (MRF), que significa o valor máximo da tensão de tração ou de compressão nos planos externos do corpo de prova ensaiado. A tensão é calculada a partir da espessura do corpo de prova, do momento fletor e do momento de inércia da seção transversal, o valor dessa propriedade mecânica no ensaio de flexão a três pontos pode ser calculado utilizando a Equação (1), seus parâmetros podem ser observados na Tabela 01.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (1)$$

Em que:

σ = Tensão

M = Momento fletor máximo;

c = Distância do eixo neutro;

I – Momento de inércia da seção da seção transversal;

Para seções transversais retangular e circular tem-se que:

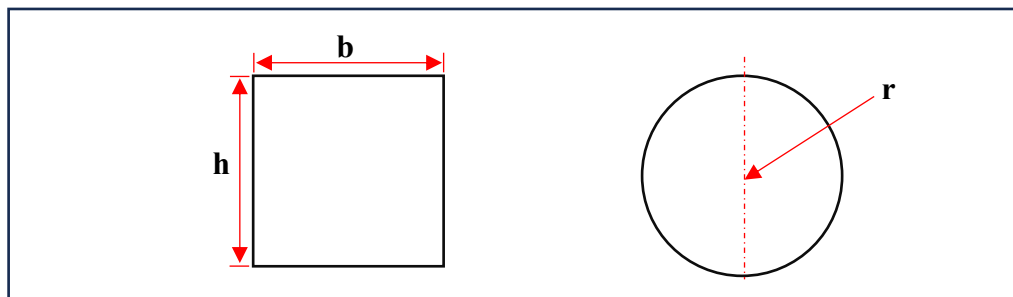
Tabela 01 - Parâmetros para seções transversais retangular e circular

	M	c	I	σ
Retangular	$\frac{FL}{4}$	$\frac{h}{2}$	$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{3FL}{2bh^2}$
Circular	$\frac{FL}{4}$	r	$\frac{\pi r^4}{4}$	$\frac{FL}{\pi r^3}$

Fonte: Adaptado de Callister (2021).

Para as duas seções possíveis tem-se que:

Figura 02 - Parâmetros para seções transversais retangular e circulares



Fonte: Adaptado de Callister (2021).

Na avaliação de cerâmicas frágeis, a tensão no momento da fratura quando se emprega esse ensaio de flexão é conhecida como resistência à flexão, módulo de ruptura, resistência à fratura ou resistência ao dobramento. Este parâmetro mecânico representa um indicador significativo para as cerâmicas frágeis, sendo fundamental para compreender o comportamento do material sob carga. Para uma seção transversal retangular, a resistência à flexão (σ_{rf}) é calculada como:

$$\sigma_{rf} = \frac{3F_f L}{2bh^2} \quad (2)$$

em que F_f é a carga na fratura, L é a distância entre os pontos de apoio, enquanto que os demais parâmetros são os indicados na Figura 02. Em que a seção transversal é circular, temos:

$$\sigma_{rf} = \frac{F_f L}{\pi R^3} \quad (3)$$

2.2 Ensaios mecânicos em materiais cerâmicos

Segundo Matencio (2020), para a maioria das pessoas, o termo "cerâmica" está geralmente associado a materiais de construção, como cimento, tijolos e revestimentos de pisos ou paredes, além de louças. Historicamente, os vestígios mais antigos de materiais cerâmicos são fragmentos de louças feitas de argila, que remontam à pré-história da China. Esse tipo de cerâmica, conhecida como cerâmica tradicional, é principalmente composto por silicatos, que são compostos formados por dióxido de silício (SiO_2) e outros óxidos metálicos, como Al_2O_3 , CaO , K_2O ou MgO .

O termo "cerâmica" tem sua origem na palavra grega "*kéramos*", que significa "terra queimada" ou "argila queimada". Ele descreve um material que é obtido a partir da argila úmida, que é altamente maleável, mas adquire rigidez e resistência quando submetido a temperaturas elevadas. Essas condições de calor transformam a argila moldada em uma peça sólida e durável (NAPOLI,2015). Essa etapa é chamada de sinterização, o qual é uma das principais etapas tecnológicas da produção de cerâmica tradicional.

Essa fase é responsável pela consolidação da forma definida na fase de conformação, as diferentes reações das matérias-primas sob a ação do calor, em muitos casos, definem os tipos de produtos a serem fabricados e suas características técnicas, ou seja, temperatura de queima e duração do ciclo de queima (Azevedo, 2018). A variação da temperatura de sinterização dos materiais cerâmicos causa várias mudanças em suas principais propriedades, como resistência mecânica, porosidade, condutividade térmica dentre outras propriedades (Schabbach *et al.*, 2012).

A argila é uma das matérias-primas mais amplamente empregadas na fabricação de uma variedade de produtos cerâmicos devido à sua plasticidade, resistência mecânica satisfatória após a queima, processamento simplificado e ampla disponibilidade de matéria-prima (Junior, 1999). Segundo Callister (2021), os materiais cerâmicos são compostos constituídos por elementos metálicos e não metálicos, caracterizados por ligações interatômicas predominantemente iônicas, embora também possuam alguma natureza covalente.

Os materiais cerâmicos podem ser categorizados como cristalinos, não-cristalinos ou uma combinação de ambos. Devido à sua estrutura atômica e às ligações químicas presentes, os materiais cerâmicos exibem alta resistência mecânica, dureza, resistência ao calor e, principalmente, fragilidade (Boeira, 2007).

Nas cerâmicas, tanto cristalinas quanto não cristalinas, é comum ocorrer fratura em temperatura ambiente antes que haja qualquer deformação plástica em resposta à aplicação de

uma carga de tração. Esse processo de fratura frágil envolve a formação e propagação de trincas através da seção transversal do material, em uma direção perpendicular à carga aplicada. Devido a essas características, o comportamento tensão-deformação das cerâmicas frágeis não é frequentemente avaliado por meio de ensaios de tração. Isso se deve a várias razões, dentre elas pode-se citar que as cerâmicas geralmente falham após uma pequena deformação, aproximadamente 0,1%, o que requer um alinhamento preciso dos corpos de prova de tração para evitar a presença de tensões de flexão, as quais não são facilmente calculadas. Portanto, em muitos casos, é mais apropriado empregar ensaios de flexão transversal, onde um corpo de prova na forma de uma barra com seção transversal circular ou retangular é flexionado até a fratura, utilizando uma técnica de aplicação de cargas a três ou quatro pontos (Callister, 2021).

2.3 Máquina Universal de Ensaio

No mercado, existem diversos modelos e marcas de máquinas universais, com especificações principais relacionadas ao tamanho e à capacidade de carga, consistindo um dispositivo eletromecânico de alta precisão utilizado em ensaios laboratoriais, sendo empregado tanto na indústria quanto em instituições de ensino técnico e superior. Esta máquina é destinada à realização de ensaios de natureza destrutiva, acompanhados por sensores que visam obter resultados sobre o comportamento dos corpos analisados, aplicando carregamentos, tanto trativos quanto compressivos. Para alcançar essa finalidade, são desenvolvidos diversos módulos e garras, permitindo a simulação de uma variedade de carregamentos, o que justifica a denominação "Universal", conforme demonstra a Figura 03 (Nakazato, 2019 e Moura, 2019).

Figura 03 - Máquina Universal de Ensaio InterMetric



Fonte: <https://intermetric.com.br/>

Nessas máquinas, são conduzidos a maioria dos ensaios fundamentais, como tração, compressão, flexão e cisalhamento. Os materiais submetidos a esses ensaios variam de acordo com a capacidade de carga da máquina. Existem vários modelos e tamanhos disponíveis, sendo essas máquinas de padrão elevado e com acessórios de custo significativo. Um equipamento de médio porte, por exemplo, tem um custo aproximado de US\$55.000,00.

2.3.1 Corpo de prova

Atualmente, devido à contínua demanda por aprimoramento dos métodos de produção e processamento, assim como pela busca por melhores propriedades finais nos materiais, surgiram iniciativas para sistematizar esses processos, visando assegurar uma certa uniformidade entre os materiais produzidos. Para alcançar esse objetivo, foram estabelecidas diretrizes de produção, juntamente com ensaios mecânicos normalizados (Zarur, 2019).

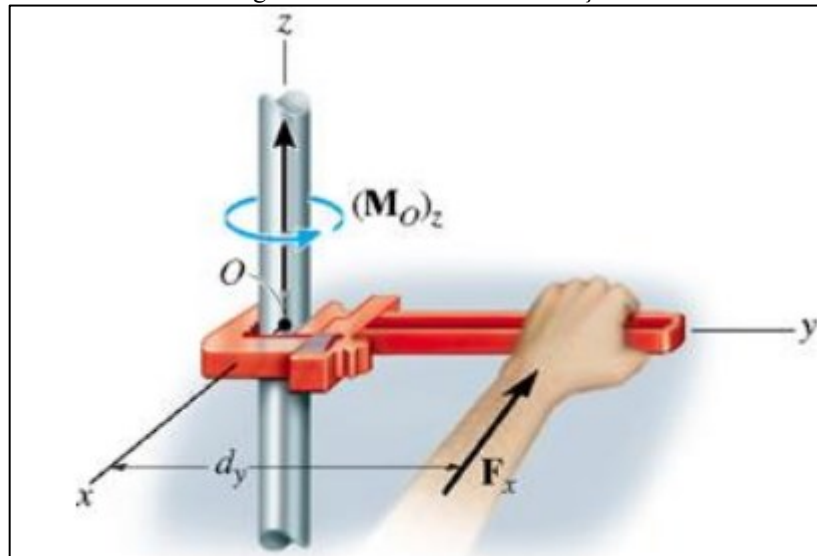
Portanto, durante a execução de um ensaio para medir a resposta de um material, esse material deva estar em conformidade com as especificações destinadas à análise pretendida. Nesse contexto, as normas técnicas desempenham um papel fundamental na obtenção de resultados confiáveis. A preparação dos corpos de prova está intimamente associada às diretrizes estabelecidas pelas normas, uma vez que frequentemente essas diretrizes são explicitadas nos próprios padrões normativos. Devido à diversidade de ensaios disponíveis, cada um visando diferentes resultados, é esperado que exista uma norma específica mais adequada para cada tipo de análise (Andrade, 2021).

Quanto à forma e dimensões dos corpos de prova padronizados pela American Ceramic Society (ACS) para ensaios cerâmicos, as barras prismáticas utilizadas tinham 200x20x10mm, no entanto, devido ao alto consumo de matéria-prima para a confecção de CPs com essas dimensões, comumente são feitas adaptações nessas dimensões. Como no caso da norma ASTM C674-13/2018, para confecção de Corpos de Prova – CP para a realização de ensaios de flexão, as dimensões adotadas para o ensaio são equivalentes à 1,125x 0,750x 0,500in, aproximadamente 28,5x19x12,7mm. Segundo Souza Santos (1989), mudanças nas medidas do CP não irá comprometer o resultado final do ensaio de resistência à flexão, desde que seja mantido pelo menos uma de suas medidas originais.

2.4 Princípio de Momento de uma Força

Quando uma força atua sobre um corpo, ela cria uma tendência de rotação em torno de um ponto que não está na direção da força aplicada (Conforme demonstrado na Figura 04). Essa tendência à rotação é às vezes referida como torque, embora mais comumente seja denominada momento de uma força, ou simplesmente momento. O momento de uma força em relação a um ponto em um corpo é definido como o produto do módulo da força (F) pela distância do ponto à linha de ação da força (d), junto com a tendência da força F de girar um corpo rígido em torno de um eixo fixo, demonstrado na Figura 04. O momento é determinado pelo módulo de F e pela distância (d) de F em relação ao eixo fixo. (Hibbler, 2005)

Figura 04 - Momento de uma força

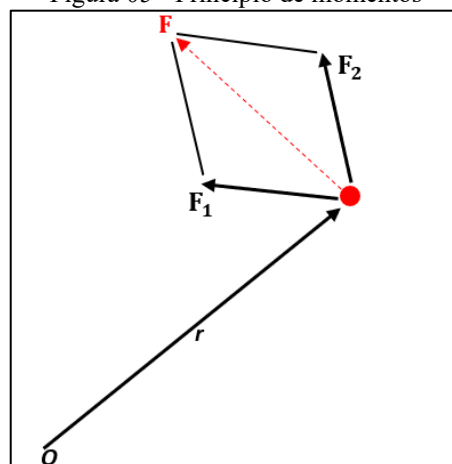


Fonte: Adaptado de Hibbler, 2005

Um princípio fundamental amplamente empregado na mecânica é o princípio dos momentos, também conhecido como teorema de Varignon. Esse teorema estabelece que o momento de uma força em relação a um ponto é equivalente à soma dos momentos dos componentes das forças em relação ao mesmo ponto. Esse conceito pode ser diretamente derivado da propriedade distributiva do produto vetorial. Para demonstrar isso, consideram-se a força F e dois de seus componentes em coordenadas retangulares, conforme Figura 05, onde $F = F_1 + F_2$, tem-se que:

$$M_0 = r \cdot F_1 + r \cdot F_2 = r \cdot (F_1 + F_2) = r \cdot F$$

Figura 05 - Princípio de momentos



Fonte: Adaptado de Hibbler, 2005

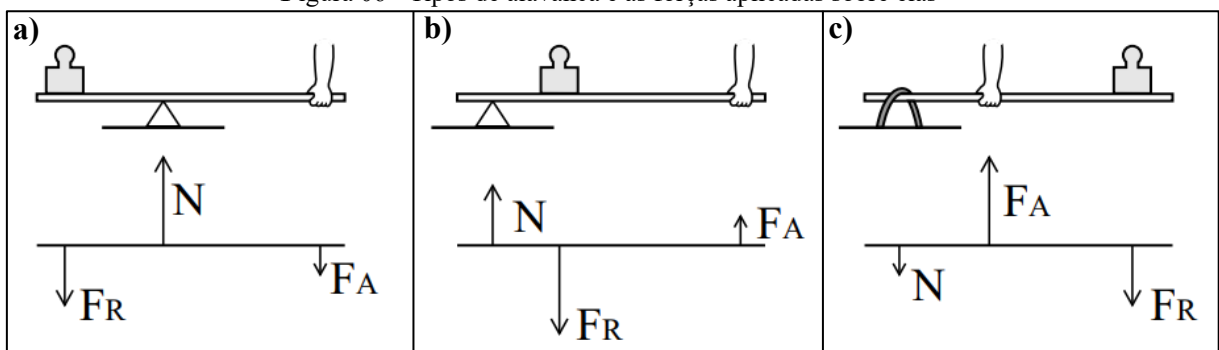
2.4.1 Estudo do mecanismo de alavancas

Por definição, uma máquina simples é aquela que não pode ser decomposta em outras. No estudo das máquinas simples, as grandezas físicas de interesse geralmente incluem: a força resultante potente, a força resultante resistente, o braço mecânico de potência, o braço mecânico de resistência, o trabalho potente, o trabalho resistente, o momento tórcor potente e o momento tórcor resistente (Barbieri, 2011).

A alavanca, uma das máquinas simples estudadas na antiguidade grega, é composta por um corpo rígido, geralmente linear, que pode girar em torno de um eixo horizontal fixo em relação à Terra, conhecido como fulcro ou ponto de sustentação PS. Além da alavanca, outras máquinas simples incluem a polia (ou roldana), a cunha (ou plano inclinado), o sarilho (ou guincho, ou guindaste, ou roda e eixo) e o parafuso sem fim (ou hélice sem fim). O eixo de rotação é geralmente perpendicular à alavanca, ambos usualmente localizados no plano horizontal quando a alavanca está em repouso em relação à Terra (Assis, 2008).

As alavancas podem ser classificadas com base nos três elementos que as compõem, sendo essas: a força aplicada, a força resistente e o ponto de apoio, que permanecem sempre em repouso em relação à Terra, essas classificações são conhecidas como interfixa, interpotente e inter-resistente (Sá *et al.*, 2013). Nas alavancas interfixas o apoio localiza-se entre a força aplicada e a força resistente, Figura 6a, nas alavancas inter-resistentes a força resistente localiza-se entre o apoio e a força aplicada, Figura 6b, e nas interpotentes a força aplicada localiza-se entre o apoio e a força resistente, Figura 6c (Almeida Filho, 2012).

Figura 06 - Tipos de alavanca e as forças aplicadas sobre elas



Fonte: Adaptado de Assis, 2008.

2.5 Teoria do erro

Testes que envolvem medições geralmente estão suscetíveis a erros, que podem ser atribuídos a diversos fatores, os diferentes tipos de erros podem ser classificados em dois grandes grupos: erros sistemáticos e erros estatísticos (aleatórios). Os erros estatísticos surgem de variações aleatórias nos resultados das medições, causadas por fatores que não podem ser controlados ou que, por algum motivo, não são controlados. Geralmente, essas variações são inerentes ao processo de medição. Por exemplo, ao medir a massa com uma balança, correntes de ar podem introduzir esse tipo de erro. Esse erro pode ser reduzido ou praticamente eliminado ao colocar a balança em uma caixa de vidro ou em um ambiente de vácuo (Pereira, 2016). Além disso, segundo Tabacniks (2003) os erros aleatórios podem ser reduzidos aumentando o número de observações. Embora o desvio padrão da média seja frequentemente citado, ele não representa o erro aleatório da média, mas sim a incerteza da média causada por efeitos aleatórios.

Segundo Lima e Zappa (2014) os erros sistemáticos são originados por fontes identificáveis e, em princípio, podem ser eliminados ou compensados. Esses erros fazem com que as medições estejam consistentemente acima ou abaixo do valor real, comprometendo a precisão das medições. As fontes de erros sistemáticos incluem:

Ao aparelho: utilizado um termômetro mal calibrado que sempre marca 2°C a mais do que a temperatura real pode causar erros.

Métodos de observação: como medir a velocidade de um carro através do som do motor em vez de um velocímetro, também podem introduzir erros.

Os efeitos ambientais: como medir o volume de um líquido sem considerar a dilatação térmica, podem resultar em medições incorretas. Além disso,

simplificações teóricas: como calcular a velocidade de um carro sem considerar a resistência do vento, podem levar a resultados imprecisos.

Além desses dois grandes grupos, pode ser citado os erros grosseiros, esses erros acontecem devido à inexperiência do operador ou falta de atenção, exemplos incluem escolha incorreta de escalas, erros de cálculo. A repetição cuidadosa das medições é fundamental para evitar esses problemas (Lima e Zappa, 2014).

2.6 Proposição do projeto

A máquina proposta foi uma máquina com limite mínimo de carga gerada de 300N, que pudesse realizar ensaio de flexão de 3 (três) pontos em materiais cerâmicos utilizando materiais de baixo custo, dando preferência para materiais reutilizáveis adquiridos sem custo tendo uma precisão próxima de uma máquina de ensaio comercial.

O projeto foi dividido em três fases principais, **Modelagem 3D**: esta fase envolveu a definição de como o protótipo seria construído e a avaliação da viabilidade da construção, considerando a complexidade da montagem. **Montagem**: a segunda fase consistiu na montagem propriamente dita do protótipo conforme projetado na primeira fase. **Testes e Validação**: após a montagem, foram realizados testes iniciais para identificar oportunidades de melhorias. Com as modificações implementadas, a última etapa envolveu a validação dos resultados, por meio de uma série de ensaios tanto no protótipo quanto em uma máquina universal de ensaios. Isso permitiu a comparação dos resultados para verificar a convergência com os obtidos na máquina comercial.

O limite de carga escolhido foi baseado nas Normas ABNT NBR 15310/2009 e ABNT NBR 15270/2017 de ensaio de flexão em três pontos para materiais cerâmicos, em específicos materiais cerâmicos vermelhos. Isso se deve ao fato de o protótipo ser de baixo custo e destinado a aplicações didáticas.

A carga necessária para romper um corpo de prova produzido nas condições propostas neste trabalho foi de aproximadamente 300N, proporcionando à máquina uma margem de capacidade adicional de cerca de 12%, já que ela pode suportar até 340N.

A montagem e fabricação foram concebidas de forma simples para que o projeto possa ser executado por professores e alunos em instituições com recursos limitados, evitando complexidades e custos elevados na sua construção. A necessidade de precisão comparável à de uma máquina de ensaio comercial justifica-se pela utilização dos dados gerados tanto para fins didáticos quanto, possivelmente, científicos, após análises detalhadas e calibração de acordo com as normas de ensaio.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo em questão é uma pesquisa aplicada de natureza exploratória e descritiva, que teve início com a concepção do projeto por meio de modelagem 3D e tem como objetivo fornecer orientações para a construção. Os resultados serão apresentados de forma qualitativa e quantitativa, com base na coleta de dados de fontes primárias e secundárias, incluindo revisão bibliográfica e estudos de caso utilizando como base o trabalho de NAKAZATO (2019). O planejamento da pesquisa envolve a coleta de dados secundários e revisão da literatura, seguido pela validação dos resultados do protótipo por meio de testes comparativos com máquinas de ensaio comerciais. A exposição dos resultados incluiu uma análise contextualizada do objeto de estudo, visando cumprir os objetivos propostos pelo projeto.

3.1 PROJETO

Nesta seção serão explicitadas as considerações e detalhes que dizem respeito ao processo de idealização, modelagem, montagem, e princípio de funcionamento mecânico do protótipo.

3.1.1 Materiais para confecção

Na Tabela 02 pode-se observar quais os materiais e peças foram utilizados para construção do projeto, juntamente com suas quantidades, origem e custo.

Tabela 02 - Materiais utilizados

(continua)

Material	Quantidade	Origem	Custo US\$
Perfil estrutural em aço carbono ASTM A36 – Formato em U (com 1200mm)	1	Loja local	US\$18,38
Metalon (com 620mm)	1	Reutilizado	-
Roldanas p/ perfil	2	Loja local	US\$1,84
Rolamentos	4	Loja local	US\$3,68
Base de madeira	1	Loja local	US\$7,35
Esticador de corrente	1	Loja local	US\$5,15
Anilhas	2	Loja local	US\$13,78
Correntes de bicicleta	2	Reutilizado	-

Tabela 02 – Materiais utilizados

(conclusão)			
Material	Quantidade	Origem	Custo US\$
Coroas de bicicleta	2	Reutilizado	-
Eixos	2	Parceiro	-
Corrediça de portão	1	Reutilizado	-
Roldanas	6	Reutilizado	-
Mão de obra	-	-	US\$31,24
TOTAL	-	-	US\$ 81,42

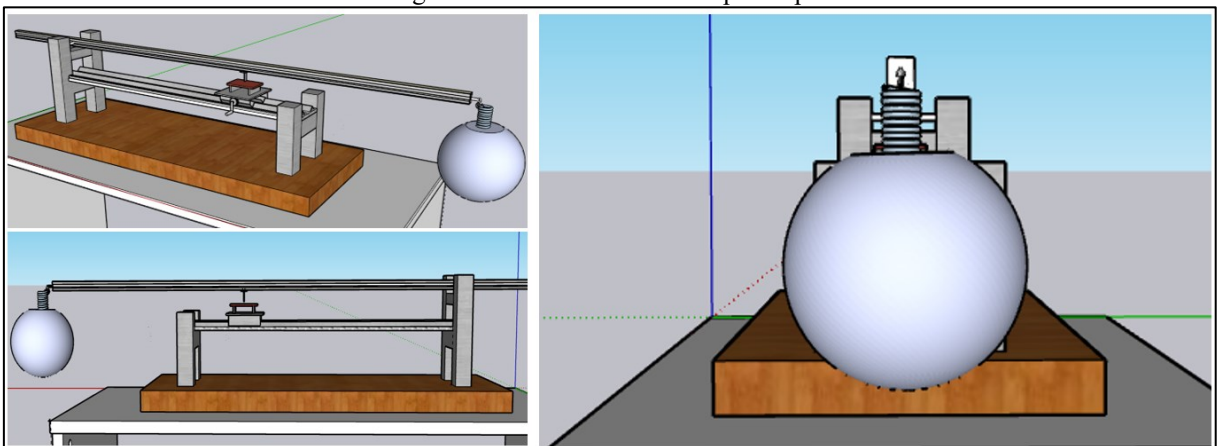
Fonte: Próprio autor, 2024.

3.1.2 Modelagem do Projeto

a) Primeira versão

Inicialmente, foi utilizado o Software SketchUP versão 2020 para realizar a modelagem 3D do protótipo, de modo que pudesse ser projetado nas medidas e parâmetros corretos, uma vez que o objetivo foi produzir força de 300N e realizar o rompimento do corpo de prova, conforme mostra a Figura 07 abaixo, diferentes vistas em perspectiva de toda a parte estrutural e mecânica da máquina.

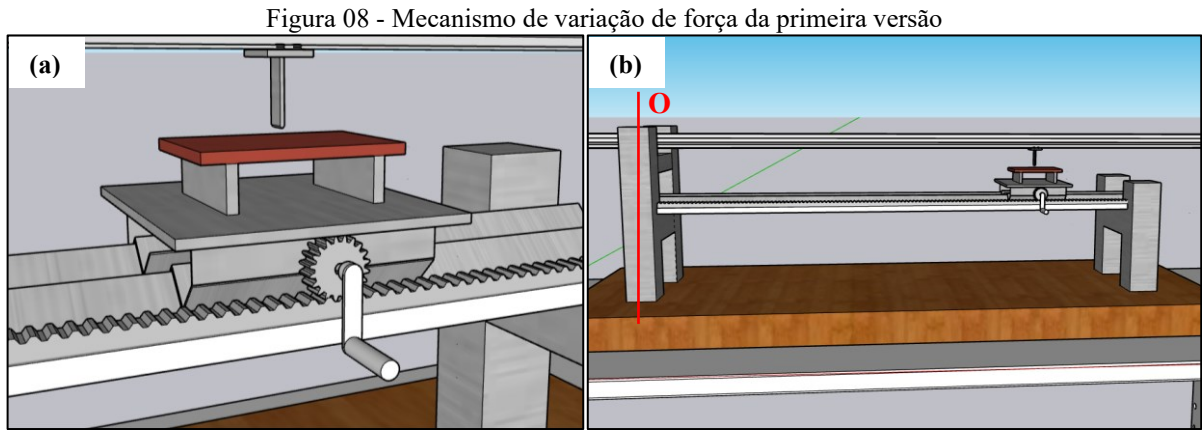
Figura 07 - Primeira versão do protótipo



Fonte: Próprio autor, 2024.

Conforme ilustrado na Figura 07, a fase inicial do protótipo envolveu o uso de uma massa fixa na extremidade da alavanca, enquanto o carrinho juntamente com o cutelo contendo o corpo de prova (Figura 8a), variava sua posição em relação ao eixo O, conforme demonstrado

na Figura 8b. Essa variação resultava no aumento da distância entre o ponto de aplicação da força e, conseqüentemente, no aumento da força exercida no corpo de prova até alcançar o ponto de ruptura.

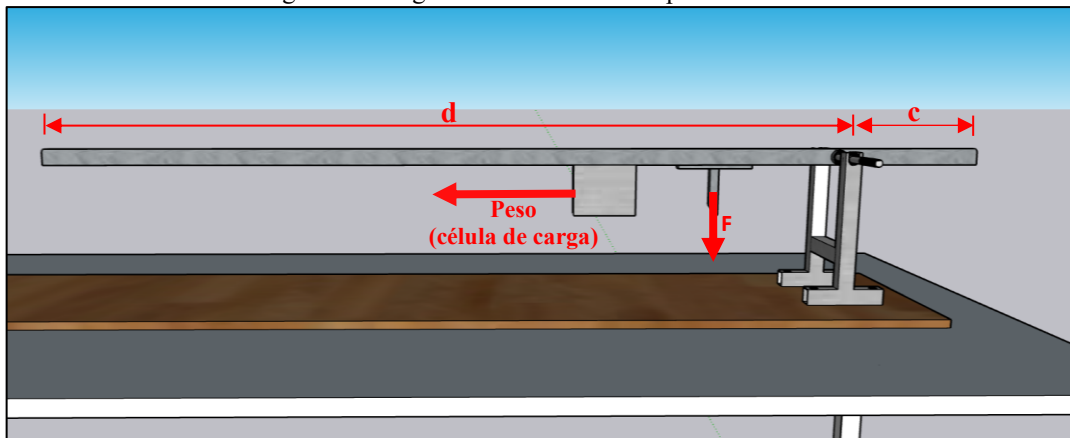


Fonte: Próprio autor, 2024.

Contudo, devido à complexidade na construção do equipamento, uma reavaliação do projeto foi conduzida, resultando na escolha de um novo mecanismo para a variação da força aplicada no corpo de prova, como mostrado na Figura 09.

b) Segunda versão

Figura 09 - Segunda versão do Protótipo vista lateral

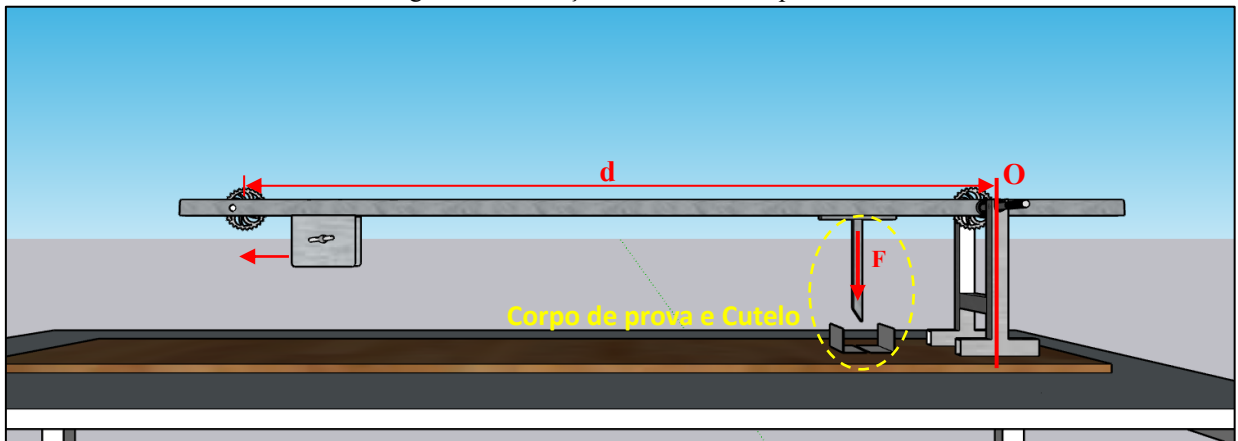


Fonte: Próprio autor, 2024.

Na segunda versão do projeto, ocorreu uma inversão no método de variação. Nessa configuração, tanto o corpo de prova quanto o cutelo permanecem fixos próximos ao eixo (Figura 10), visando gerar o mínimo de força e evitar interferências no início do ensaio. Conseqüentemente, à medida que o peso (célula de carga) varia a distância (d) em relação ao eixo **O** (Figura 10), conforme ilustrado na Figura 10, o momento tendeu a aumentar, conforme

demonstrado pela equação $\vec{\tau} = \vec{F} \times \vec{d}$, em que d é a distância, e consequentemente, a força \vec{F} (cutelo) também, mantendo uma variação linear para preservar a integridade do resultado da resistência do corpo de prova. Além disso, utilizando-se de um braço de contrapeso (c) para que o ensaio se iniciasse em equilíbrio e não tenha influência no resultado final.

Figura 10 - Variação da distância do peso



Fonte: Próprio autor, 2024.

3.1.3 Montagem do Protótipo

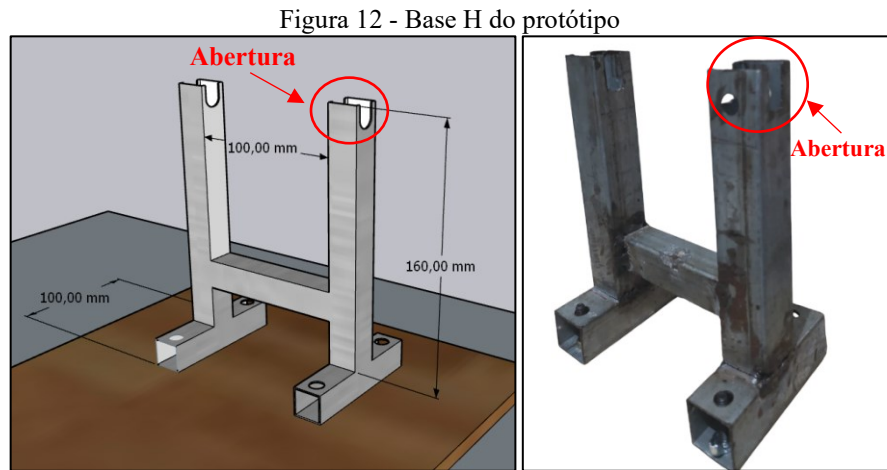
A implementação do projeto começou com o corte do braço de alavanca principal nas dimensões pré-definidas, com um comprimento de 1200mm, conforme ilustrado na Figura 11. Ainda na parte de preparação do braço de alavanca, foi soldado um tubo com diâmetro de 28mm para o encaixe dos rolamentos responsável por acomodar o eixo de 220mm, indicado na Figura 11.

Figura 11 - Braço de alavanca



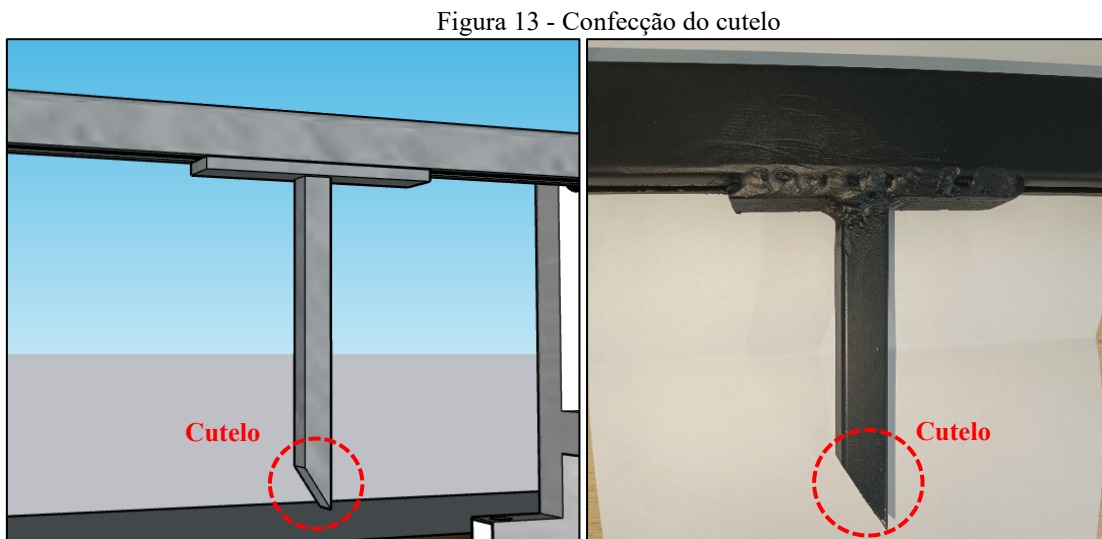
Fonte: Próprio autor, 2024

Após o corte do braço de alavanca, foi necessário fazer alguns recortes de metalon com perfil de 30x30mm com as seguintes dimensões: 3 peças de 100mm e 2 peças de 160mm, como mostrado na Figura 12, para a construção da base (H). Esta base atuou como suporte para o eixo do braço de alavanca.



Fonte: Próprio autor, 2024

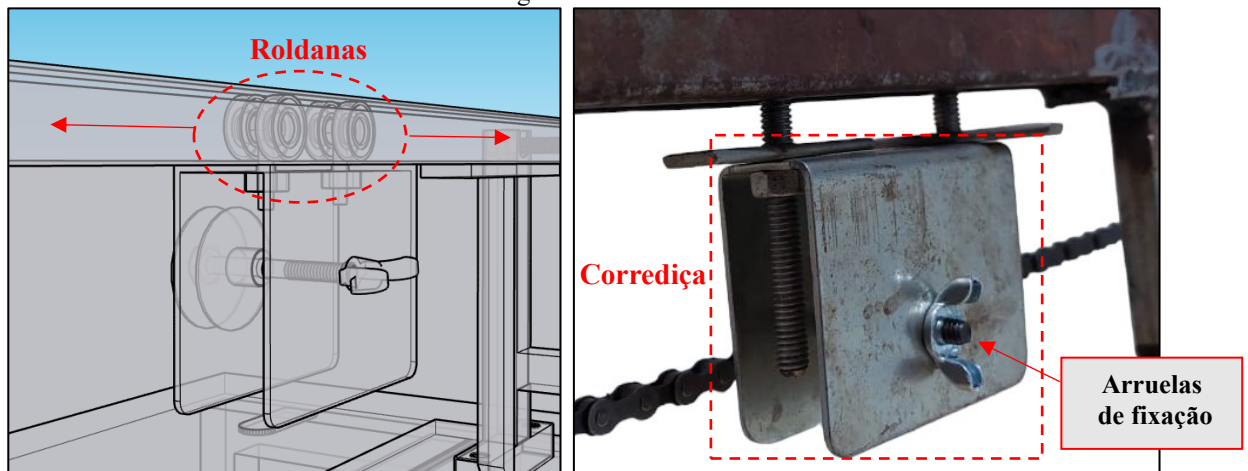
A seguir, tornou-se necessário fabricar uma abertura na extremidade superior dos suportes (indicado na Figura 12) para a inserção do eixo principal, de comprimento 220mm, conforme mostrado na Figura 13. Para a produção do cutelo, foi empregado uma amostra (mostrado na Figura 13) de metalon com perfil de 15x15mm, medindo 150mm, juntamente com um retângulo de aço de dimensões 30x95mm. Posteriormente, este foi soldado no braço de alavanca a 150mm do eixo O, como ilustrado na Figura 13.



Fonte: Próprio autor, 2024

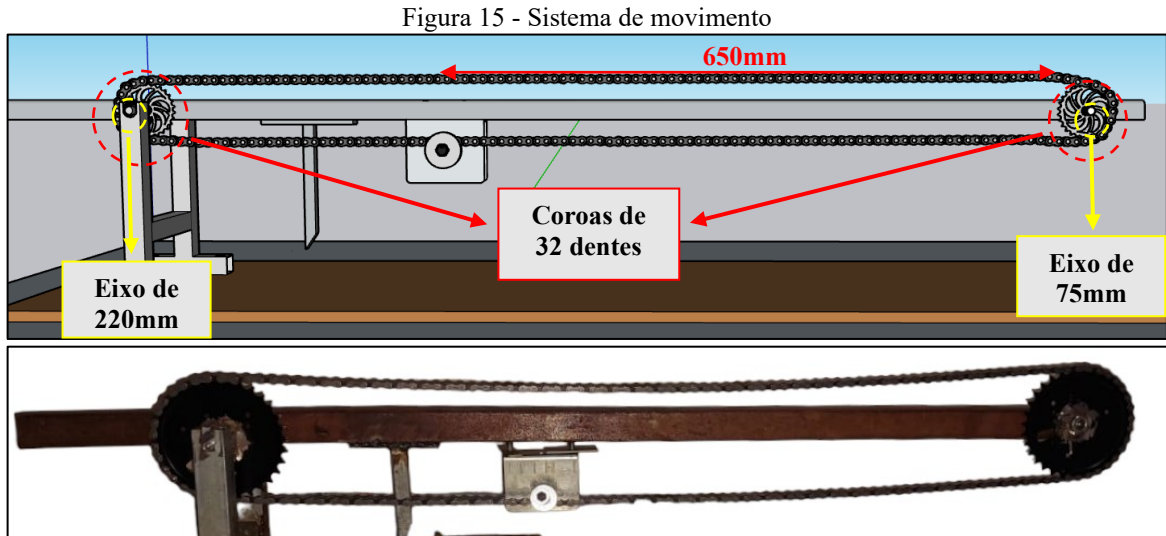
Após a fabricação do braço de alavanca, procedeu-se à construção do carrinho usado para transportar a massa (m_1). A escolha do perfil foi meticulosamente considerada para facilitar a integração do carrinho. Para montá-lo, foram utilizadas roldanas em conjunto com uma corrediça (indicadas na Figura 14) permitindo que o carrinho se deslocasse suavemente ao longo do trajeto do braço, sem que ocorresse a possibilidade de travamento ou esforço excessivo, conforme ilustrado na Figura 14. Além disso, arruelas foram empregadas para fixar o carrinho no sistema de movimentação.

Figura 14 - Carrinho



Fonte: Próprio autor, 2024

Após a conclusão da construção do sistema carrinho da massa, foi indispensável criar o sistema de movimentação do mesmo. Nesta etapa, empregaram-se duas correntes de bicicleta juntamente com duas coroas de 32 dentes (Indicadas na Figura 15). As coroas foram posicionadas nos extremos do braço de alavanca, fixadas nos eixos de 220mm e 75mm (Indicados na Figura 15) respectivamente. Isso permitiu uma variação de 650mm em relação à posição inicial até a posição final, como exemplificado na Figura 15.



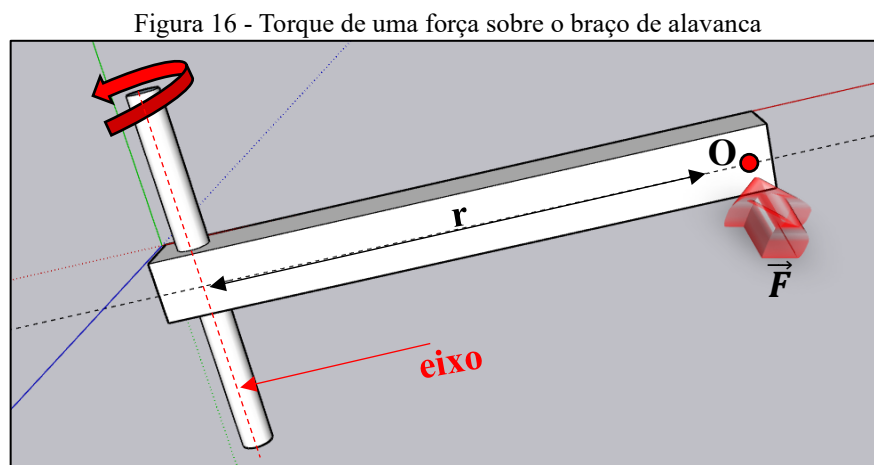
3.2 Memorial de Cálculos de Projeto

Nesta seção, serão delineadas as considerações adotadas nos cálculos para a fabricação do protótipo, assegurando que atendessem aos requisitos de geração mínima de força, sem a interferência de forças adicionais. Essa abordagem visou assegurar o sucesso dos ensaios propostos, proporcionando resultados robustos e confiáveis.

3.2.1 Torque de uma força sobre a barra

O momento de força (torque) gerado por uma força \vec{F} aplicada no ponto O, conforme ilustrado pela Figura 16, pertencente à reta que passa pelo eixo de rotação, cuja posição em relação ao eixo de rotação é definida por um vetor posição \vec{r} é expresso pela Equação (01):

$$\vec{\tau} = \vec{F} \times \vec{r} \quad (01)$$



Considerando que a força aplicada advém do peso do próprio conjunto e seja dada pela componente do peso perpendicular à barra do pêndulo, precisamos definir a que distância do eixo de rotação essa força será aplicada. Para um sistema de massas pontuais distribuídas ao longo do eixo X em que $M = m_1 + m_2 + \dots + m_i$, o centro de massa X_{cm} no eixo x é dado por:

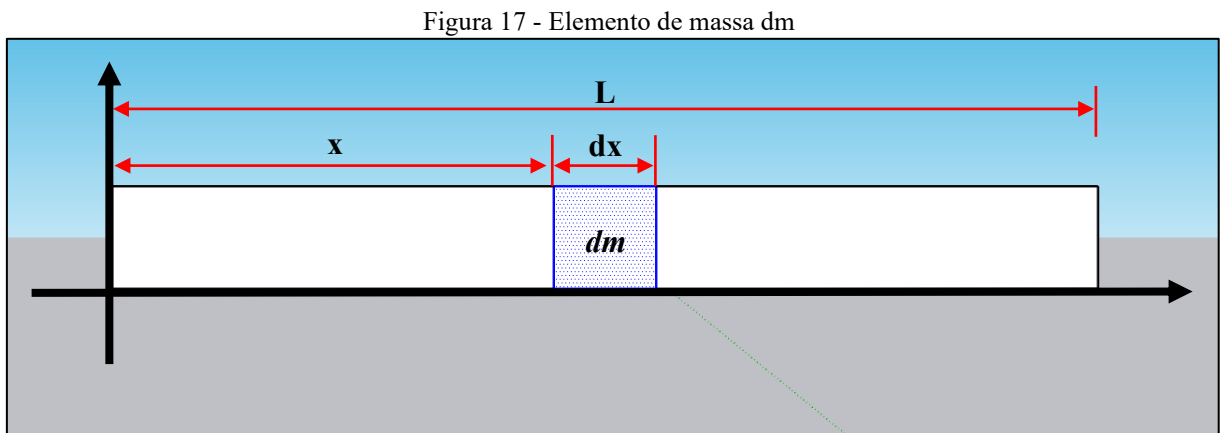
$$X_{cm} = \frac{x_1 m_1 + x_2 m_2 + \dots + x_n m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \quad (02)$$

ou

$$X_{cm} = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^n x_i m_i \quad (03)$$

Que após deduções (ver apêndice), pode-se encontrar que a densidade linear da barra (Figura 17) é dada por:

$$\mu = \frac{M}{L} \quad (04)$$

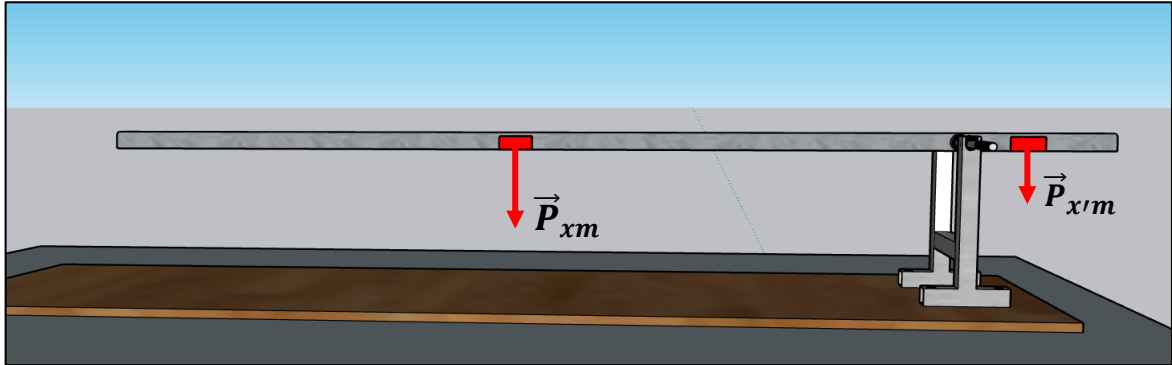


Fonte: Próprio autor, 2024

Portanto, é possível empregar a Equação (05), indicada abaixo, para inferir que as forças originadas pelas massas nos braços, tanto no braço principal quanto no braço que atuará como contrapeso, serão aplicadas nos seus respectivos centros de massa, conforme ilustrado pela Figura 18. Tais forças serão aplicadas no próximo tópico.

$$X_{cm} = \frac{L}{2} \quad (05)$$

Figura 18 - Aplicação do centro de massa nos braços de alavanca

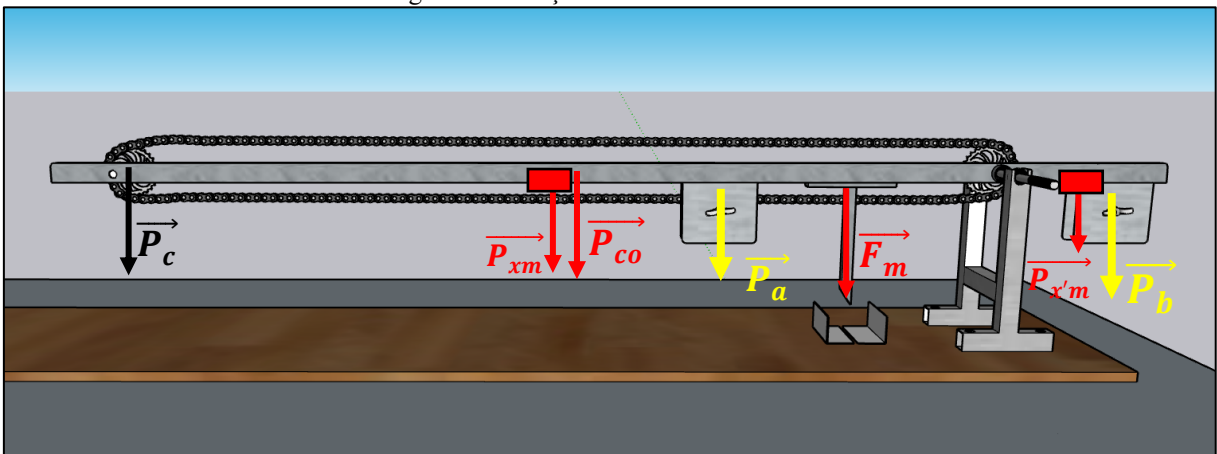


Fonte: Próprio autor, 2024

3.2.2 Encontrando o equilíbrio do sistema

Para encontrar o equilíbrio no sistema, sendo composto por toda a estrutura do equipamento, deve-se encontrar a massa de m_2 , a qual foi utilizada como contrapeso, de modo que a somatória de todas as forças do sistema seja igual a 0. Portanto, nesse cálculo foi necessário considerar as seguintes forças atuantes no sistema: $\vec{P}_{x'm}$ e \vec{P}_b (m_2), como componentes da estrutura teremos massa da coroa (\vec{P}_c), massa da corrente (\vec{P}_{co}). Todas as forças estão ilustradas na Figura 19.

Figura 19 - Forças envolvidas no sistema



Fonte: Próprio autor, 2024

Após a representação das forças do sistema no diagrama de corpo livre (DCL), procedeu-se aos cálculos para determinar os valores individuais de cada força. Para determinar o peso da coroa (\vec{P}_c), empregou-se uma Balança digital SQ SF-400, na qual foi encontrado um

valor aproximado de 0,466kg. Após a obtenção da massa da coroa, utilizando-se da Equação (06) para calcular \vec{P}_c temos:

$$\vec{P}_c = m \cdot g \quad (06)$$

Sendo m, a massa em kg e g a aceleração da gravidade em $m \cdot s^{-2}$, e, relacionando com N, onde $1N = Kg \cdot \frac{m}{s^2}$, pode-se substituir os valores da massa e da aceleração da gravidade, onde tem-se que:

$$\vec{P}_c = 0,293kg \cdot 9,8m \cdot s^{-2}$$

$$\vec{P}_c = 4,47N$$

Utilizando o mesmo procedimento, foi mensurada a massa da corrente (\vec{P}_{co}), aproximadamente 0,548 kg. Para determinar a força gerada por ela, considerou-se, para propósitos didáticos, o centro de massa da corrente juntamente com o centro de massa do braço de alavanca. Portanto, \vec{P}_{co} resultou em 3,06N.

Para encontrar as Forças de \vec{P}_{xm} e $\vec{P}_{x'm}$ utilizou-se das Equações 05 e 06 (ver apêndice), para isso, devido a impossibilidade de calcular suas massas separadamente, foi aplicado uma proporção através de uma amostra de 0,1m do material do braço de alavanca, utilizando da mesma balança digital, o valor de sua massa foi de 800g, dessa forma, aplicando na Equação de densidade linear (04), temos:

$$\mu = \frac{80g}{0,1m}$$

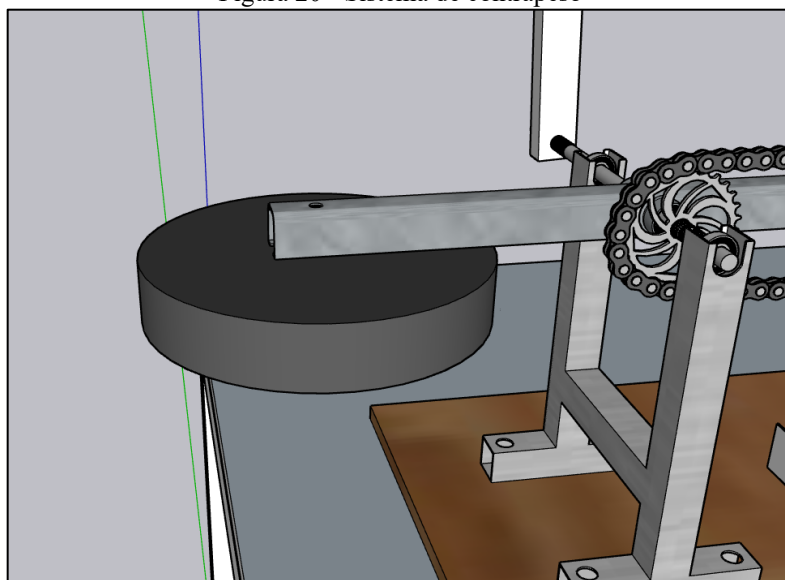
$$\mu = 800g/m$$

A partir de sua densidade linear, 800g/m, pode-se obter que em 1m terá 0,8kg de massa, logo, aplicando a Equação (05), teremos que $\vec{P}_{xm} = 7,84N$. Onde essa força foi aplicada em 0,5m a partir do eixo, segundo a equação de centro de massa de uma barra homogênea (05). De modo semelhante, encontra-se o valor de m_2 multiplicando o valor de μ por 0,2m, onde será encontrado o valor de $\vec{P}_{x'm} = 1,56N$.

Para aplicação da soma de momento no sistema, o sentido horário foi adotado como positivo e anti-horário como negativo, que após as devidas substituições encontrou-se um valor para \vec{P}_b igual a 44,66N.

Utilizando o resultado obtido na Equação (16), podemos determinar o valor da massa m_2 , que resultou em aproximadamente 4,5 kg. Conclui-se, portanto, que para garantir o equilíbrio inicial do sistema, sem interferências de forças externas, a massa m_2 foi de 4,5 kg. Para isso, foi confeccionado uma anilha para compor o sistema e realizar a função de contrapeso, conforme demonstrado na Figura 20.

Figura 20 - Sistema de contrapeso



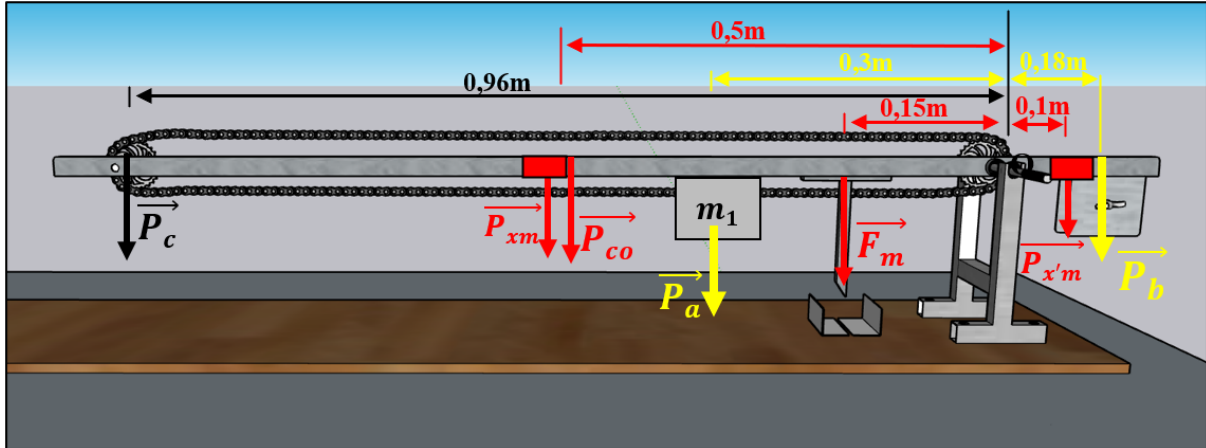
Fonte: Próprio autor, 2024

3.2.3 Força mínima de ensaio

Inicialmente, utilizando como base de dados, resultados anteriores de ensaios de Ruptura à Flexão 3 pontos realizados durante à disciplina de Formulação e Processamento de Materiais Cerâmicos, foi calculado uma média de força máxima para romper peças sinterizada à baixa temperatura, em torno de 1000 °C, onde a força necessária foi em torno de 300N. Adicionalmente, para garantir a conformidade com os requisitos de ensaio específicos para telhas, foi considerado o valor mínimo estabelecido na Norma ABNT NBR 15310/2005. Conforme essa norma, a carga de ruptura à flexão não deve ser inferior a 100kgf. Utilizando esse parâmetro como referência, foi realizado o cálculo correspondente (ver Anexo A), resultando em uma carga aproximada de 111,2kgf dentro dos parâmetros de confecção de corpo de prova adotados neste trabalho. Diante disso, o projeto foi desenvolvido levando em conta

esse valor como ponto de partida, utilizando da somatória de princípio de momento, descrito abaixo na Figura 21:

Figura 21 - DCL para cálculo de massa mínima



Fonte: Próprio autor, 2024

Onde:

Força mínima (300N): (\vec{F}_m)

Força gerada pela massa da corrente: \vec{P}_{co}

Força gerada pela massa da coroa: \vec{P}_c

Força gerada pela massa do braço de alavanca: \vec{P}_{xm}

Força gerada pela massa do braço de contrapeso: $\vec{P}_{x'm}$

Força gerada pela massa de contrapeso: \vec{P}_b

Massa necessária (m_1): \vec{P}_a

Comprimento máximo = 800mm

$$\sum M_0 = \vec{F}_m \cdot 0,15m + \vec{P}_a \cdot 0,8m + \vec{P}_{co} \cdot 0,5m + \vec{P}_{xm} \cdot 0,5m + \vec{P}_c \cdot 0,96m - \vec{P}_{x'm} \cdot 0,1m - \vec{P}_b \cdot 0,18m = 0$$

M_0 é a somatória de momento de toda a estrutura do equipamento, adotou-se o sentido anti-horário como positivo, e, assumindo que o sistema está em equilíbrio, as somatórias de todas as forças são iguais a 0 (zero). A Força necessária foi de 300N no cutelo, para que ocorresse o rompimento, onde o mesmo está a 150mm do eixo O, dessa forma, o ponto mais distante do braço de alavanca encontra-se aproximadamente 800mm do eixo O, sendo assim, o intuito desse cálculo foi encontrar qual a massa mínima necessária à essa distância. Sendo assim, após realizar as devidas substituições tem-se:

$$\sum M_0 = 300N \cdot 0,15m + \vec{P}_a \cdot 0,8m + 3,06N \cdot 0,5m + 7,84N \cdot 0,5m + 4,47N \cdot 0,96m - 1,568N \cdot 0,1m - 44,59N \cdot 0,18m = 0$$

Após os devidos cálculos (ver apêndice), obteve-se que \vec{P}_a é igual a 58,20N. Para a conversão de N para quilograma utiliza-se da equação (06) para encontrar o valor de $m_1 = 5,94Kg$.

Realizando as devidas multiplicações obtêm-se:

$$45N \cdot m + \vec{P}_a \cdot 0,8m + 1,53N \cdot m + 3,92N \cdot m + 2,75N \cdot m - 0,1568N \cdot m - 8,02N \cdot m = 0$$

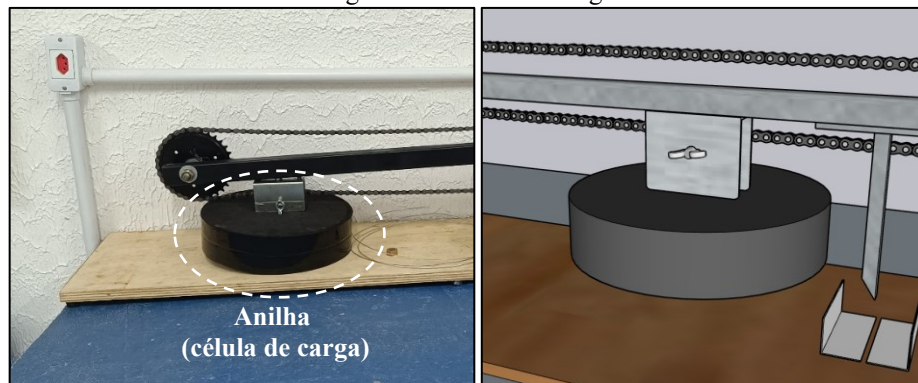
Onde o objetivo dessa somatória de momentos é isolar \vec{P}_a para posteriormente através da Equação (06) encontrar a massa mínima necessária para gerar 300N no corpo de prova, assim, após realizar as devidas operações de soma e subtração, tem-se que:

$$\vec{P}_a \cdot 0,8m = -46,55N \cdot m$$

$$\vec{P}_a = -\frac{46,55N \cdot m}{0,8m}$$

Após a devida simplificação e divisão dos valores numéricos, obtivemos que \vec{P}_a é igual a 58,20N. Para a conversão de N para quilograma utiliza-se da Equação (06) para encontrar o valor de $m_1 = 5,94kg$. Para isso, foi confeccionado uma anilha para compor o sistema e realizar a função de célula de carga no projeto, conforme demonstrado na Figura 22.

Figura 22 - Célula de carga

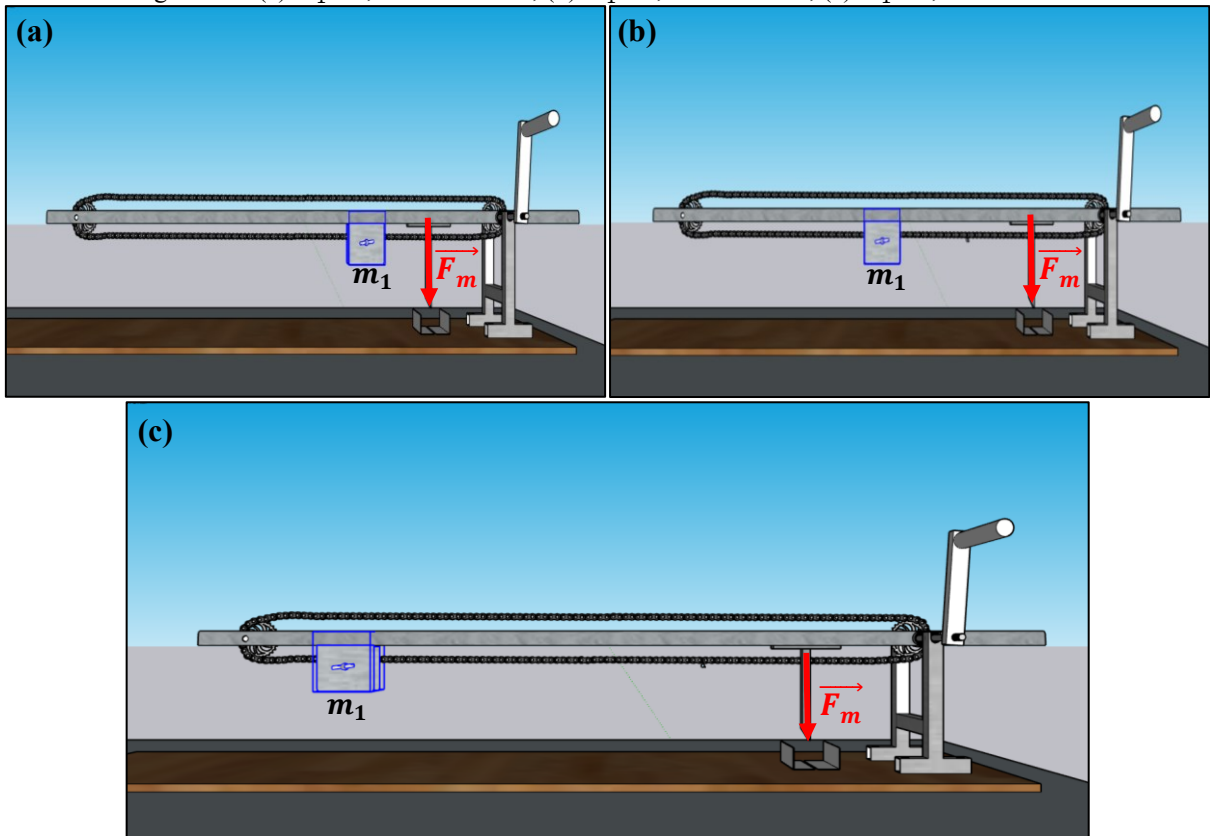


Fonte: Próprio autor, 2024

3.2.4 Regulando e quantificando as forças de ensaio

Com o objetivo de simplificar e tornar mais prático o mecanismo de ensaio, serão disponibilizados valores pré-definidos variando de 50 em 50mm. Esses valores tiveram como base os valores encontrados nos cálculos nos tópicos 3.2.2 e 3.2.3, no qual determinamos, respectivamente, o valor de todas as forças envolvidas no sistema e o valor mínimo da massa (m_1) necessária para gerar uma força de 300N. Dessa forma, como ilustrado nas Figura 23a, 23b e 23c, foi possível observar um aumento da força gerada no cutelo à medida que \vec{P}_a se afasta do eixo O.

Figura 23 - (a) m_1 à 0,15m do eixo O; (b) m_1 à 0,3m do eixo O; (c) m_1 à 0,8m do eixo O



Fonte: Próprio autor, 2024

Para o cálculo das variações de forças conforme o aumento da distância, foi utilizado o auxílio do Software Excel 2021®, onde no mesmo foi aplicado o valor de todas as forças e suas respectivas distâncias, e posteriormente aplicado na fórmula de momento, conforme ilustrado na Figura 24:

Figura 24 - Forças do sistema aplicadas nas células do Excel

Pa	67,96		Dpa	0,3
Pb	43,67		Dpb	0,18
Pc	4,47		Dpc	0,96
Pco	3,06		Dpco	0,5
Pxm	7,84		Dpxm	0,5
Px'm	1,568		Dpx'm	0,1
F	150,65			

=ABS(((B2*E2)+(B6*E6)-(B1*E1)-(B4*E4)-(B5*E5)-(B3*E3))/0,15)				
--	--	--	--	--

Fonte: Próprio autor, 2024.

À medida que D_{pa} , a distância de \vec{P}_a (m_1) em relação ao eixo O, variou, foram obtidos valores correspondentes para F, a força aplicada no cutelo. Dessa maneira, foi possível construir o Tabela 03, que mostra a relação entre a distância e a força resultante:

Tabela 03 - Relação Distância x Força	
DISTÂNCIA (mm)	FORÇA (N)
300 (início)	150,65
350	175,76
400	200,87
450	225,98
500	251,09
550	276,02
600	301,31
650	362,41
700	351,52
750	376,63
800 (final)	401,74

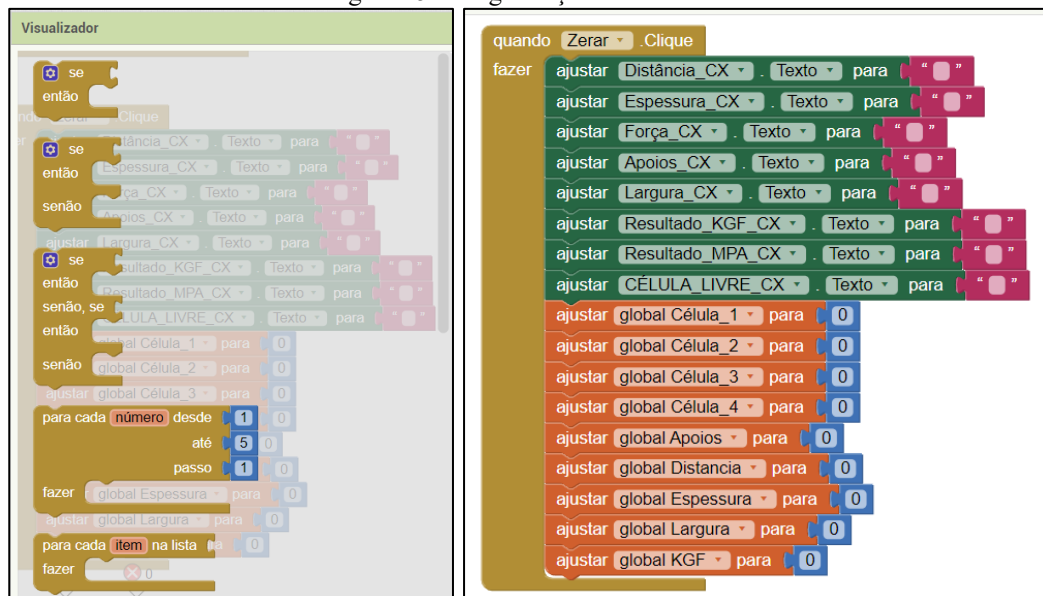
Fonte: Próprio autor, 2024.

3.2.5 Desenvolvimento do Aplicativo Mobile para Cálculo de Força e Resistência à Flexão

Para facilitar o processo de obtenção de resultados de força (N) e módulo de resistência à flexão, tanto em kgf.cm^{-2} quanto em MPa, foi idealizado um aplicativo móvel. Este aplicativo foi capaz de realizar todos os cálculos necessários e fornecer os resultados após a inserção de dados como a distância percorrida pela célula de carga, a massa da célula de carga utilizada, e os parâmetros de ensaio, como a distância entre apoios e as dimensões do corpo de prova.

Para o desenvolvimento do aplicativo, foi escolhida a plataforma “MIT App Inventor”, um ambiente de programação intuitivo e visual que permite a criação de aplicativos interativos e responsivos compatíveis com smartphones Android, iPhone e tablets Android/iOS. A utilização desta ferramenta, baseada em blocos, facilita a criação de aplicativos complexos e de alto impacto, reduzindo significativamente o tempo de desenvolvimento em comparação aos ambientes de programação tradicionais, conforme demonstrado na Figura 25.

Figura 25 - Programação em blocos



Fonte: appinventor, 2024.

Após a escolha do método de criação do APP, deu-se início ao processo de concepção da lógica de programação do cálculo, conforme já demonstrado no trabalho, o sistema está em equilíbrio segundo a somatória de momentos, dessa forma, para simplificar a programação, utilizou-se $F_1.D_1 = F_2.D_2$, onde $F_1.D_1$ é a força gerada pela célula de carga vezes a distância em relação ao eixo, e $F_2.D_2$ é a força gerada no cutelo vezes a distância dele em relação ao eixo (fixo em 150mm). Após definida a metodologia de cálculo, foi determinado as variáveis que seriam dada entrada no APP para realização de cálculo, conforme demonstrado na Tabela 04.

Tabela 04 - Variáveis do APP

Nome das variáveis	Descrição
Célula_Carga	Célula de carga utilizada no ensaio
Distância (cm)	Distância percorrida pela célula de carga
Apoios (mm)	Distância entre apoios utilizada no ensaio
Largura (mm)	Largura do CP ensaiado
Espessura (mm)	Espessura do CP ensaiado
Células 1-4 (kg)	Valor das células de cargas pré-definida
Célula livre (kg)	Valor da célula de carga diferente das pré-definidas
MPa	Resultado final em MPa
KGF	Resultado final em Kgf.cm ⁻²

Fonte: Próprio autor, 2024.

O processo de desenvolvimento no “MIT App Inventor” envolveu a criação de uma interface de usuário intuitiva para a entrada de dados para cada variável necessária (células de carga e parâmetros) e botão para iniciar o cálculo após a inserção dos dados (calcular), conforme mostrado na Figura 26.

Figura 26 - Interface de usuário

Fonte: Próprio autor, 2024.

Seguida pela implementação da lógica de cálculo:

Declaração das variáveis de entrada, onde o aplicativo captura os valores inseridos pelo usuário nas caixas de entrada. As variáveis são: Célula_Carga, Distância, Apoios, Largura, Espessura. A força foi calculada multiplicando a massa da célula de carga pela aceleração da gravidade (aproximadamente 9,81 m/s²), em seguida multiplicando pela distância percorrida (cm) e, finalmente, dividindo pela distância fixa no cutelo (15cm), conforme descrito abaixo:

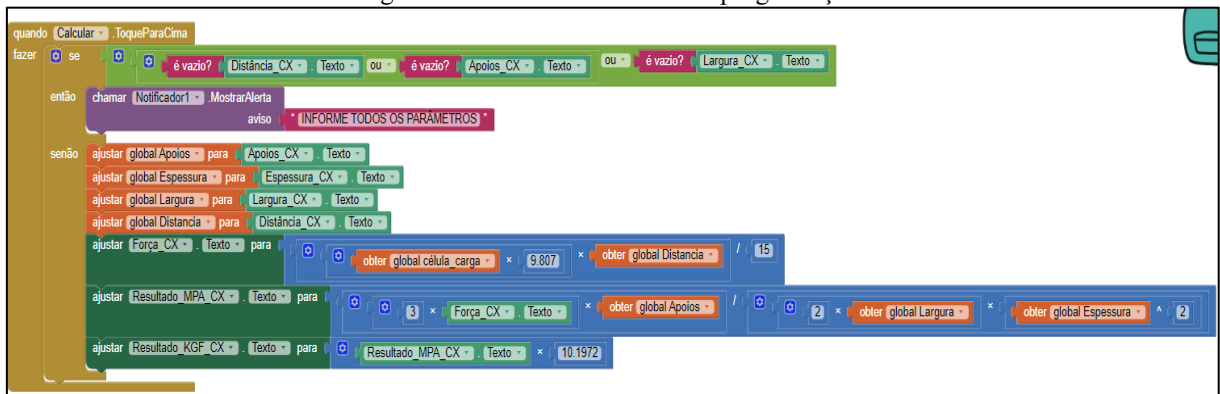
$$\text{Força (N)} = \frac{\text{Célula_carga(Kg)} \times 9,81 \times \text{Distância(cm)}}{15\text{cm}}$$

Utilizando a força calculada, o MRF é determinado aplicando a fórmula com os parâmetros de ensaio fornecidos pelo usuário, conforme descrito abaixo:

$$\text{Força (N)} = \frac{3 \times \text{Força(N)} \times \text{Apoios(mm)}}{2 \times \text{Largura(mm)} \times \text{Espessura(mm)}^2}$$

Após realizar todas essas etapas de cálculo, o APP deverá retornar a variável MPA já com o resultado final em MPa, no entanto, para o retorno da variável KGF com o resultado final, deve-se multiplicar pelo fator de conversão de MPa para kgf, sendo aproximadamente 10,1972 kgf.cm⁻². Todas essas etapas de cálculo no APP podem ser simplificadas em blocos de nota, conforme demonstrado na Figura 27.

Figura 27 - Cálculo em blocos de programação



Fonte: appinventor, 2024.

3.2.6 Análise estatística

Foi realizada análise de variância (ANOVA) dos resultados obtidos a partir dos ensaios realizados na máquina universal de ensaios com os obtidos a partir do protótipo, tal análise

estatística de comparação de médias de diferentes grupos de amostras determina se as diferenças entre esses valores são estatisticamente significativas e qual o nível de confiabilidade. A análise foi realizada através do teste F com nível de significância de 5 % para todos os testes, afim de verificar se para este nível de significância as médias populacionais dos tratamentos diferem entre si. A ANOVA utilizou os parâmetros apresentados na Tabela 05.

Tabela 05 - Parâmetros ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	F crítico
Tratamentos	SQTr	k-1	QMT	QMT/QMR	Tabela F
Resíduos	SQR	k(r-1)	QMR		
Total	SQT	n-1			

Fonte: Próprio autor, 2024.

Onde:

SQ - Soma dos quadrados;

gl - Número de graus de liberdade;

MQ - Quadrado médio;

F - Estatística F;

SQTr - Soma dos quadrados dos tratamentos;

k - Número de tratamentos;

QMT - Quadrado médio dos tratamentos;

QMR - Quadrado médio do resíduo;

SQR - Soma dos quadrados do resíduo;

SQT - Soma dos quadrados total;

r - Número de repetições do tratamento;

n - Número total de observações;

n-1 - Número total de graus de liberdade

Para a análise, foi observado o valor de F calculado, se caso for superior ao F crítico, conclui-se que as médias dos resultados obtidos para cada tratamento apresentavam diferença significativa entre si, do contrário, conclui-se que não apresentavam diferença significativa entre si. Dessa forma, foi realizado o teste de Tukey afim de confirmar quantitativamente as médias entre os grupos que são significativamente diferentes umas das outras, com base na diferença mínima significativa (d.m.s), calculada pela Equação (07) (LEITE, 2022).

$$dms = q \sqrt{\frac{QMR}{r}} \quad (07)$$

Onde:

q: Amplitude total (tabelada), obtida em função do grau de liberdade (gl) do resíduo e do número de tratamentos;

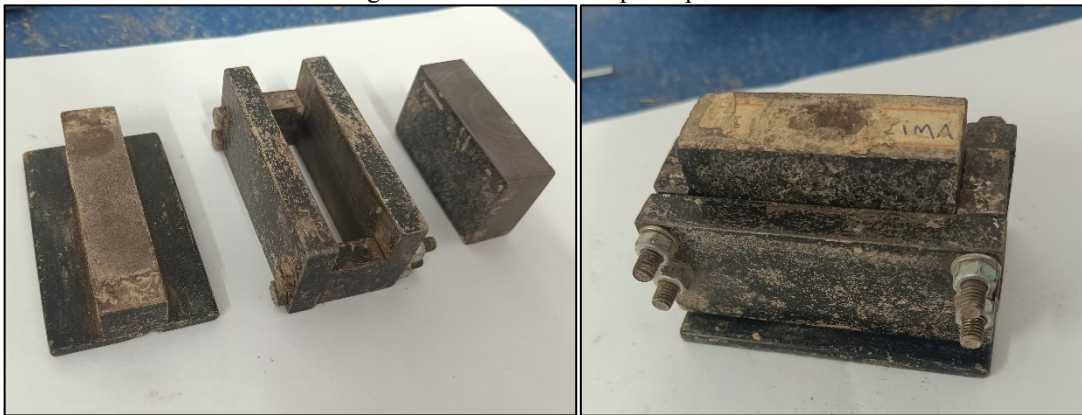
QMR: Quadrado médio do resíduo;

r: Número de repetições para cada tratamento.

3.2.7 Confecção de Corpos de Prova para Ensaio

Para este estudo, foram produzidos CPs a partir de uma matriz de aço com medidas de 60x20x10mm, conforme mostrado na Figura 28.

Figura 28 - Matriz de Corpo de prova

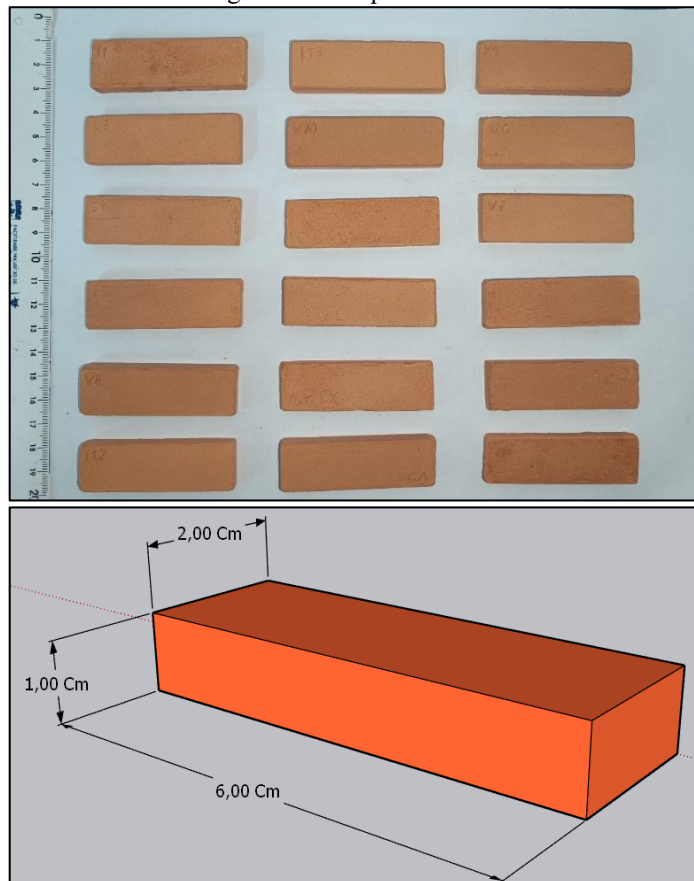


Fonte: Próprio autor, 2024

Para produção desses corpos de prova, inicialmente a matéria-prima (argila) passou por uma série de beneficiamento, desde à desagregação utilizando moinho de bolas até o peneiramento manual utilizando peneiras de até 60 mesh com abertura de 250mm, após isso, a massa cerâmica passou por um processo de umidificação de forma homogênea absorvendo aproximadamente 9% de água. Posteriormente foi conformada na matriz de aço, por prensagem uniaxial de 2tnf utilizando uma prensa manual, resultando na produção do Corpo de Prova (CP) no formato prismático com dimensões correspondentes, mostrado na Figura 29. A queima dos

corpos de prova foi realizada em forno mufla “SolidSteel”. A sinterização foi realizada em duas temperaturas, 800 e 900 °C com patamar de queima de 1h.

Figura 29 - Corpos de Prova



Fonte: Próprio autor, 2024

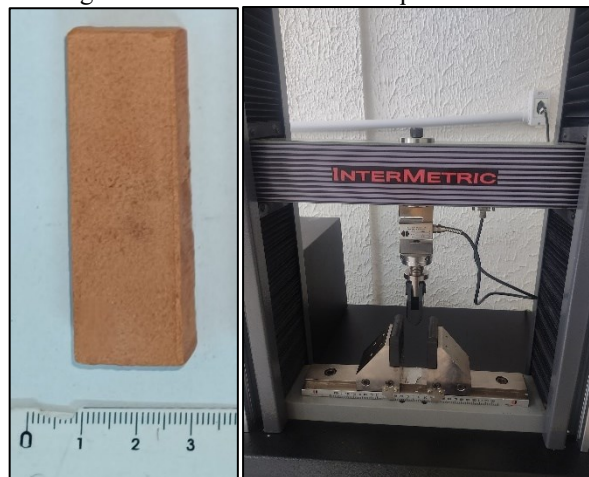
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como este trabalho envolveu o projeto e a construção de um protótipo de ensaio, os resultados foram apresentados em várias fases: testes iniciais, modificações, calibração, e por fim, análise e comparação dos resultados obtidos por meio de ensaios realizados com o protótipo aos resultados obtidos com uma máquina universal de ensaios comercial da marca InterMetric modelo iM50.

4.1 Testes iniciais

Inicialmente, para avaliar a resposta do protótipo aos ensaios, foram utilizados corpos de prova (CPs) provenientes de trabalhos anteriores, com diferentes parâmetros de sinterização. Os CPs foram classificados em três grupos: sinterizados a 1000 °C por 2h, sinterizados a 900°C por 1h e CPs com adição de rejeito sinterizados a 900 °C por 2h. Todos os resultados de força (N) e módulo de resistência à flexão (kgf.cm^{-2}) foram obtidos a partir de uma máquina universal de ensaio comercial, conforme ilustrado na Figura 30. Esta abordagem realiza uma análise preliminar dos resultados dos ensaios, par identificar possíveis falhas e propor melhorias na estrutura do protótipo.

Figura 30 - Ensaio testes na máquina universal



Fonte: Próprio autor, 2024

Na Tabela 06 há um comparativo de resultados obtidos a partir da máquina de ensaio comercial com os resultados obtidos a partir do protótipo para os ensaios preliminares.

Tabela 06 - Comparativo de resultados preliminares

Referência	Material ensaiado	Máquina comercial (Kgf.cm⁻²)	Protótipo (Kgf.cm⁻²)	Variação (%)
LabCer, 2024	900 °C 1h	177,68	188,08	5,68
Vaz Neto, 2023	1000 °C 2h	59,48	57,09	4,10
Vaz Neto, 2023	900 °C 2h (rejeito)	6,62	-	

Fonte: Próprio autor, 2024

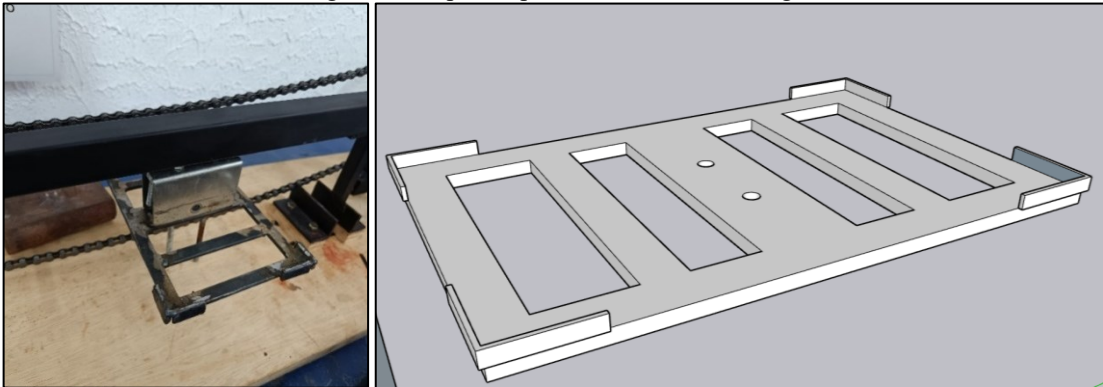
Após a análise dos resultados, constatou-se uma diferença de aproximadamente 5,68% entre os valores dos CPs sinterizados a 900 °C por 1h, enquanto que para os CPs sinterizados a 1000 °C por 2h, a diferença foi de aproximadamente 4,10%. Esses resultados indicam uma boa convergência entre os dados obtidos com a máquina universal de ensaio comercial e o protótipo desenvolvido neste trabalho.

No entanto, não foi possível realizar os ensaios para os CPs com adição de rejeito devido ao seu baixo módulo de resistência à flexão (MRF). Segundo a Tabela 03, os ensaios iniciam com aproximadamente 150,65N, o que, ao ser aplicado na fórmula para calcular o MRF conforme os parâmetros de dimensões dos CPs apresentado neste trabalho, resulta em 46,08kgf.cm⁻². Observou-se, portanto, que a célula de carga proposta (massa fixa) estava impossibilitando o ensaio de CPs com MRF relativamente baixo, pois eles se rompiam automaticamente ao serem posicionados nos apoios, impedindo a obtenção dos dados de força necessários para determinar seus módulos.

4.2 Modificações propostas

Após realizada a análise, foi proposta a confecção de um novo mecanismo para posicionar a célula de carga, de modo a diminuir a força inicial e aumentá-la gradualmente. Este ajuste visou ampliar a faixa de abrangência no quesito módulo de resistência à flexão, permitindo ensaiar desde os menos resistentes até os mais resistentes, dentro da faixa pré-definida na concepção do projeto. Para isso, foi projetado um novo aparato, conforme ilustrado na Figura 31.

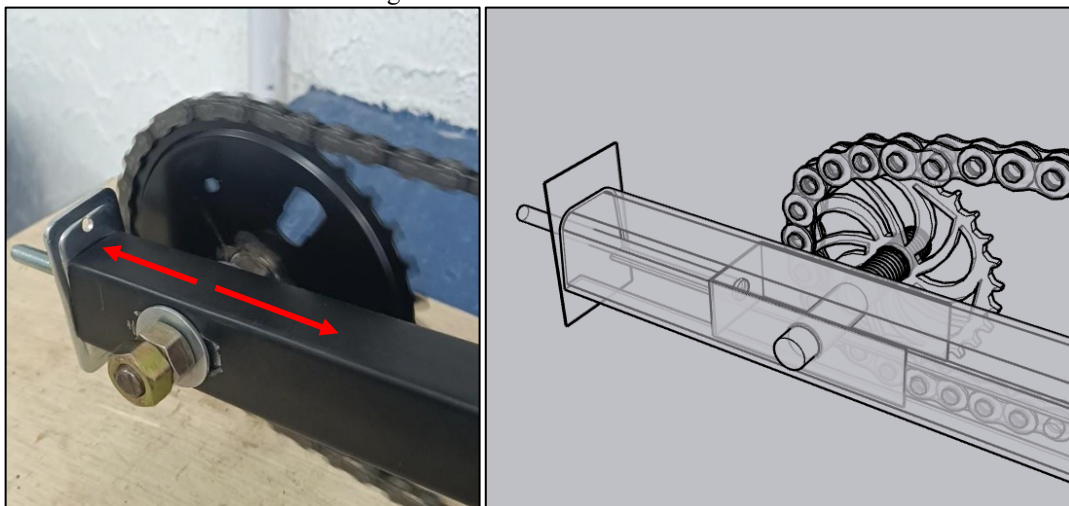
Figura 31 - Aparato para conter célula de carga



Fonte: Próprio autor, 2024

Outra problemática encontrada no protótipo foi relacionada à corrente. Devido à distância fixa entre as coroas, a corrente frequentemente ficava muito apertada ou muito frouxa. Como a corrente é composta por segmentos, seu comprimento deve sempre ser um múltiplo do passo ou de dois passos, dependendo da emenda utilizada para fechá-la. Isso resultava na corrente frouxa, comprometendo a movimentação da célula de carga e causando possíveis erros durante o ensaio. Além disso, a corrente pode se afrouxar com o uso contínuo devido ao desgaste. Para resolver esse problema, foi implementado um esticador de corrente no eixo acoplado a coroa, permitindo a regulagem da corrente continuamente conforme necessidade, demonstrado na Figura 32.

Figura 32 - Esticador de corrente



Fonte: Próprio autor, 2024

4.3 Calibração

Após realizar todas as modificações, novos ensaios foram conduzidos utilizando CPs com valores conhecidos de módulo de resistência à flexão para calibrar o protótipo. Especificamente, foram utilizados CPs com adição de rejeito sinterizados a 900 °C por 1h e 1000 °C por 2h. Pode-se observar o comparativo dos resultados na Tabela 07.

Tabela 07 - Resultados pós modificações

Referência	Material ensaiado	Máquina comercial (Kgf.cm ⁻²)	Protótipo (Kgf.cm ⁻²)	Variação (%)
LabCer, 2024	900 °C 1h (rejeito)	89,86	78,41	13,61
Vaz Neto, 2023	900 °C 2h (rejeito)	19,43	20,64	1,51

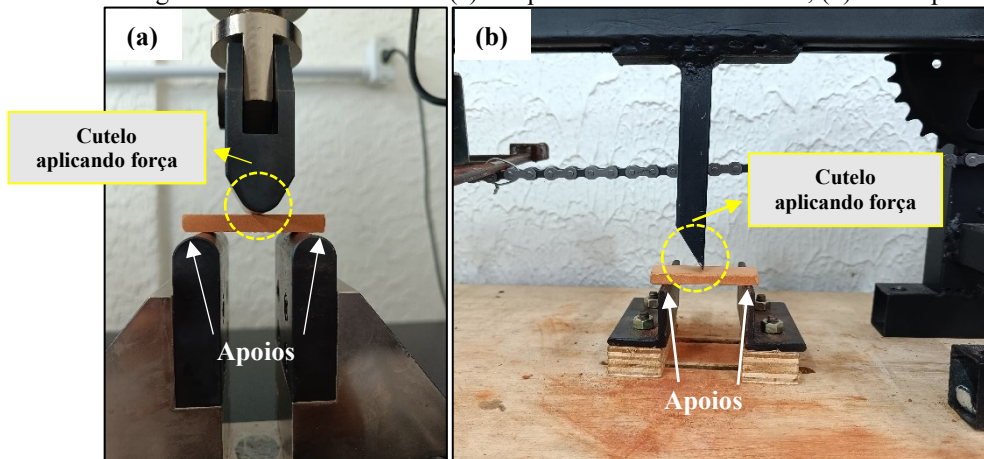
Fonte: Próprio autor, 2024

Após a análise dos resultados, constatou-se uma diferença de aproximadamente 13,61% entre os valores dos CPs com adição de rejeito sinterizados a 900 °C por 1h, e 1,51% para os CPs com adição de rejeito sinterizado à 900 °C por 2h. A grande diferença de 13,61% pode ser adotada como um erro grosseiro, onde há interferência por parte do operador ao manusear o equipamento, pois devido à natureza manual do equipamento, o movimento rotacional da manivela para aumentar a distância da célula de carga em relação ao eixo pode ser muito rápido, causando variações e, conseqüentemente, erros na aferição dos resultados.

4.4 Ensaios comparativos para validação

Para realização desses ensaios de validação, foram utilizados os CPs sinterizados à 800 e 900 °C por uma 1h. Divididos em dois grupos com 5 CPs de cada temperatura, em seguida foram ensaiados tanto no protótipo, mostrado na Figura 33b, quanto na máquina universal de ensaios da marca InterMetric modelo iM50 utilizando-se uma célula de carga de 5 (cinco) KN e velocidade de carregamento de 2 (dois) mm/min, conforme Figura 33a, na qual forneceu todos os dados de ensaio, quanto à força em Newton e o módulo de resistência à flexão em MPa.

Figura 33 - Ensaio de MRF - (a) Máquina Universal de ensaios; (b) Protótipo



Fonte: Próprio autor, 2024

4.4.1 Ensaio máquina universal

A Tabela 08 mostra os resultados dos ensaios para ambos os grupos realizado na máquina universal de ensaios.

Tabela 08 - Módulos de resistência à flexão máquina comercial

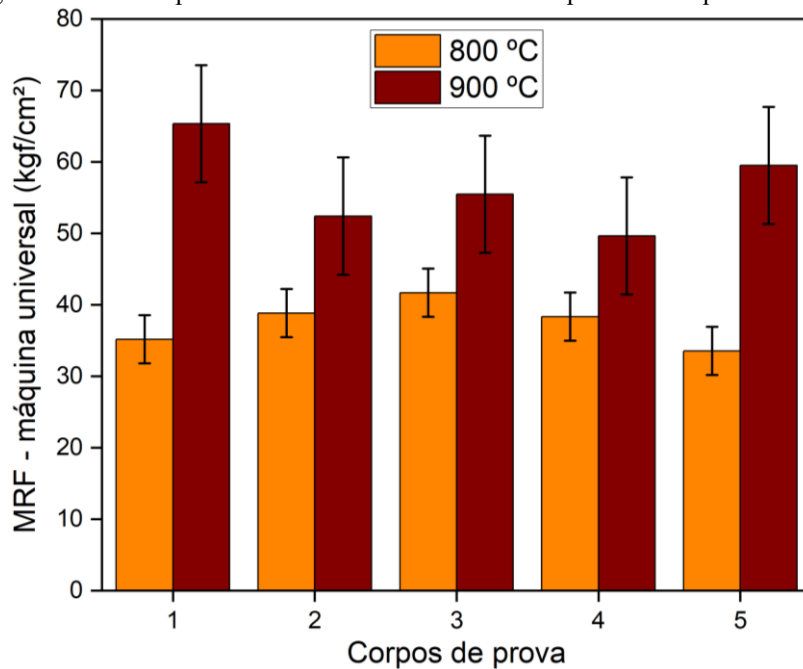
CPs	800 °C		CPs	900 °C	
	Força (N)	MRF (Kgf.cm ⁻²)		Força (N)	MRF (Kgf.cm ⁻²)
CP 1	52,95	39,36 ± 1,9625	CP 6	63,88	41,91 ± 11,0982
CP 2	58,03	35,09 ± 1,9625	CP 7	95,58	59,32 ± 11,0982
CP 3	63,88	34,78 ± 1,9625	CP 8	115,54	73,98 ± 11,0982
CP 4	63,88	37,97 ± 1,9625	CP 9	105,22	61,95 ± 11,0982
CP 5	61,51	36,03 ± 1,9625	CP 10	91,86	67,66 ± 11,0982
MÉDIA		37,1174	MÉDIA		57,70942212

Fonte: Próprio autor, 2024

Ao analisar os resultados, percebe-se uma diferença na resistência entre os grupos, atribuída aos parâmetros adotados durante o processo de produção, como conformação e sinterização em temperaturas mais elevadas. Observando o desvio padrão dos CPs sinterizados a 800 °C, nota-se uma menor dispersão, indicando que os valores estão próximos da média. Em contraste, os corpos de prova sinterizados a 900 °C apresentam um desvio padrão considerável, evidenciando alta dispersão nos resultados, podendo ser observado graficamente na Figura 34, o qual mostra os valores para ambos os grupos juntamente com o desvio padrão. No entanto, segundo Distribuição de Weibull, as cerâmicas são materiais de baixa

reprodutibilidade, pois sua ruptura está diretamente relacionada aos defeitos presentes em sua estrutura. Durante os ensaios, os corpos de prova podem exibir defeitos variados e distribuídos aleatoriamente, resultando em fraturas sob diferentes tensões (FREDEL, 2010). Além disso, é importante destacar que os valores de MRF podem ser influenciados por fatores como porosidade, distribuição granulométrica e densidade do material cerâmico. Portanto, é fundamental considerar esses aspectos ao realizar análises comparativas.

Figura 34 - Desvio padrão dos resultados encontrados a partir da máquina universal



Fonte: Próprio autor, 2024

4.4.2 Ensaios protótipo

A Tabela 09 mostra os resultados dos ensaios para ambos os grupos realizado no protótipo.

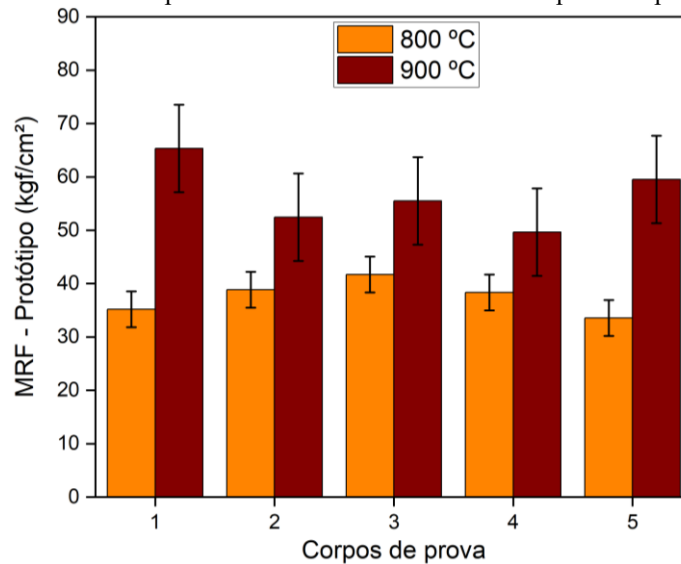
Tabela 093 - Módulos de resistência à flexão obtidos no protótipo

CPs	800 °C		CPs	900 °C	
	Força (N)	MRF (Kgf.cm ⁻²)		Força (N)	MRF (Kgf.cm ⁻²)
CP 11	65,62	35,19 ± 3,3712	CP 16	92,92	65,34 ± 8,1931
CP 12	67,78	38,85 ± 3,3712	CP 17	65,35	52,43 ± 8,1931
CP 13	77,34	41,70 ± 3,3712	CP 18	90,9	55,48 ± 8,1931
CP 14	68,44	38,35 ± 3,3712	CP 19	85,12	49,63 ± 8,1931
CP 15	65,15	33,55 ± 3,3712	CP 20	80,3	59,52 ± 8,1931
MÉDIA		38,25245126	MÉDIA		54,00631083

Fonte: Próprio autor, 2024

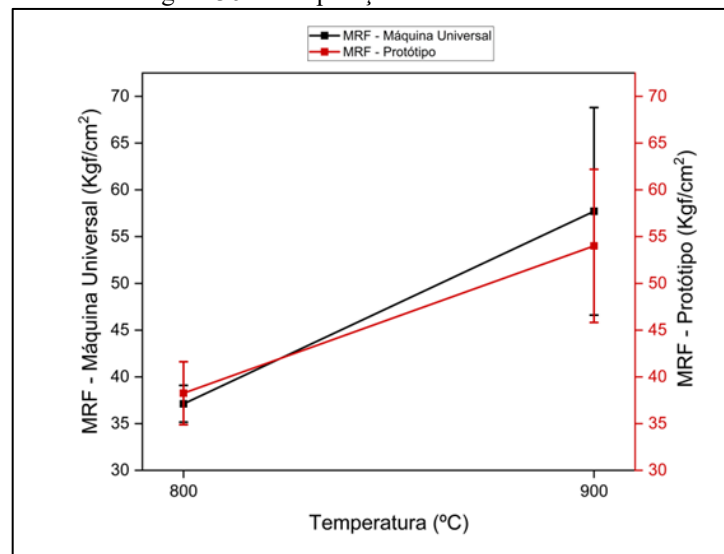
Os resultados dos ensaios realizados com os dois grupos de CPs no protótipo também mostram diferenças atribuídas aos distintos parâmetros do processo de queima. De modo semelhante aos resultados obtidos na máquina universal de ensaios, os CPs do primeiro grupo (sinterizados a 800 °C) apresentaram um menor desvio padrão em comparação com os do segundo grupo (sinterizados a 900 °C), indicando uma menor dispersão nos resultados obtidos, podendo ser observado graficamente na Figura 35, o qual mostra os valores para ambos e grupos juntamente com o desvio padrão, novamente podendo ser explicado pela Distribuição de Weibull adicionado ao fato de que os valores de MRF podem ser afetados por fatores como a porosidade, a granulometria e a densidade do material cerâmico. Na Figura 36 é possível observar a comparação das médias para ambos os grupos através de gráfico.

Figura 35 - Desvio padrão dos resultados encontrados a partir do protótipo



Fonte: Próprio autor, 2024

Figura 36 - Comparação de médias de MRF

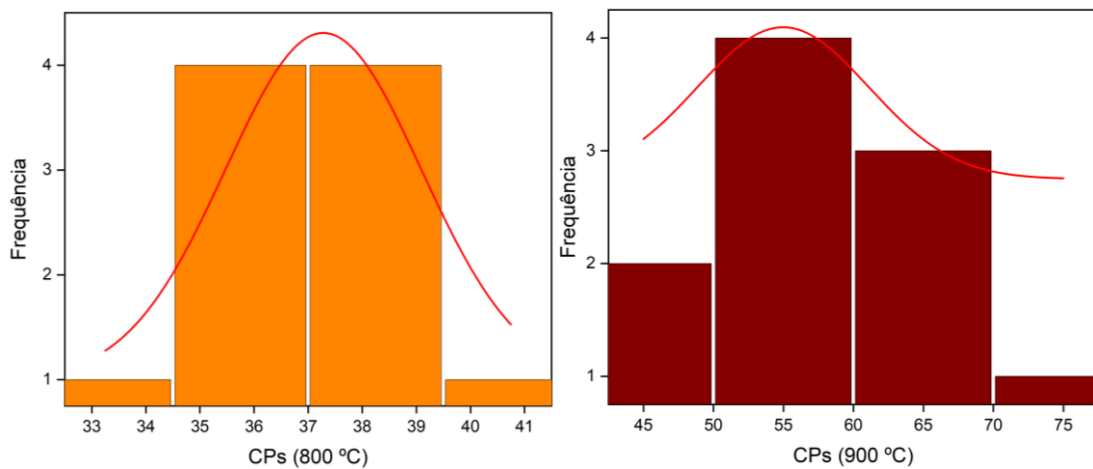


Fonte: Próprio autor, 2024

4.4.3 Validação dos resultados

Os resultados foram analisados com base na distribuição normal (curva de Gauss), e mostraram aderência a essa curva, conforme a Figura 37. Isso indica que os dados estão concentrados em torno da média com variações esperadas, o que sugere confiabilidade nas medições, atribuindo as flutuações a variações aleatórias e não a erros sistemáticos. A conformidade com a curva de Gauss confirma a consistência dos ensaios e permite comparações estatísticas confiáveis.

Figura 37 - Distribuição Normal



Fonte: Próprio autor, 2024

Para validar os dados obtidos, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) utilizando o software Excel 2021® para verificar se houve diferença significativa nas médias entre os grupos. Os resultados da análise de variância são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Análise de variância entre os grupos

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Tratamentos	2392,20	3	797,40	16,15	$4,2481 \times 10^{-5}$	3,24
Resíduos	789,89	16	49,37			
Total	3182,10	19				

Fonte: Próprio autor, 2024.

A análise de variância apresentou um valor de F calculado de 16,15, superior ao valor de F crítico de 3,24. Portanto, rejeitou-se a hipótese de médias iguais para um determinado nível

de significância de 5%. Em seguida, foi realizado o teste de Tukey, conforme mostrado na Tabela 11, para comparar as médias com um nível de confiança de 95%.

Tabela 11 - Teste de Tukey entre grupos

Varição de temperatura	800 °C Máquina	900 °C Máquina	800 °C Protótipo	900 °C Protótipo
800 °C Máquina	0	24,31347	0,875833	19,82911
900 °C Máquina	24,31347	0	23,43764	4,484367
800 °C Protótipo	0,875833	23,43764	0	18,95327
900 °C Protótipo	19,82911	4,484367	18,95327	0

Fonte: Próprio autor, 2024

Com base nos resultados obtidos com um intervalo de confiança de 95% ($p < 0,05$), os ensaios realizados nos CPs com os mesmos parâmetros de sinterização e ensaiados tanto na máquina universal de ensaios comercial quanto no protótipo não apresentaram diferença significativa entre si, pois a diferença encontrada entre tais grupos (0,875833 e 4,484367) são inferiores ao d.m.s calculado (12,71). Por outro lado, os CPs produzidos com diferentes parâmetros de sinterização (800 °C e 900 °C) mostraram resultados significativamente diferentes entre si, visto que a diferença encontrada entre os grupos foi superior ao d.m.s calculado (12,71), confirmando a veracidade dos resultados encontrados, pois de acordo com a literatura, variações nos parâmetros de queima, como tempo e temperatura, demonstram influência significativa nas propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos, incluindo a tensão de ruptura.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos permitem concluir que o projeto atingiu seus objetivos de projetar e construir um protótipo de Máquina de Ensaio de Resistência à Flexão (MRF) de 3 pontos, portátil e de baixo custo, para fins didáticos.

Os procedimentos de calibração, teste e validação dos resultados do protótipo, por meio de testes comparativos com máquinas de ensaio comerciais, foram realizados com sucesso, apresentando uma margem de erro relativamente baixa, variando de 2,34% a 7,64% nos resultados finais. A comparação dos resultados dos ensaios realizados com a máquina projetada e a máquina comercial revelou que o protótipo é capaz de gerar dados úteis para fins didáticos. Isso foi comprovado pela análise de variância (ANOVA) e confirmado quantitativamente pelo teste de Tukey com um intervalo de confiança de 95% ($p < 0,05$).

Apesar de suas limitações construtivas, o protótipo apresentou resultados satisfatórios e cumpriu todos os objetivos propostos no planejamento deste trabalho. Dessa forma, podendo contribuir significativamente para o ensino prático em disciplinas como materiais cerâmicos, cerâmica física, formulação e processamento de cerâmicas, ensaios de materiais, mecânica dos sólidos e física experimental.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade a este trabalho, objetivando seu aperfeiçoamento, algumas sugestões podem ser feitas, como:

- Reduzir atrito no eixo responsável pela movimentação de carrinho utilizando mancais juntamente com todo o sistema de movimentação dentro do braço de alavanca;
- Utilizar metalon com espessura da parede maior afim de maior resistência estrutural;
- Utilizar coroas menores para diminuir a velocidade de avanço;
- Ajustar o raio de curvatura do Cutelo para minimizar o atrito;
- Realizar novos ensaios com CPs com diferentes parâmetros no quesito dimensões.

REFERÊNCIAS

ABNT. **ABNT NBR 15310: Componentes cerâmicos — Telhas — Terminologia, requisitos e métodos de ensaio.** Brasil, 2005.

CALLISTER, William D. Jr. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma introdução.** 10ed. LTC, 2021.

ASSIS, André Koch Torres. **Arquimedes, o Centro de Gravidade e a Lei da Alavanca.** 1. ed. Canadá: Apeiron Montreal, 2008.

ANDRADE, Cláudio José Montenegro de. **Efeitos da alteração dimensional em corpos de prova de compósitos PRFV submetidos ao ensaio de flexão conforme a norma ASTM D790.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

AZEVEDO, A. R. G. et al. **Influence of sintering temperature of a ceramic substrate in mortar adhesion for civil construction.** *Journal of Building Engineering*, v. 19, p. 342-348, 2018.

ALMEIDA FILHO, F S. **ARQUIMEDES, A ALAVANCA E O TREBUCHET: UM EXPERIMENTO PARA À CONTEXTUALIZAÇÃO DA FÍSICA.** 2012. 140 p. Monografia (Licenciado em matemática) - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE GOIÁS, GOIÁS, 2012.

BARBIERI, P. F. **Reavaliação e memorização dos conceitos da mecânica geral com análises geométricas e/ou gráficas: máquinas simples. Parte II.** *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 33, p. 4305-4305, 2011.

DA SILVA, Alex Sander Chaves; SILVEIRA, Vitor Affonso Lopes; DE SOUZA, Henrique Carvalho. **Ensaio não destrutivo aplicado na fabricação e recuperação de trocadores de calor casco tubos.** *Brazilian Journal of Development*, v. 5, n. 7, p. 8767-8786, 2019.

FERREIRA, Antonio Cardoso et al. **Comparação de um material comercial sem especificações técnicas, em relação a um material padronizado, utilizando ensaio mecânico.** *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 11, p. 90421-90436, 2020.

FREDEL, M. C. et al. **PROPRIEDADES MECÂNICAS: Ensaio fundamentais.** Santa Catarina: [s. n.], 2010. 145 p. v. 1.

HIBELLER, R.C. **Estática: mecânica para engenharia.** Tradução: Everi Carrara. 10ª edição – São Paulo. Pearson Prentice Hall, 2005.

LIMA, CARLOS R A; ZAPPA, FÁBIO. **Análise de dados para Laboratório de Física.** Rio De Janeiro. 25 de março de 2014.

MENDES, Cláudia L.; SILVEIRA, Aline M. **Ensaaios mecânicos**. Porto Alegre. 2018. E-book. ISBN 9788595025028. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595025028/>. Acesso em: 03 jul. 2023.

MATENCIO, Tulio. **Importância dos materiais cerâmicos na nossa sociedade**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 25, 2020.

MOURA, Wadley Kelvy Coutinho. **Proposta de um protótipo didático para ensaio mecânico a tração em materiais**. 2019.

NAKAZATO, ANDERSON ZENKEN. **Desenvolvimento de máquina universal de ensaios mecânicos portátil de baixo custo para fins didáticos utilizando o conceito open-source**. 2019. 136 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica na área de Projetos e Materiais.) - Universidade Estadual Paulista, [S. l.], 2019.

NAPOLI, L. **Cerâmica: a mais antiga das indústrias**. ANICER: Associação Nacional da Indústria Cerâmica, out. 2015.

NEJELSKI, Danieli Maehler et al. **Seleção de materiais invertida: da caracterização do material as possibilidades de aplicação no design de produto**. DAPesquisa. Santa Catarina. Vol. 16 (2021).

PEREIRA, Erlon Lopes et al. **Propagação de erros e incertezas em experimentos**. Revista da Universidade Vale do Rio Verde, v. 14, n. 2, p. 1136-1151, 2016.

LEITE, Olívia Lopes et al. **Determinação das propriedades mecânicas de compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de caranã**. 2022.

LORENZI, Alexandre et al. **Emprego de ensaios não destrutivos para inspeção de estruturas de concreto**. Revista de engenharia civil IMED [recurso eletrônico]. Passo Fundo, RS. Vol. 3, n. 1 (jan./jun. 2016), p. 3-13, 2016.

SÁ, Alessandra Botignon de. PEDRÍLIO, Ana Vitória. Busnardo, Paola Martinelli. **Projeto De Física II – Alavancas**. Universidade Estadual Paulista-UNESP. SorocabaSP. 2013.

SCHABBACH, L. M. et al. **Valorization of MSWI bottom ash through ceramic glazing process: a new technology**. *Journal of Cleaner Production*, v. 23, n. 1, p. 147-157, 2012.

SOUZA SANTOS, P.; SANTOS, H. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. [s.l.] E. Blucher, 1989.

Silva, B. J., Menezes, R. R., Santana, L. N. L., Melo, L. R. L., Neves, G. A., & Ferreira, H. C. (2012). **Uso de técnicas estatísticas para modelar a resistência à flexão de corpos cerâmicos contendo resíduo de granito**. Matéria (Rio de Janeiro), 17(1), 919–930. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762012000100005>

OTITOJU, Tunmise Ayode et al. **Advanced ceramic components: Materials, fabrication, and applications**. *Journal of industrial and engineering chemistry*, v. 85, p. 34-65, 2020.

VAN VLACK, Lawrence Hall. **Princípios de Ciência dos Materiais**. São Paulo: Blucher, 1970.

VAZ NETO, JOSIAS DE SOUZA. **AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DO REJEITO DO PROCESSO BAYER EM FORMULAÇÕES COM ARGILA DO MUNICÍPIO DE ACARÁ-PA VISANDO A PRODUÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA**. 2023. 66 p. Monografia (Bacharel em Engenharia de Materiais) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, Belém - Pa, 2023

VIANA, S. R. S. **LABORATÓRIO REMOTO PARA O ENSINO DE CIÊNCIA: MHS**. 2023. 275 p. Dissertação (Mestre em Ensino de Física) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, Belém - Pa, 2023.

PRATES, Paulo Ross; JÚNIOR, Sílvio Aparecido Verdério; CAMINAGA, Celio. **DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA NUMÉRICA PARA ESTUDO DO ENSAIO DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS: UMA ABORDAGEM TÉCNICA E DIDÁTICA PARA O ENSINO APLICADO DE ENGENHARIA MECÂNICA**. Revista de Ensino de Engenharia, v. 42, 2023.

ZARUR, Guilherme Dias. **ENSAIO DE FLEXÃO DE CORPOS DE PROVA CERÂMICOS EM ESTADO DE ENTREGA**. 2019.

TABACNIKS, Manfredo Harri et al. **Conceitos Básicos da Teoria de Erros**. Instituto de Física da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO DO PROJETO MECÂNICO

1. DENSIDADE LINEAR DE UMA BARRA:

Para um sistema de massas pontuais distribuídas ao longo do eixo X em que $M = m_1 + m_2 + \dots + m_i$, o centro de massa X_{cm} no eixo x é dado por:

$$X_{cm} = \frac{x_1 m_1 + x_2 m_2 + \dots + x_n m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \quad (01)$$

ou

$$X_{cm} = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^n x_i m_i . \quad (02)$$

Para um elemento de massa dm de uma barra de comprimento L temos:

$$X_{cm} = \frac{1}{M} \int_1^i x_i dm . \quad (03)$$

Sendo a M a massa da barra e L seu comprimento a densidade linear da barra é dada por:

$$\mu = \frac{M}{L} \quad (04)$$

Considerando a barra homogênea podemos escrever:

$$\mu = \frac{dm}{dx} \quad (05)$$

A posição X do centro de massa da barra é dada por:

$$X_{cm} = \frac{1}{M} \int_0^L x \cdot dm \quad (06)$$

Da Equação (07), podemos escrever a Equação (08) como:

$$X_{cm} = \frac{\mu}{M} \int_0^L x \cdot dx \quad (07)$$

$$X_{cm} = \frac{\mu}{M} \left[\frac{x^2}{2} \right]_0^L \quad (08)$$

$$X_{cm} = \frac{\mu}{M} \left[\frac{L^2}{2} - \frac{0^2}{2} \right] \quad (09)$$

$$X_{cm} = \frac{\mu}{M} \cdot \frac{L^2}{2} \quad (10)$$

Da Equação (05), podemos escrever a Equação (11) como:

$$X_{cm} = \frac{M}{L} \cdot \frac{L^2}{2} \quad (11)$$

$$X_{cm} = \frac{1}{M} \cdot \frac{M}{L} \cdot \frac{L^2}{2} \quad (12)$$

$$X_{cm} = \frac{L}{2} \quad (13)$$

2. APLICAÇÃO DA SOMA DE MOMENTO NO SISTEMA

Para aplicação da soma de momento no sistema, o sentido horário foi adotado como positivo e anti-horário como negativo, desse modo, a equação ficará da seguinte forma:

$$\sum M_0 = \overrightarrow{P_{x'm}} \cdot 0,1m + \overrightarrow{P_b} \cdot 0,18m - \overrightarrow{P_{xm}} \cdot 0,5 - 3,06N \cdot 0,5 - 2,87N \cdot 0,96 = 0$$

Substituindo os valores das forças tem-se:

$$\sum M_0 = 1,568N \cdot 0,1m + \overrightarrow{P_b} \cdot 0,18m - 7,84N \cdot 0,5m - 3,06N \cdot 0,5m - 4,66N \cdot 0,96m = 0$$

Realizando as devidas multiplicações:

$$0,1568N \cdot m + 0,18\overrightarrow{P_b}N \cdot m - 3,92N \cdot m - 1,53N \cdot m - 4,47N \cdot m = 0$$

O objetivo desta equação é isolar $\overrightarrow{P_b}$ com intuito de descobrir a massa necessária para que o sistema fique em equilíbrio, dessa forma temos:

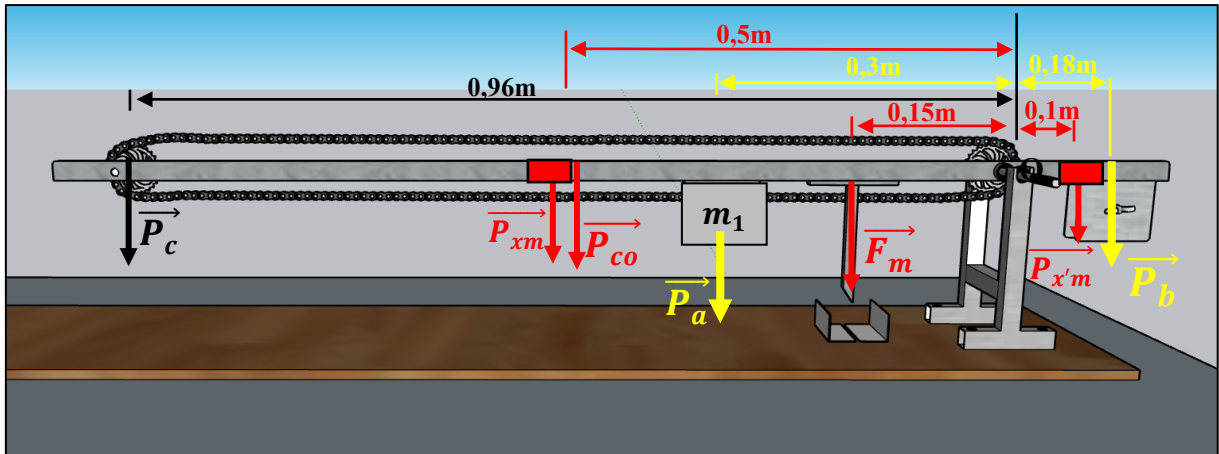
$$0,18\overrightarrow{P_b} = 8,04N \cdot m$$

$$\overrightarrow{P_b} = \frac{9,76N \cdot m}{0,18m}$$

$$\overrightarrow{P_b} = 54,24N$$

3. FORÇA MÍNIMA DE ENSAIO

Figura 22 - DCL para cálculo de massa mínima



Fonte: Próprio autor, 2024

Legenda:

Força mínima (300N): (\vec{F}_m)

Força gerada pela massa da corrente: \vec{P}_{co}

Força gerada pela massa da coroa: \vec{P}_c

Força gerada pela massa do braço de alavanca: \vec{P}_{xm}

Força gerada pela massa do braço de contrapeso: $\vec{P}_{x'm}$

Força gerada pela massa de contrapeso: \vec{P}_b

Massa necessária (m_1): (\vec{P}_a)

Comprimento máximo = 80cm

$$\sum M_0 = \vec{F}_m \cdot 0,15m + \vec{P}_a \cdot 0,18m + \vec{P}_{co} \cdot 0,5m + \vec{P}_{xm} \cdot 0,5m + \vec{P}_c \cdot 0,96m - \vec{P}_{x'm} \cdot 0,1m - \vec{P}_b \cdot 0,18m = 0$$

Após realizar as devidas substituições tem-se:

$$\sum M_0 = 300N \cdot 0,15m + \vec{P}_a \cdot 0,8m + 3,06N \cdot 0,5m + 7,84N \cdot 0,5m + 4,66N \cdot 0,96m - 1,568N \cdot 0,1m - 44,59N \cdot 0,18m = 0$$

Realizando as devidas multiplicações obtêm-se:

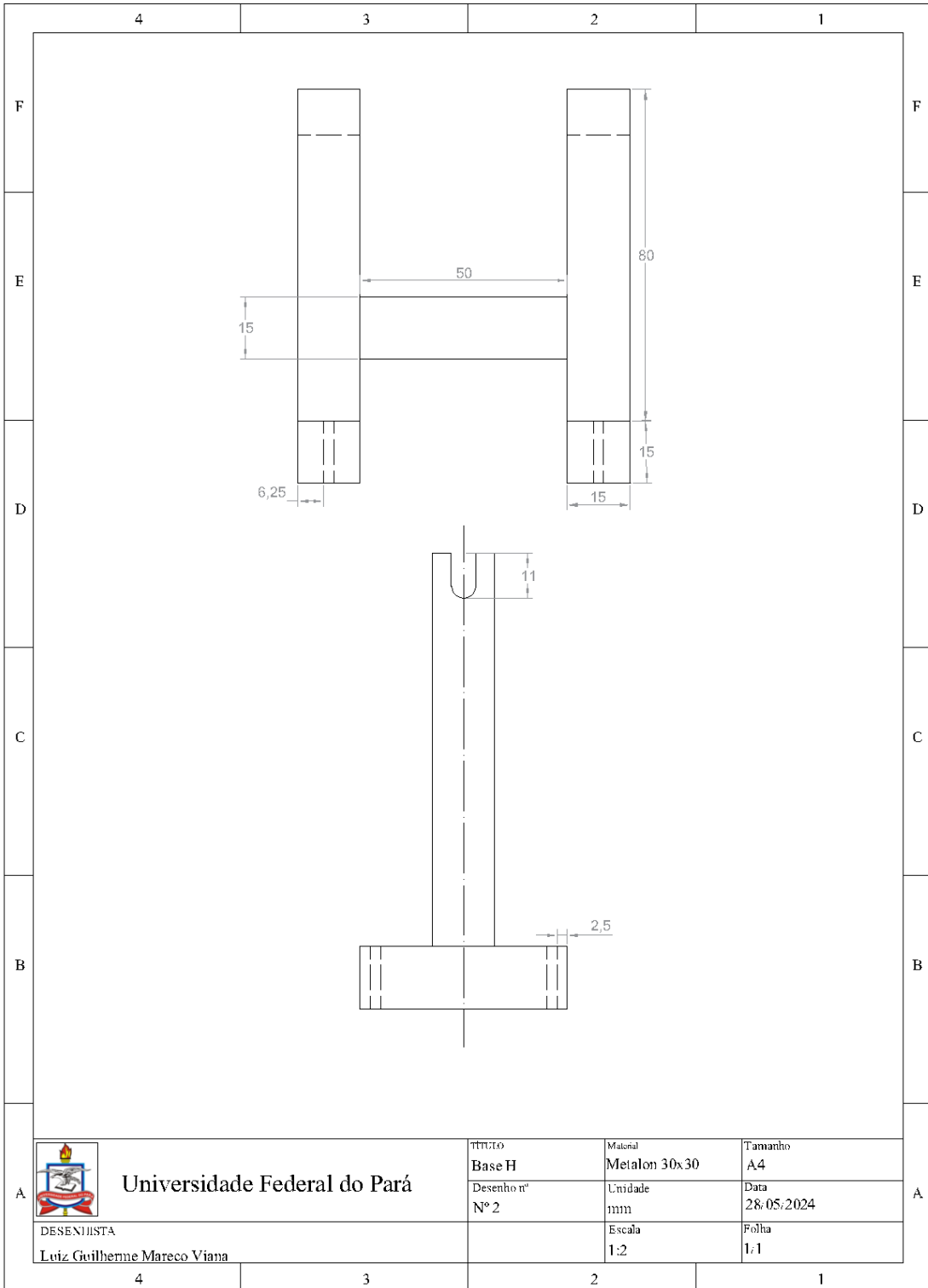
$$45N.m + \vec{P}_a \cdot 0,8m + 1,53N.m + 3,92N.m + 4,47N.m - 0,1568N.m - 8,02N.m = 0$$

$$\vec{P}_a \cdot 0,8m = -45,02N.m$$

$$\vec{P}_a = -\frac{46,56N.m}{0,8m}$$

$$\vec{P}_a = 58,2N$$

APÊNDICE B – DESENHOS DE PEÇAS MECÂNICAS DO EQUIPAMENTO

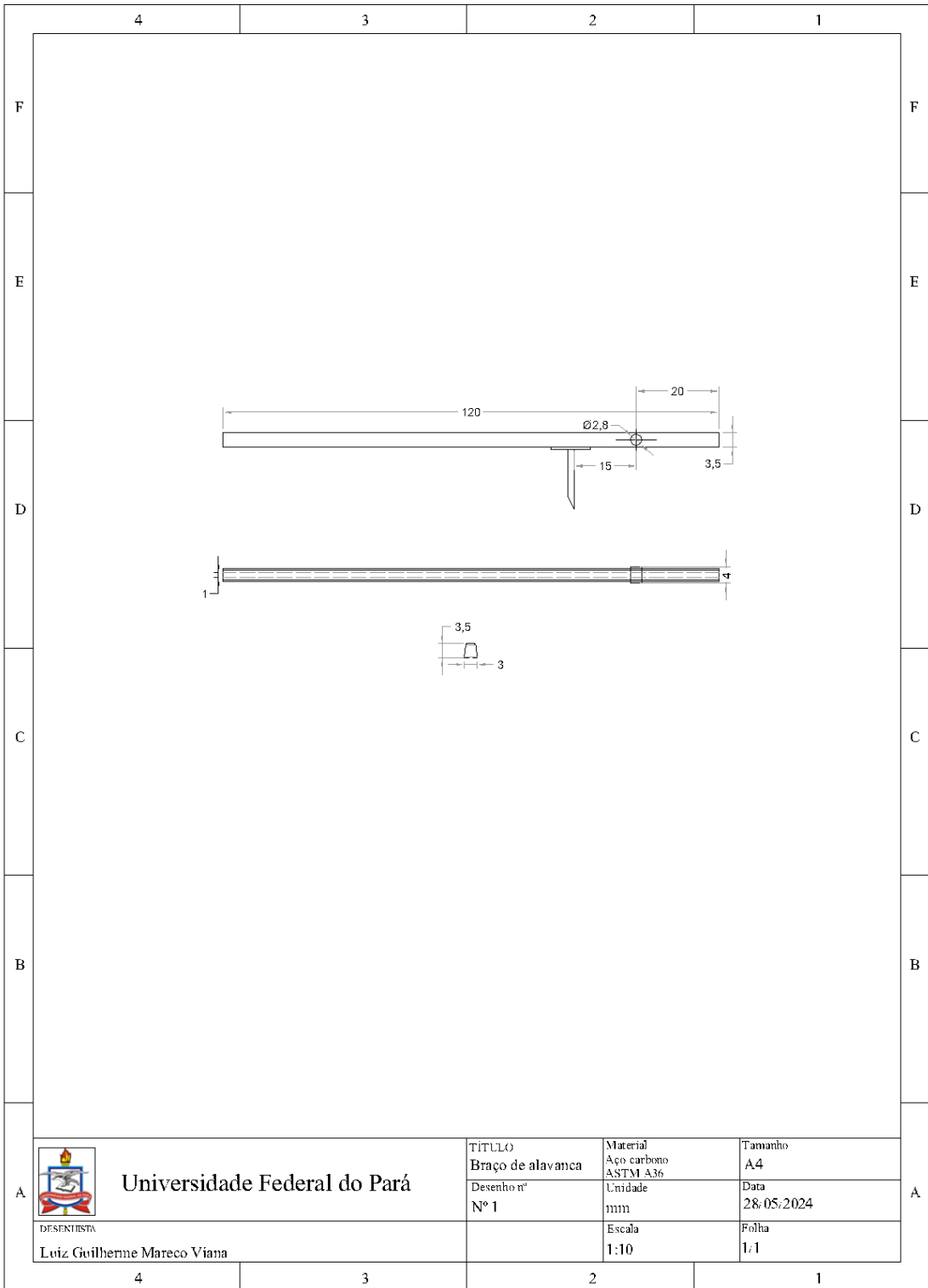



Universidade Federal do Pará

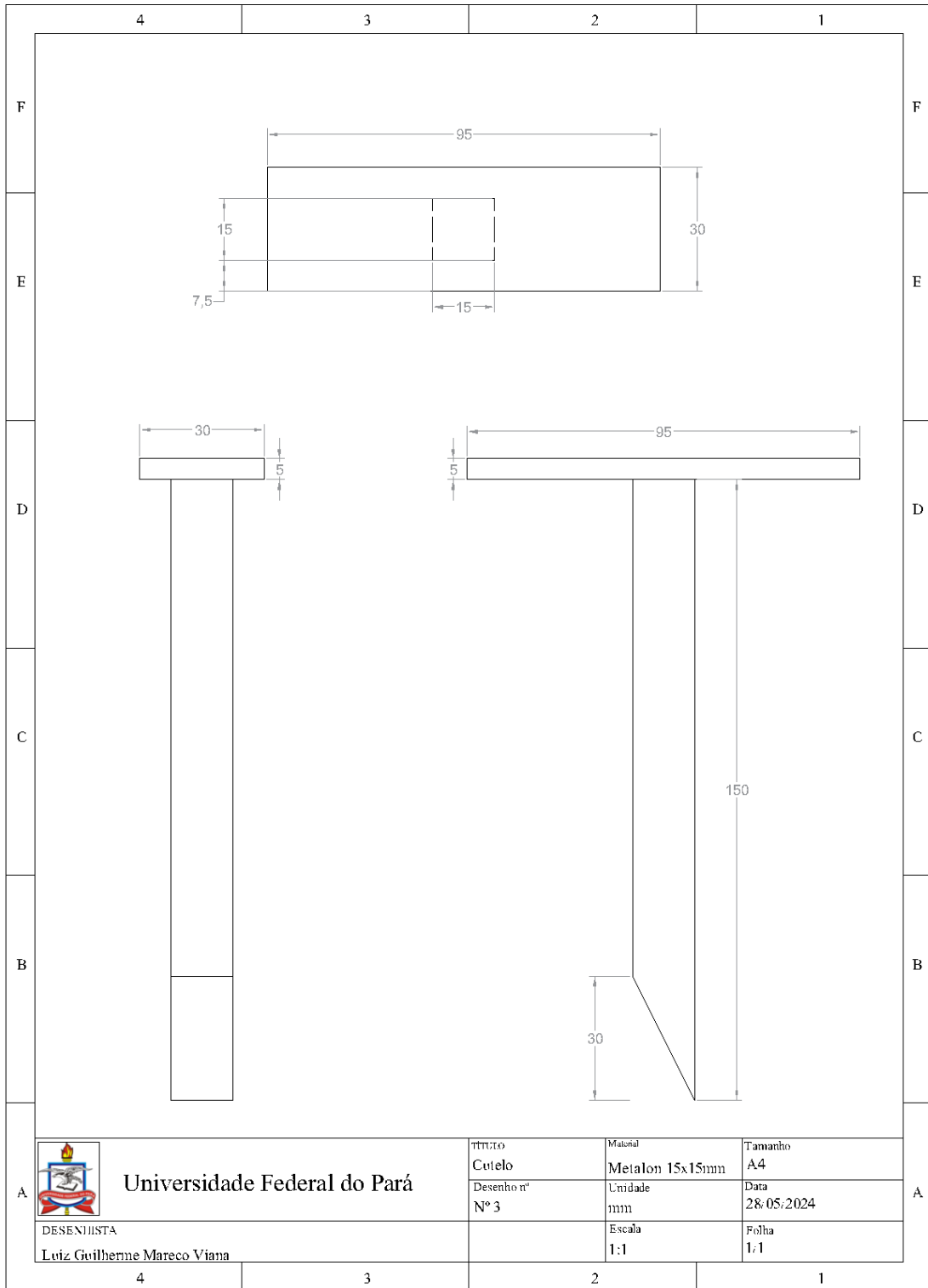
DESENHISTA
Luiz Guilherme Mareco Viana

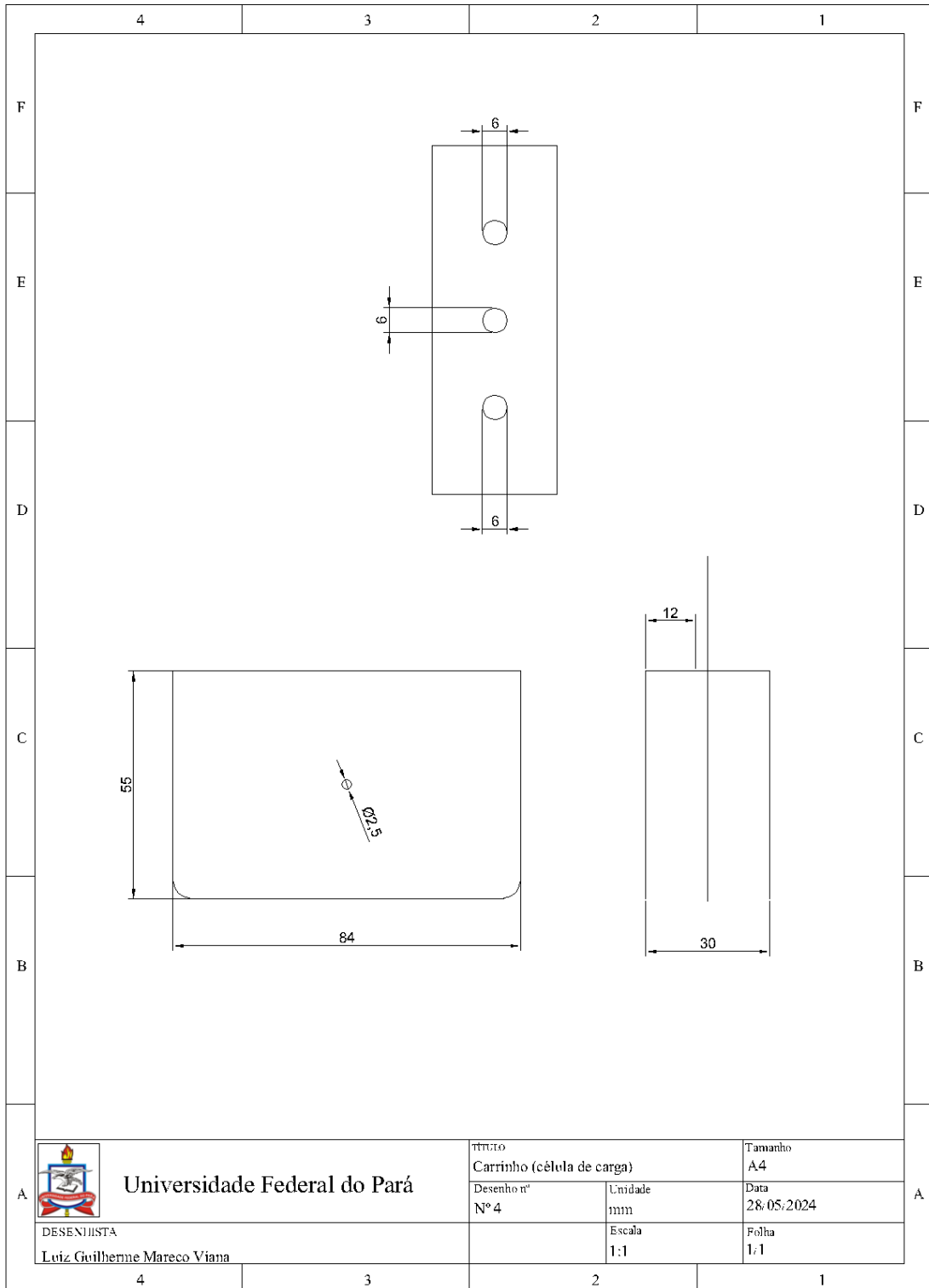
TÍTULO	Material	Tamanho
Base H	Metalon 30x30	A4
Desenho nº	Unidade	Data
Nº 2	mm	28/05/2024
	Escala	Folha
	1:2	1/1

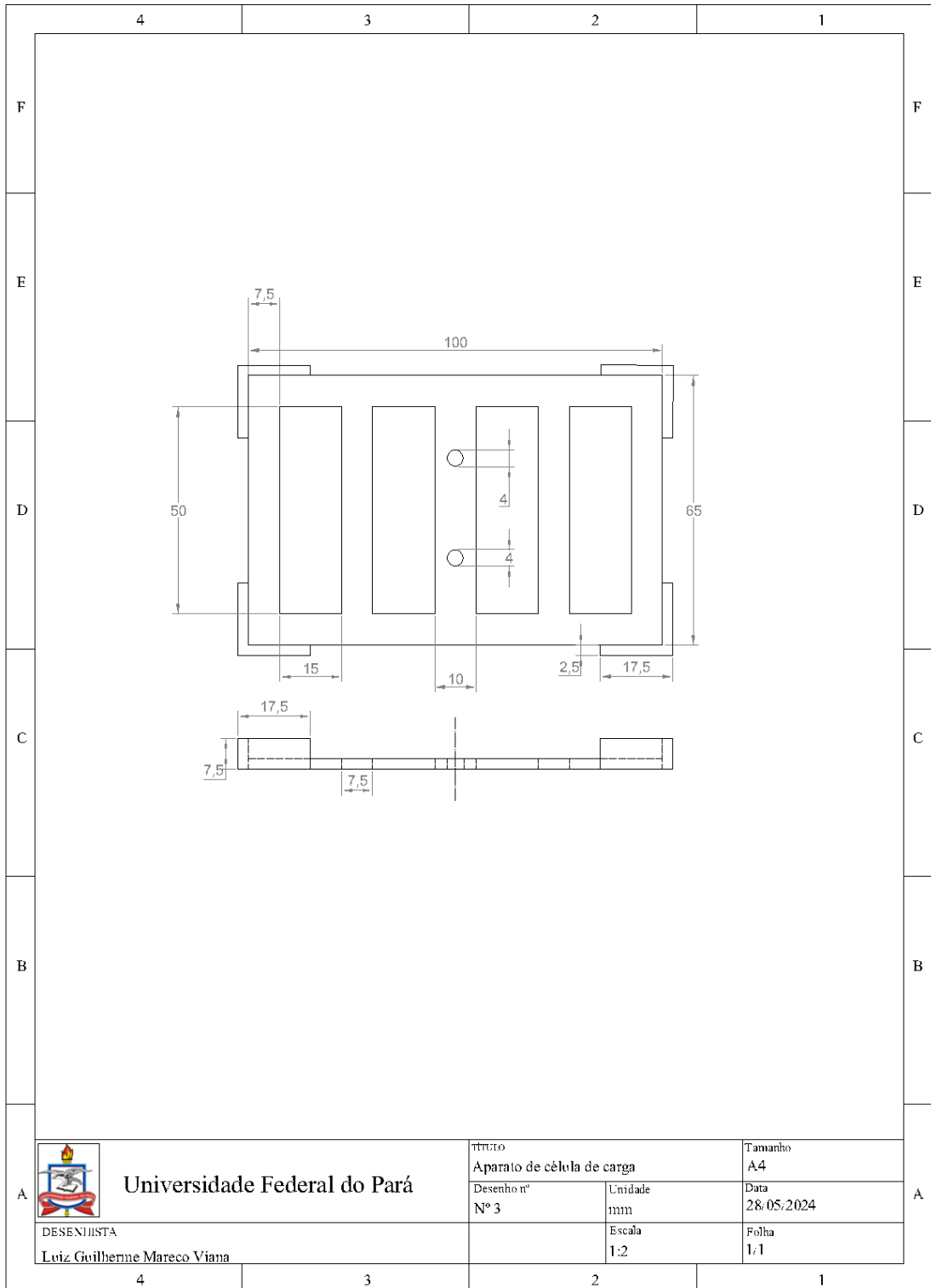
4 3 2 1




 DESENHISTA Luiz Guilherme Mareco Viana	Universidade Federal do Pará	TÍTULO Braço de alavanca	Material Aço carbono ASTM A36	Tamanho A4
		Desenho nº Nº 1	Unidade mm	Data 28/05/2024
			Escala 1:10	Folha 1:1







	Universidade Federal do Pará		Título	Tamanho
			Aparato de célula de carga	A4
	Desenho nº	Unidade	Data	
	Nº 3	mm	28/05/2024	
DESENHISTA		Escala	Folha	
Luiz Guilherme Mareco Viana		1:2	1:1	

4

3

2

1