INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RUAN BERTOLO RIBEIRO

CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DE TESTE DIDÁTICA-CIENTÍFICA PARA CARNEIRO HIDRÁULICO

Vitória
2022

RUAN BERTOLO RIBEIRO

CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DE TESTE DIDÁTICA-CIENTÍFICA PARA CARNEIRO HIDRÁULICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenadoria do Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Christian Mariani Lucas dos Santos

Vitória

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Biblioteca Nilo Peçanha do Instituto Federal do Espírito Santo)

R484c Ribeiro, Ruan Bertolo

Construção de uma bancada de teste didática-científica para carneiro hidráulico / Ruan Bertolo Ribeiro. – 2022.

38 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Christian Mariani Lucas dos Santos

Monografia (graduação) – Instituto Federal do Espírito Santo, Curso de Engenharia Mecânica, Vitória, 2022.

1. Bombas hidráulicas. 2. Mecânica dos fluidos. 3. Resistência dos materiais. 4. Simulação (computadores). 5. Material didático. 6. Engenharia Mecânica. I. Santos, Christian Mariani Lucas dos. II. Instituto Federal do Espírito Santo. III. Título.

CDD 21 – 620.106

Elaborada por Bruno Giordano Rosa – CRB-6/ES - 699

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CAMPUS VITÓRIA

Ruan Bertolo Ribeiro

CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DE TESTE DIDÁTICA-CIENTÍFICA PARA CARNEIRO HIDRÁULICO

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao curso de Engenharia Mecânica do Ifes, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânica.

Aprovado em 20 de dezembro de 2022.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Christian Mariani Lucas dos Santos
Instituto Federal do Espírito Santo
(Orientador)

Prof. M.e. Guilherme Augusto de Moraes Pinto
Instituto Federal do Espírito Santo
(Examinador)

Prof. Dr. Luis Eduardo Martins de Lima
Instituto Federal do Espírito Santo
(Examinador)

Prof. Dr. Luís Roberto Castro
Instituto Federal do Espírito Santo
(Examinador)

AGRADECIMENTOS

A Deus, que permitiu que tudo isso fosse possível, sempre me abençoando de todas formas. Aos meus pais Edson e Wanessa e à minhã irmã Karolina, que sempre me apoiaram em todas as minhas decisões, que me ajudaram diversas vezes a não desistir dos meus sonhos e sempre abraçar novos desafios. Ao meu Orientador, Prof. Dr. Christian Mariani pelo apoio, confiança, ensinamento, motivação, atenção e comprometimento em me orientar na realização desse trabalho. Com certeza meu desenvolvimento foi muito melhor com seu auxílio. Ao técnico Claudio Patrocínio Junior, que me ajudou bastante não só neste trabalho mas em projetos e trabalhos do curso. Agradeço por fim, a todos meus amigos, incluindo os que fiz durante o caminho da faculdade, por todo apoio e confiança.

RESUMO

Cada vez mais, o uso da energia elétrica se faz necessário para diversas aplcações de necessidade humana. Em propriedades rurais, é comum o uso de bombeamento de água para abastecer casas e plantações, havendo dificuldade em locais distantes da rede de alimentação elétrica. O carneiro hidráulico é um dispositivo que bombeia água sem uso de energia elétrica de um nível inferior para um nível superior com a ajuda de uma mola que realiza um trabalho cíclico, e com isso, um estudo fora de campo sobre a fadiga de sua mola é necessário. Para isso, foi elaborada a proposta para o presente trabalho da construção de uma bancada de testes do carneiro hidráulico, em que se poderá realizar ensaios de fadigas e outros estudos. Foi aplicada a seleção de materiais, bem como cálculos envolvendo resistências à flexão e à compressão, definição das dimensões, construção projeto em desenho, construção física da bancada e testes de funcionamento. A estrutura projetada resiste aos esforços solicitados, apresenta resultados favoráveis para futuros estudos de fadiga da mola e para a implementação da instrumentação física, aplicando o código criado para microcontrolador. A bancada também é passível a pesquisas envolvendo melhorias dela e de otimização do carneiro hidráulico.

Palavras-chaves: Carneiro hidráulico; Bancada didática para ensaios de fadiga de mola; Dimensionamento hidráulico; Simulação computacional; Análise de custo

ABSTRACT

Increasingly, the use of electricity is necessary for various applications of human need. In rural properties, it is common to use water pumping to supply homes and plantations, with difficulty in places far from the electrical supply network. The hydraulic ram is a device that pumps water without using electricity from a lower level to a higher level with the help of a spring that performs a cyclical work, and with that, an out-of-field study on the fatigue of its spring is necessary. For this, the proposal for the present work was elaborated for the construction of a hydraulic ram test bench, in which fatigue tests and other studies can be carried out. The selection of materials was applied, as well as calculations involving resistance to flexion and compression, definition of dimensions, construction project in drawing, physical construction of the bench and functional tests. The projected structure resists the requested efforts, presents favorable results for future studies of spring fatigue and for the implementation of the physical instrumentation, applying the code created for the microcontroller. The workbench is also subject to research involving improvements to it and optimization of the hydraulic ram.

Keywords: Gravity pump; Didactic bench for spring fatigue tests; Hydraulic sizing; Computer simulation; Cost analysis

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de golpe de aríete 12
Figura 2 – Carneiro hidráulico 13
Figura 3 – Esquema de funcionamento do processo carneiro hidráulico 14
Figura 4 – Esquema do funcionamento interno do carneiro hidráulico..... 15
Figura 5 – Valores do fator de comprimento efetivo 18
Figura 6 – Esboço da geometria da coluna telescópica..... 24
Figura 7 – Momento fletor na barra 26
Figura 8 – Desenho das barras de sustentação 27
Figura 9 – Barra de metalon modificada para a fixação..... 27
Figura 10 – Desenho 3D do adaptador 28
Figura 11 – Adaptador feito em impressora 3D 28
Figura 12 – Projeto da bancada didática 29
Figura 13 – Bancada didática-científica montada 30
Figura 14 – Adaptação para apoio do carneiro hidráulico 30
Figura 15 – Esquema da instrumentação do acionamento da bomba. 32
Figura 16 – Acionamento da bomba pelo sensor 34
Figura 17 – Desligamento da bomba pelo sensor 35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Materiais para a montagem do carneiro hidráulico 21
Tabela 2 – Propriedades mecânicas do material selecionado 25
Tabela 3 – Resultados dos esforços de compressão na coluna maior (40 mm). 25
Tabela 4 – Resultados dos esforços de compressão na coluna maior (32 mm). 25
Tabela 5 – Resultado da equação do momento fletor máximo 26
Tabela 6 – Dimensionamento da bomba 29
Tabela 7 – Componentes da bancada didática 31
Tabela 8 – Resultado das medições de vazão e rendimento do carneiro hidráulico. 32

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10
1.1 OBJETIVO GERAL 10
1.1.1 Objetivos específicos 10
2 REFERENCIAL TEÓRICO E ASPECTOS CONSTRUTIVOS 12
2.1 GOLPE DE ARÍETE 12
2.2 CARNEIRO HIDRÁULICO 12
2.2.1 Princípio de funcionamento 13
2.2.2 Fator de grandeza 15
2.2.3 Rendimento do carneiro hidráulico 16
2.2.4 Problemas associados à falha por fadiga 16
2.3 FLAMBAGEM 17
2.4 DEFLEXÃO 18
2.5 SELEÇÃO DE BOMBAS 19
2.6 ASPECTOS GERAIS DE ENGENHARIA 20
3 METODOLOGIA 21
3.1 MATERIAIS 21
3.2 PROCEDIMENTO 21
3.2.1 Projeto das colunas telescópicas 22
3.2.2 Projeto para os apoios das caixas d'água 23
4 RESULTADOS 24
4.1 COLUNA TELESCÓPICA 24
4.2 SUPORTE PARA AS CAIXAS DÁGUA 26
4.3 DIMENSIONAMENTO DA BOMBA 28
4.4 PROJETO FINAL 29
4.5 MONTAGEM FINAL 30
4.6 FATOR DE GRANDEZA 31
4.7 RENDIMENTO DO CARNEIRO HIDRÁULICO 31
4.8 INSTRUMENTAÇÃO DE ACIONAMENTO DA BOMBA 32
4.9 CUSTO DO PROJETO 35
4.10 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS 35
5 CONCLUSÃO 36

REFERÊNCIAS 37

1 INTRODUÇÃO

A água, nas propriedades rurais, é imprescindível para diversas aplicações. E muitas das vezes o uso dela se torna complicado devido à distância onde a fonte alimentadora está localizada, fazendo-se necessário o uso de tubulações e bombas para levar a água até o reservatório quando o rio ou lago se encontra em um nível igual ou inferior. Devido aos aumentos no valor da energia elétrica e a existência da crise energética no país, muitas formas de energias alternativas estão cada vez mais sendo utilizadas. Com isso, criou-se uma forma simples e sem consumo de energia elétrica: o carneiro hidráulico, que possui a função de bombeamento de água, levando-a de um nível inferior para um nível superior. Porém, além de certas desvantagens como o desperdício de água e vazão do escoamento, há também os desgastes das peças que compõem o equipamento. O contato constante com a água e por ser um processo cíclico, pode tornar o equipamento inviável após um certo tempo de uso. Por isso, se faz necessário o estudo do comportamento das peças em relação às condições de fadiga, oxidação e para otimização de funcionamento. Para isso, surge a necessidade da criação de uma bancada estrutural do carneiro hidráulico para esse tipo de estudo.

1.1 OBJETIVO GERAL

Projetar e construir uma bancada didática-científica para ensaios de obtenção dos parâmetros de funcionamento e manutenção de um carneiro hidráulico.

1.1.1 Objetivos específicos

- Montar um carneiro hidráulico;
- Projetar em forma de desenho 3D através do Inventor, a forma estrutural da bancada;
- Projetar através de cálculos e dimensionamento, os esforços necessários para suportar as cargas;
- Montar a estrutura projetada;
- Fazer testes de funcionamento e coletar os dados;

- Realizar a instrumentação do que for necessário para otimizar o processo e torná-lo automático;
- Levantar os custos financeiros necessários para a fabricação.

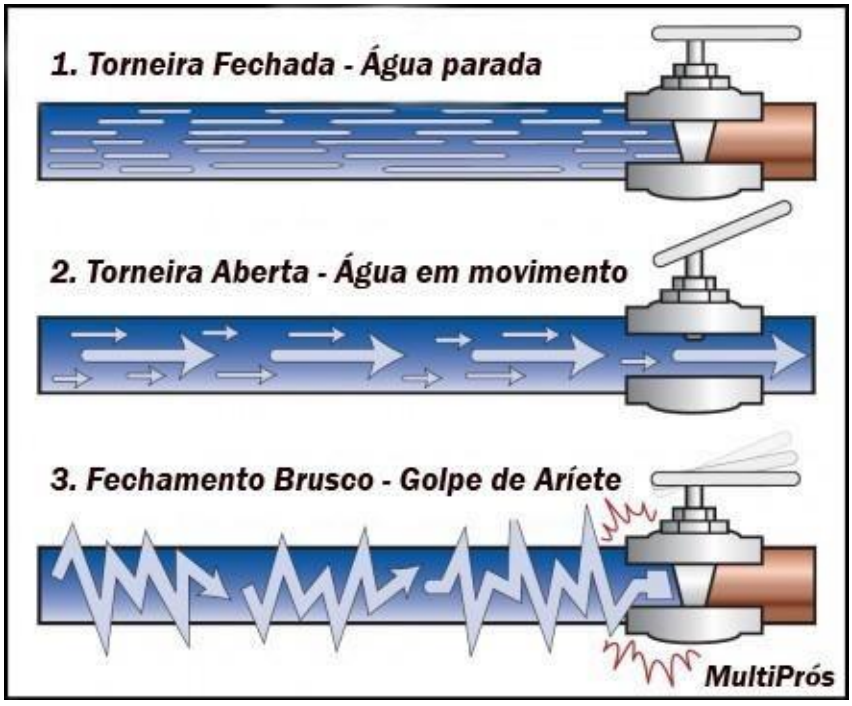
2 REFERENCIAL TEÓRICO E ASPECTOS CONSTRUTIVOS

2.1 GOLPE DE ARÍETE

O princípio chave para o funcionamento do carneiro hidráulico é um fenômeno conhecido como golpe de aríete ou martelo hidráulico. De acordo com FOX (2016, p. 43) o golpe de aríete “é causado pela propagação e reflexão de ondas acústicas em um líquido confinado”.

Um exemplo para isso, é uma tubulação com escoamento de água e um registro aberto que, ao fechá-lo normalmente, o fluido tende a refluir pela tubulação, mas ao fechá-lo bruscamente, o refluxo pode ser violento e causar um forte impacto na região obstruída, como é visto na figura 1 abaixo.

Figura 1 – Exemplo de golpe de aríete.



Fonte: Site da leiautdicas.wordpress [3].

2.2 CARNEIRO HIDRÁULICO

Para o abastecimento de água em algumas regiões rurais, é necessário o uso de bombeamento de algum lago ou rio da região que se encontre em um nível inferior.

E para isso, faz-se necessário o uso de energia elétrica que pode não ser viável ou de fácil acesso dependendo da região. Um equipamento que realiza a função de transportar água de uma região de um nível mais baixo para um de um nível elevado é o carneiro hidráulico, como mostra a figura 2.

Figura 2 – Carneiro hidráulico.

Fonte: Site do Globo rural [4].

Nesse sentido, corroborando com o que foi aludido, sabe-se que “a fonte de energia é a altura de queda d’água que, em geral, é produzida artificialmente por meio de pequena barragem” (ABATE, BOTREL, 2002, p.197).

As vantagens do carneiro, como citado anteriormente, são a não utilização de energia elétrica, facilitando para as pessoas com pouco ou nenhum acesso, reduz prejuízos ao meio ambiente por não se utilizar combustíveis para produção de energia elétrica, fácil operação e manutenção.

A principal desvantagem é a baixa eficiência que, segundo Azevedo Netto e Alvarez (1988), “o rendimento varia entre 20 e 70 por cento. De acordo com CERPCH (2002)"(apud CARARO et al., 2007, p. 2).

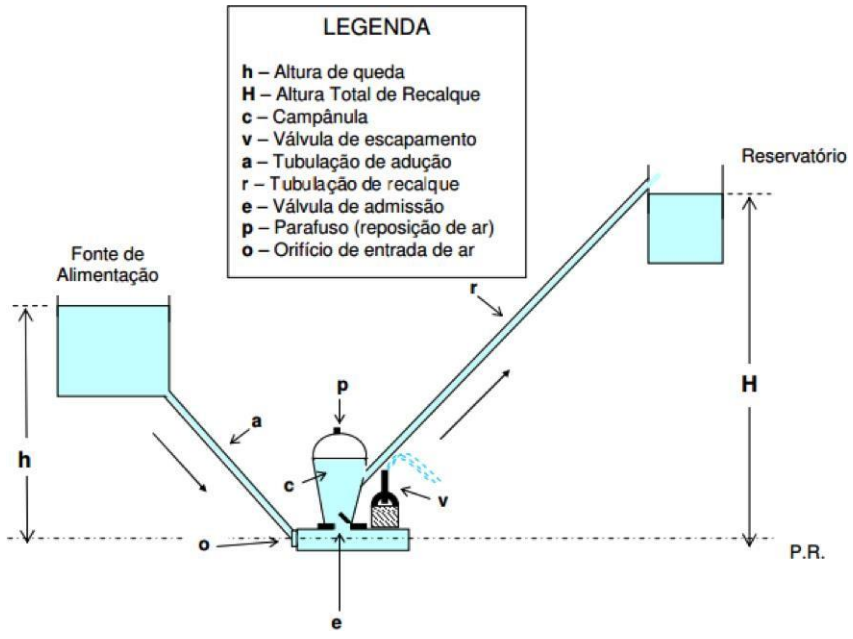
2.2.1 Princípio de funcionamento

"O sistema de bombeamento por carneiro hidráulico consiste em um tanque elevado de alimentação, a tubulação de alimentação, o carneiro com as válvulas de escape

e recalque, a câmara de ar, e a tubulação de recalque. A função da câmara de ar é armazenar água na pressão de recalque entre golpes e absorver o choque do bombeamento"(ARAÚJO JÚNIOR et al., 2018, p. 66).

Como é mostrado na figura 3, o sistema necessita, inicialmente, de energia potencial gravitacional, não podendo ser do mesmo nível do carneiro hidráulico. Assim que a água escoa da fonte de alimentação pela tubulação de adução, a energia potencial gravitacional passa a se transformar em energia cinética, chegando na válvula de escapamento ou de alívio. Em seguida, retorna e sobe para a campânula, onde a água comprime o ar e escapa pela tubulação de recalque chegando até o reservatório.

Figura 3 – Esquema de funcionamento do processo carneiro hidráulico.



Fonte: Site da gespianos wordpress [5].

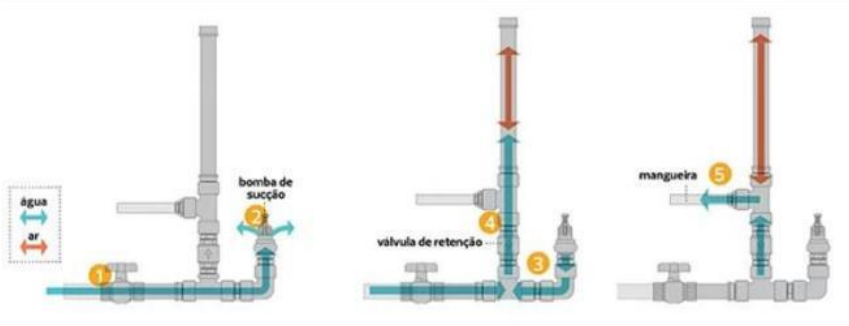
"A adoção de carneiros hidráulicos de modelo artesanal tem sido utilizada em algumas regiões do país, utilizando as águas de açudes para irrigar plantações. Os modelos de carneiros hidráulicos existente [sic] no mercado, principalmente para irrigação, como o industrial, apesar de suas vantagens, são feitos de metal fazendo com que a água não seja apropriada para o consumo humano, pois enferruja, sendo o modelo artesanal de PVC o mais indicado"(ARAÚJO JÚNIOR et al., 2018, p. 66).

Segundo CARVALHO (2008), "para o carneiro protótipo teorizou-se que após a interrupção abrupta da água há uma energia potencial gerada dentro do carneiro hidráulico, essa energia faz com que a água seja impulsionada para uma cota superior"(apud YKEDA et al., 2019, p.2).

Porém, segundo Ykeda et al. (2019, p. 2), "há uma perda de energia durante esse processo, pois parte dessa energia é dissipada quando ocorre o encontro da água que sofreu o golpe com a água que entra novamente no sistema do carneiro hidráulico".

A figura 4 mostra detalhadamente o funcionamento interno do carneiro hidráulico. A água que chega até a válvula de desperdício empurra o pino que fecha a passagem da válvula e com o golpe de aríete, retorna e choca-se com a água de adimissão, ocasionando a subida dessa água para a campânula e comprimindo o ar interno que, por sua vez, colabora para liberar a água pela mangueira.

Figura 4 – Esquema do funcionamento interno do carneiro hidráulico.



Fonte: Artigo [6].

2.2.2 Fator de grandeza

Bhoi et al. (1994) afirmaram que o fator de grandeza é a razão entre altura de recalque (H) e altura de alimentação (h), ou seja,

$$f = \frac{H}{h} \tag{2.1}$$

"Uma das características que mais divergem [sic] na literatura e entre os fabricantes é

o limite de desnível mínimo e máximo entre o reservatório de alimentação e o carneiro hidráulico"(apud ABATE, BOTREL, 2002, p. 198).

2.2.3 Rendimento do carneiro hidráulico

De acordo com Soczek et al. (2016), o rendimento do carneiro hidráulico depende da vazão elevada, da vazão recebida, ambos em litros/min, e das alturas de queda de água e elevação dela, de acordo com a equação 2 abaixo.

$$R = \frac{qH}{Qh} \tag{2.2}$$

Sendo:

- R = rendimento;
- q = vazão elevada (m³/s);
- Q = vazão recebida (m³/s);
- h = altura da queda (m);
- H = altura da elevação (m).

Segundo Oliveira et al. (2015), a vazão de entrada mínima necessária para atender a demanda é calculada pela equação:

$$V\ de\ entrada = \left(\frac{demanda}{rendimento}\right).\left(\frac{altura\ de\ saida}{altura\ de\ queda}\right) \tag{2.3}$$

2.2.4 Problemas associados à falha por fadiga

Um dos principais elementos responsáveis pelo funcionamento do carneiro hidráulico é a mola. Porém, por ela estar submetida a um movimento de repetição, ela é suscetível

a falhar por fadiga que, segundo TEIXEIRA (2004), “o termo fadiga do material significa mudanças nas propriedades do material, as quais podem ocorrer sob repetidos ciclos de carregamento e descarregamento.”

2.3 FLAMBAGEM

Para a proposta de uma estrutura que compacte o sistema do carneiro hidráulico, se faz necessário o uso de colunas de sustentação para as caixas com água. E para a seleção da geometria e material, é necessário o cálculo dos esforços. E, para as colunas, o esforço atuante é o de compressão.

Segundo HIBBELER (2010), "alguns elementos estruturais podem estar sujeitos a cargas de compressão e, se forem compridos e esbeltos, a carga poderá ser grande o suficiente para provocar uma deflexão ou uma oscilação lateral. Mais especificamente, elementos estruturais compridos e esbeltos sujeitos a uma força de compressão axial são denominados colunas, e a deflexão lateral que ocorre é denominada flambagem. Com muita frequência a flambagem de uma coluna pode resultar em uma falha repentina e dramática de uma estrutura ou mecanismo e, por isso, é preciso dedicar especial atenção ao projeto de colunas para que estas possam suportar com segurança as cargas pretendidas sem sofrer flambagem. A carga axial máxima que uma coluna pode suportar quando está na iminência de sofrer flambagem é denominada carga crítica, Pcr".

A equação utilizada para se encontrar a carga crítica é denominada de fórmula de Euler, que é definida como:

$$Pcr = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \tag{2.4}$$

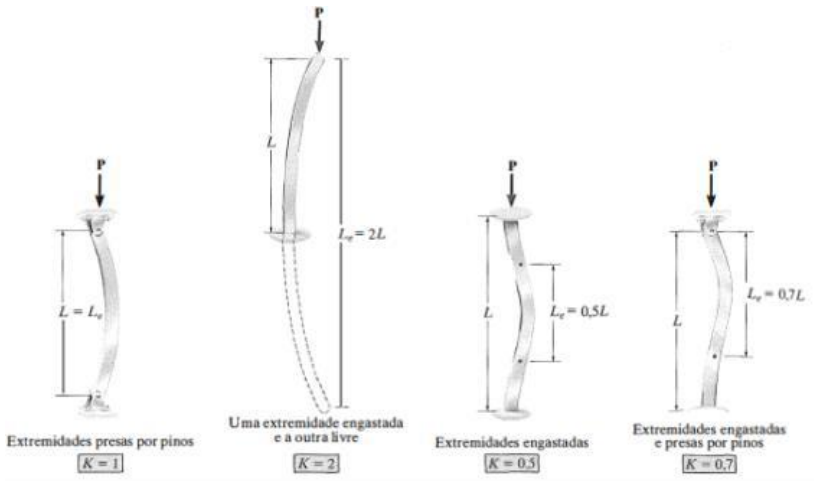
Em que:

- E = módulo de elasticidade;

- I = momento de inércia;
- L = comprimento;
- K = fator de comprimento efetivo.

O fator de comprimento efetivo é determinado pela situação em que se encontra sua coluna a ser analisada, a figura 5 mostra os valores para cada caso.

Figura 5 – Valores do fator de comprimento efetivo.



Fonte: HIBBELER (2010).

A tensão de compressão é dada pela mesma equação de pressão, porém a carga exercida é a crítica fornecida pela fórmula de Euler.

$$\sigma cr = \frac{\pi^2 EI}{(\frac{KL}{r})^2} \tag{2.5}$$

2.4 DEFLEXÃO

A deflexão é o termo utilizado para se obter a inclinação e deslocamento de uma viga ou eixo.

De acordo com Hibbeler (2010), "o diagrama da deflexão do eixo longitudinal que passa pelo centróide de cada área da seção transversal da viga é denominado linha elástica. Na maioria das vigas, o rascunho da linha elástica pode ser traçado sem muita dificuldade. Todavia, antes disso é necessário saber como a inclinação ou o deslocamento da viga são restringidos pelos vários tipos de apoio. Em geral, os apoios que resistem a uma força, como um pino, restringem o deslocamento, e os apoios que resistem a um momento, como uma parede fixa, restringem a rotação ou a inclinação, bem como o deslocamento".

Para calcular a deflexão de um determinado ponto da viga ou eixo, utiliza -se a equação abaixo.

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \tag{2.6}$$

2.5 SELEÇÃO DE BOMBAS

Uma das características de funcionamento do carneiro hidráulico é o desperdício de água na válvula de poço e, com isso, para um circuito fechado, necessita-se de levar a água desperdiçada para o tanque de água inicial, ou seja, faz-se necessário o uso de uma bomba.

De Acordo com Çengel (2013, pág 59), "a energia mecânica é a forma de energia que pode ser convertida completa e diretamente em trabalho mecânico por um dispositivo mecânico ideal". E ela pode ser determinado por:

$$W = m\left(\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta V^2}{2} + g\Delta z\right) \tag{2.7}$$

Onde:

- W = potência;

- m = vazão mássica;
- ΔP = variação de pressão;
- ρ = massa específica;
- ΔV = variação de velocidade;
- g = gravidade;
- Δz = variação de altura.

2.6 ASPECTOS GERAIS DE ENGENHARIA

Para a realização deste trabalho, os aspectos voltados à construção mecânica abordaram as temáticas e princípios de vazão, pressão, compressão, deflexão, resistências à cargas, hidráulica, mecânica dos fluidos, e eletrônica. Respectivamente, os autores voltados aos temas são ÇENGEL, HIBBELER e FOX. Em adição, as disciplinas correlacionadas aos temas e autores são termodinâmica, resistência dos materiais, hidráulica e pneumática, mecânica dos fluidos, instrumentação e introdução a eletrônica.

3 METODOLOGIA

Correlacionado aos objetivos específicos, a metodologia adotada segue de forma descritiva, ainda com a citação dos materiais empregados no protótipo construído.

3.1 MATERIAIS

Para a montagem do carneiro hidráulico, necessitou-se dos materiais, como mostra a tabela 1.

Tabela 1 – Materiais para a montagem do carneiro hidráulico.

Item	Especificação	Quantidade
Niple	32 mm	4
Joelho 90º	32 mm	1
T	32 mm	2
Registro gaveta	32 mm	1
Válvula de retenção vertical	1 pol	1
Adaptador para mangueira	-	1
Aptadores curtos (PVC)	32 mm	2
Cap	32 mm	1
Cano PVC	17,4 cm	1
Cano PVC	40 cm	1
Fita veda-rosca	25 x 18 mm	1
Mangueira	-	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.2 PROCEDIMENTO

Para a montagem de uma bancada didática de estudos do carneiro hidráulico, necessita-se projetar inicialmente:

- Base para a água despejada da válvula de desperdício do carneiro;

- Duas caixas de água para altura inicial e outra com a altura desejada para levar a água;
- Sistema que compacte a estrutura para armazenamento e para suportar as cargas;

Com a utilização estrutural de uma impressora antiga, fez-se a desmontagem para aproveitar a base da estrutura metálica. Para a ideia de se fazer uma bancada de estudos para o carneiro hidráulico, necessitou-se da elevação das caixas d'água e, para isso, iniciou-se o planejamento de construção de um elevador telescópico.

Para o presente trabalho, a definição dos procedimentos para a execução do projeto, em conjunto com a seleção de materiais, são apresentadas a seguir:

- Escolha da geometria;
- Escolha do material;
- Pesquisa sobre as propriedades mecânicas;
- Dimensionamento;
- Calcular esforços;
- Montagem;
- Teste;
- Validação.

3.2.1 Projeto das colunas telescópicas

Nas colunas, fez-se a escolha do cano PVC e, para a ideia da coluna telescópica, considerou-se os esforços de compressão, que possuem a função de sustentação das caixas com água.

Em seguida, fez-se a escolha dos diâmetros para o material a ser analisado.

Foi utilizado o procedimento do método para os esforços de compressão e da análise de flambagem com a carga crítica e a tensão crítica representadas pelas equações 2.4 e 2.5, respectivamente.

Com isso, foram feitos os desenhos para projeto. Por fim, foi realizada a montagem com uso de abraçadeiras de aço para o suporte das colunas.

3.2.2 Projeto para os apoios das caixas d'água

Para os apoios, necessitou-se de uma estrutura que não só suporte as caixas, mas também garanta espaço e pouco peso estrutural. A ideia foi segurar de forma firme e que haja bom aproveitamento de espaço. E para isso, escolheu-se um material e um perfil simples, que ocupasse pouco espaço e de fácil acesso de se obter.

A partir da escolha do perfil, fez-se a análise do tamanho limitado pelas colunas que sustentarão as barras. A análise de esforço para essa situação é a de deflexão da barra para a carga exercida, onde o perfil deverá suportar o esforço e possuir o mínimo de deflexão.

Com isso, realizou-se o método das seções, utilizando o somatório dos momentos e das forças, para encontrar a equação do momento em cada seção, e calculou-se a deflexão máxima da barra com a equação 2.6.

Após isso, foi realizado o desenho de projeto para a sustentação das caixas.

Em seguida, fez-se as devidas montagens, inserindo as caixas para armazenamento de água, o sistema de vazão e a conexão com o carneiro hidráulico.

Por fim, com intuito de realizar um sistema fechado, surgiu a necessidade de elevar a água despejada pela válvula desperdício. E para isso, fez-se a escolha da bomba ideal para o sistema, com base no cálculo de potência para a altura desejada com a equação 2.7, e criou-se também o código para instrumentação com sensor de nível para funcionamento automatico da bomba. Após, foi finalizada a montagem final, na qual foram verificados a existência de vazamentos e por fim, o teste final de funcionamento.

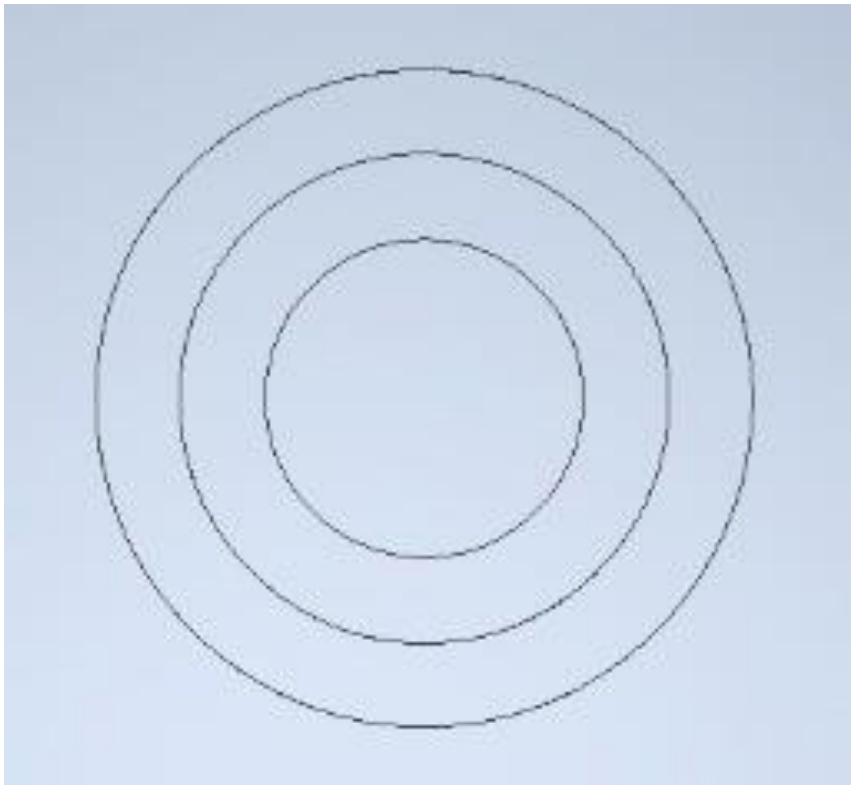
4 RESULTADOS

Com base na metodologia apresentada e aplicando os métodos necessários para a construção, chegou-se nos resultados.

4.1 COLUNA TELESCÓPICA

Para as colunas, foi escolhido o perfil tubular como mostra a figura 6. As dimensões escolhidas foram com os seguintes diâmetros: 40 mm, 32 mm, e 25 mm, de comprimentos: 1,40 m, 1,55 m e 1,70 m, respectivamente. A escolha dos diâmetros se deu com base na folga necessária para um bom funcionamento e não ocupavam muito espaço na base estrutural.

Figura 6 – Esboço da geometria da coluna telescópica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para encontrar o peso que a estrutura deverá suportar, fez-se a conversão do volume em litros da caixa para unidade de massa em kg, resultando em 29 kg. Em seguida calculou-se o peso pela equação:

$$P = m \, . \, g \tag{4.1}$$

Chegando a um resultado de P = 284,5 N.

Com isso, fazendo uma pesquisa com o material selecionado, encontrou-se através do site [15], as propriedades mecânicas necessárias do PVC, que foi utilizado, para os cálculos de esforços de compressão solicitados na estrutura, como mostra a tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do material selecionado.

Material escolhido	**Densidade (g/cm³)**	**Módulo de elasticidade (GPa)**	**Tensão de escoamento (MPa)**
PVC	1,43	3	50

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Foram realizados os cálculos de esforços de compressão para os diâmetros de 40 mm, e para os de 32 mm, que sofrerá esforço de compressão da caixa superior. Com essas informações, têm-se os seguintes resultados mostrados nas tabelas 3 e 4:

Tabela 3 – Resultados dos esforços de compressão na coluna maior (40 mm).

Material escolhido	**Momento de inércia (cm^4)**	**Carga crítica (N)**	**Tensão crítica (MPa)**	**Tensão aplicada (MPa)**
PVC	3,06	1851,81	6,38	1,74

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 4 – Resultados dos esforços de compressão na coluna maior (32 mm).

Material escolhido	**Momento de inércia (cm4)**	**Carga crítica (N)**	**Tensão crítica (MPa)**	**Tensão aplicada (MPa)**
PVC	1,54	761,24	3,27	2,17

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Observa-se que a carga crítica é maior que a carga de projeto das caixas d'água cheias (284,5 N), que a tensão crítica é menor que a tensão de escoamento e maior que a tensão aplicada à estrutura, não ocasionando falha por flambagem.

4.2 SUPORTE PARA AS CAIXAS D'ÁGUA

O material e perfil escolhido para a sustentação das caixas d'água foi o metalon galvanizado 20 x 20 mm com 41,5 cm de comprimento.

Na deflexão, utilizando as propriedades do material adquiridas em [16], com o método das seções, obteve-se o momento fletor e, com o cálculo de deflexão, encontrou-se a flecha máxima.

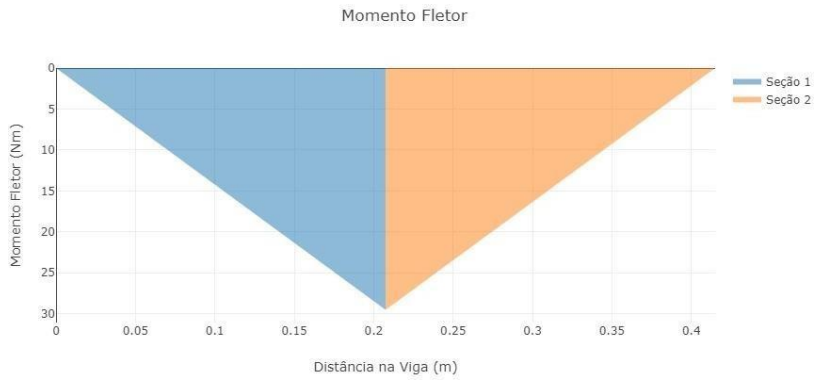
Tabela 5 – Resultado da equação do momento fletor máximo.

Dimensão (mm)	**Momento de inércia (cm4)**	**Módulo de elasticidade (GPa)**	**Momento fletor (N.m)**	**Deflexão (mm)**
20x20	0,57	205	29,52	1,27

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Como é mostrado na figura 7 e pelo resultado na tabela 5, a flexão máxima se encontra no meio da barra, com um valor bem pequeno à olho nu.

Figura 7 – Momento fletor na barra.



Fonte: https://www.aprenderengenharia.com.br/viga-online.

O desenho do projeto da sustentação das caixas superiores é mostrado na figura 8.

Figura 8 – Desenho das barras de sustentação.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para a fixação do suporte para as caixas de água, necessitou-se de uma mudança na geometria da barra que suporta a caixa, como mostra a figura 9, e utilizou-se abraçadeiras para a fixação das barras na coluna telescópica.

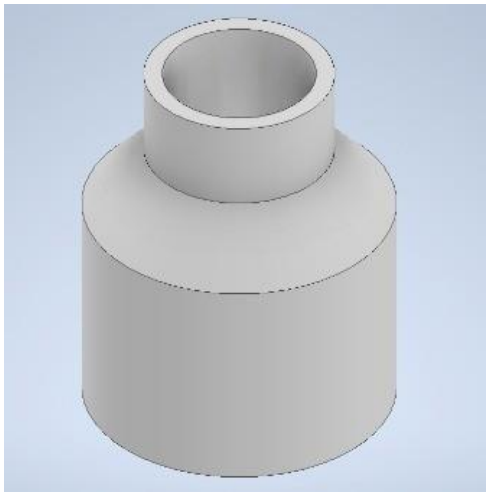
Figura 9 – Barra de metalon modificada para a fixação.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para a vazão da caixa e conexão com o carneiro, necessitou-se de sifões de esgoto e, para a conexão de um deles com o cano de PVC de entrada do carneiro, criou-se um redutor pela impressora 3D GTMax3D Core A3 de patrimônio 116890 com as medidas exatas para o encaixe, já que não foi encontrado no mercado de materiais.

A redução medida para adaptar a tubulação possui uma redução do diâmetro de 38,3 mm para 22 mm, possuindo o formato mostrado na figura 10.

Figura 10 – Desenho 3D do adaptador.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O resultado da impressão é mostrado na figura 11.

Figura 11 – Adaptador feito em impressora 3D.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.3 DIMENSIONAMENTO DA BOMBA

Para a bomba, utilizou-se os seguintes dados da eletrobomba de máquina de lavar de 110V e 37 W de potência, disponíveis no site do fornecedor. E com isso fez-se o

cálculo da altura manométrica máxima alcançada pelo bombeamento como mostrado abaixo, medindo anteriormente a vazão da bomba e utilizando gravidade igual a 9,81 m/s², e densidade da água igual a 1000 kg/m³.

Tabela 6 – Dimensionamento da bomba.

Potência (W)	**Vazão volumétrica (m³/s)**	**Vazão mássica (Kg/s)**	**Altura máxima (m)**
37	0,000117	0,12	32,3

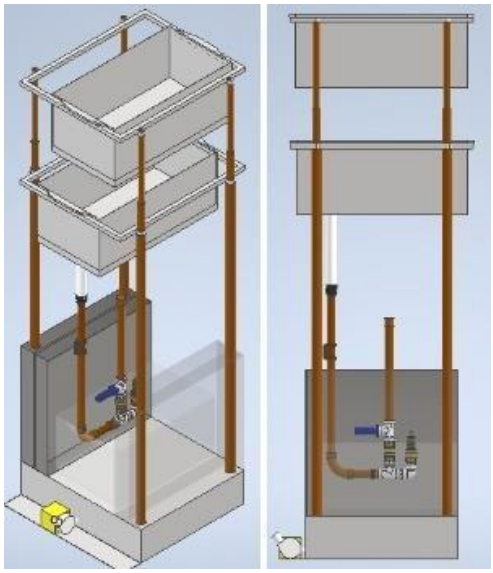
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A partir disso, definiu-se que a eletrobomba de máquina de lavar de 110V e 37 W de potência será utilizada na estrutura, pois a altura necessária de 1,5 m é menor que a máxima elevada pela bomba e atende para testes futuros em que haverá o aumento da altura inicial.

4.4 PROJETO FINAL

Após dimensionamentos, a estrutura foi definida como mostra a figura 12 abaixo.

Figura 12 – Projeto da bancada didática.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.5 MONTAGEM FINAL

Realizando as montagens com os perfis dos materiais e dimensões selecionadas, obteve-se, por fim, a estrutura mostrada na figura 13.

Figura 13 – Bancada didática-científica montada.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Alguns reforços foram utilizados para adaptar o carneiro à estrutura como mostrado abaixo.

Figura 14 – Adaptação para apoio do carneiro hidráulico.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A bancada apresenta os seguintes componentes:

Tabela 7 – Componentes da bancada didática.

Componente	Especificação	Quantidade
Suporte da bancada	Carcaça de impressora	1
Cano PVC	Ø 40 mm x 1,40 m	4
Cano PVC	Ø 32 mm x 1,55 m	4
Cano PVC	Ø 25 mm x 1,70 m	4
Abraçadeiras	Ø 40 mm	15
Abraçadeiras	Ø 32 mm	4
Barra metalon	20 mm x 20 mm x 41,5 cm	2
Barra metalon	20 mm x 20 mm x 40,5 cm	2
Barra metalon	20 mm x 20 mm x 54,2 cm	2
Barra metalon	20 mm x 20 mm x 52,3 cm	2
Cap	Ø 25 mm	4
Caixa organizadora	Ø 40 mm	19
Flange	-	3
Sifão de pia	0,5 m	3
Redução	Ø 38,3 mm - Ø 22 mm	1
Bomba	110V	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.6 FATOR DE GRANDEZA

Seguindo a equação 2.1, e sendo a altura de alimentação igual a 0,80 m e a de recalque igual a 1,70 m, tem-se um fator de grandeza de 2,125.

4.7 RENDIMENTO DO CARNEIRO HIDRÁULICO

Com os dados coletados em experimento de funcionamento da bancada, tem-se, mostrado na tabela 8 os resultados das vazões, de queda e de elevação realizada pelo carneiro hidráulico.

Também foi realizado o cálculo do rendimento pela equação 2.2, com o resultado também mostrado pela tabela 8.

Tabela 8 – Resultado das medições de vazão e rendimento do carneiro hidráulico.

Altura inicial (m)	Altura de recalque (m)	Vazão elevada (m^3/s)	Vazão recebida (m^3/s)	Rendimento (%)
0,8	1,7	0,00002	0,0004	10

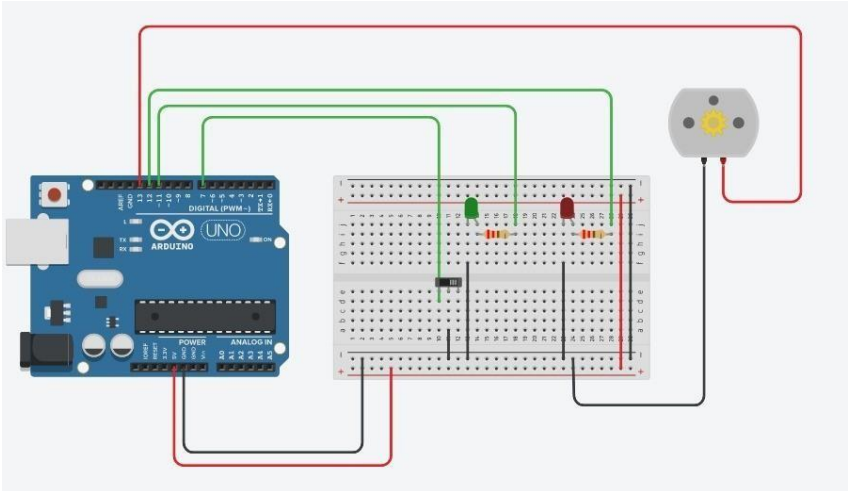
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Comparando o rendimento obtido com a informação de Cararo (2007) citada em referencial teórico e aspectos construtivos, o valor está abaixo do intervalo (20 a 70%).

4.8 INSTRUMENTAÇÃO DE ACIONAMENTO DA BOMBA

Para o acionamento da bomba, tem-se a representação esquemática, utilizando o Tinkercad para simulação do circuito envolvendo o microcontrolador Arduino Uno, mostrado na figura 15. Os cabos em vermelho são de alimentação do sistema, os pretos de terra e, os verdes, de conexão com o microcontrolador.

Figura 15 – Esquema da instrumentação do acionamento da bomba.



Fonte: Elaborado pelo autor através do Tinkercad. (2022).

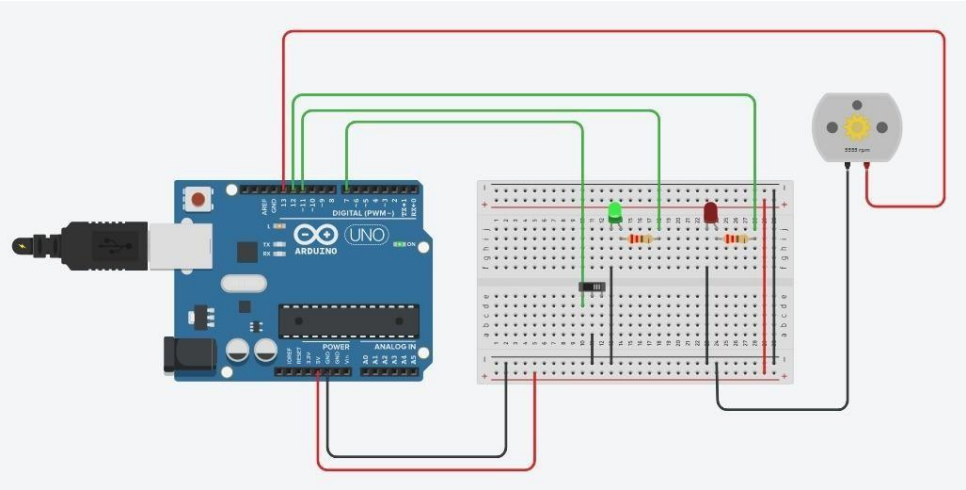
Para o funcionamento e simulação, fez-se o código abaixo.

```
int ledverde = 11;

int ledvermelho = 12;

int motor = 13;

int sensor = 7;

int a;

void setup(){

pinMode(ledverde,OUTPUT);

pinMode(ledvermelho,OUTPUT);

pinMode(motor,OUTPUT);

pinMode(sensor,INPUT);

digitalWrite(sensor,  HIGH);  }

void loop(){

a = digitalRead(sensor);

ligamotor();

desligamotor();

}

void ligamotor(){

if (a == HIGH){

digitalWrite(ledverde, HIGH);
```

```
digitalWrite(ledvermelho, LOW);

digitalWrite(motor, HIGH);

} }

void desligamotor(){

if (a == LOW){

digitalWrite(ledverde, LOW);

digitalWrite(ledvermelho, HIGH);

digitalWrite(motor, LOW);

} }
```

O funcionamento se dá quando o nível de água aciona o sensor que é representado pelo botão deslizante. Se o estado lógico do sensor for HIGH, a bomba que é representada pelo motor CC da figura 11, será acionada e o LED verde acende (Figura 16).

Figura 16 – Acionamento da bomba pelo sensor.

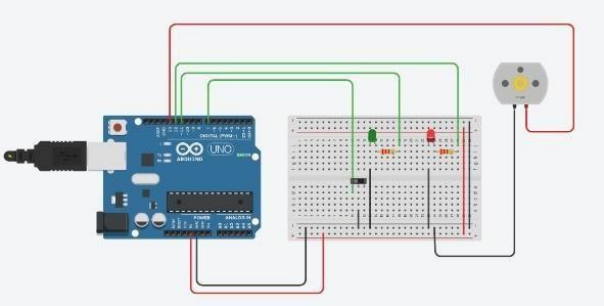


Fonte: Elaborado pelo autor através do Tinkercad. (2022).

Quando o nível de água abaixar o sensor, representado pelo botão deslizanto, estará

no estado lógico LOW, desligando a bomba, apagando o LED verde e acendendo o LED vermelho, representando que a bomba está desligada (Figura 17), parando de puxar a água da caixa de recebimento de água pela válvula de desperdício.

Figura 17 – Desligamento da bomba pelo sensor.



Fonte: Elaborado pelo autor através do Tinkercad. (2022).

Devido ao prazo curto, não houve tempo suficiente para a aquisição e montagem real na bancada.

4.9 CUSTO DO PROJETO

Somando-se todos os custos dos materiais comprados para a estrutura com base sempre na otimização de tamanhos e espaçamento, os gastos totais para a fabricação da bancada didática-científica para ensaios foi de R$ 439,20.

4.10 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudos de fadiga da mola e seu tratamento térmico para aumento de ciclos;
- Estudos sobre a otimização do funcionamento do carneiro hidráulico: altura máxima, rendimento, vazões e perda de carga do sistema hidráulico;
- Instrumentação da bancada: aplicação do sensor de nível, implementação de LED com informações do sistema: vazão, pressão, entre outros;
- Simulação computacional de esforços e do comportamento do escoamento.

5 CONCLUSÃO

O propósito principal deste trabalho foi de projetar e construir uma bancada didática e científica para estudos de fadigas da mola do carneiro hidráulico. As principais vertentes alcançadas neste trabalho foram as de projetar uma estrutura que suportasse as cargas de compressão e flexão aplicadas para armazenamento e circulação de um circuito hidráulico fechado de água com uma altura e esquema de tubulação para manter o funcionamento do carneiro hidráulico, a escolha de uma bomba que pudesse escoar a água acumulada devido ao desperdício na válvula de poço, e a instrumentação para o funcionamento automático que não pode ser aplicada, mas feita a simulação.

Um ponto de relevância mostrado pelo estudo em questão é a abrangência de possibilidades de melhorias e de estudos que podem ser realizados com a bancada projetada e montada.

Em relação aos custos, pode-se concluir que, para a fabricação, não foi um sistema muito caro quanto poderia ser, sendo otimizado tanto em espaço quanto em material, já que é uma plataforma móvel e compacta, como também otimizada financeiramente.

REFERÊNCIAS

[1] FOX, Robert W. et al. Introdução à Mecânica dos Fluidos. 8. ed. [S. l.]: LTC, 2016.

[2] ABATE, Caroline; BOTREL, Tarlei Arriel. Carneiro hidráulico com tubulação de alimentação em aço galvanizado e em PVC. [S. l.], 2002. Disponível em: https://www.scielo.br/j/sa/a/FtqywcrfBJJjCfJjvN5zSFM/abstract/?lang=pt. Acesso em: 4 out. 2022.

[3] Disponível em: https://leiautdicas.wordpress.com/2015/08/25/cap-2-dispositivos-controladores-de-pressao-2/. Acesso em: 10 out. 2022.

[4] Disponível em: https://globorural.globo.com/vida-na-fazenda/gr-responde/noticia/2019/09/aprenda-fazer-um-carneiro-hidraulico.html. Acesso em: 10 dez. 2022.

[5] Disponível em: https://gespianos.wordpress.com/2014/11/12/carneiro-hidraulico-tecnologia-barata-e-eficiente/. Acesso em: 10 dez. 2022.

[6] AGUIAR, João Felipe; S SANTOS, Cassio Sasse dos. SUSTENTABILIDADE ECONÔMICA: REUSO DA ÁGUA DO TRATAMENTO DE ESGOTO PARA IRRIGAÇÃO ATRAVÉS DO CARNEIRO HIDRÁULICO. [S. l.], 16 fev. 2017. Disponível em: https://www.iffarroupilha.edu.br/noticias-jc/item/3739-sustentabilidade-econ

[7] CARARO, Denis C. et al. Características construtivas de um carneiro hidraúlico com materiais alternativos. [S. l.], Agosto 2007. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/mSw7vBFPbcVzMh9kxjCtCVs/?lang=pt. Acesso em: 4 out. 2022.

[8] ARAÚJO JÚNIOR, Josemildo Verçosa de et al. COMPETIÇÃO DE CARNEIRO HIDRÁULICO DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ALAGOAS COMO FERRAMENTA PRÁTICA DE APRENDIZAGEM DA DISCIPLINA DE HIDROLOGIA. [S. l.], 31 dez. 2018. Disponível em: https://www.seer.ufal.br/index.php/revistacienciaagricola/article/view/6639/4801. Acesso em: 4 out. 2022.

[9] YKEDA, Gustavo Eiji et al. Estudo do rendimento de bombeamento para um protótipo de carneiro hidráulico de PVC. [S. l.], Março 2019. Disponível em: https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/1258/pdf. Acesso em:

4 out. 2022.

[10] SOCZEK, Maria Luciana et al. O CARNEIRO HIDRÁULICO COMO ELEMENTO MOTIVADOR AO ESTUDO DE HIDRODIN MICA. [S. l.], 2016. Disponível em: http://www.diadiaeducacao.pr.gov.br/portals/cadernospde/pdebusca/producoes_pde/2016/2016_artigo_fis_unioeste_marialucianasoczek.pdf. Acesso em: 4 out. 2022.

[11] OLIVEIRA, Tallis José Cardos de et al. Eficiência do Carneiro Hidráulico para bombeamento de água. [S. l.], 2015. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/142437/ISSN2176-9761-2015-01-04-oliveira-cardos.pdf?sequence=1&isAllowe d=y. Acesso em: 4 out. 2022.

[12] ÇENGEL, Yunus A. et al. TERMODINÂMICA. 7. ed. [S. l.]: McGraw Hill, 2013.

[13] TEIXEIRA, RICARDO SANTOS. METODOLOGIA DE ANÁLISE DE FADIGA EM COMPONENTES ESTRUTURAIS DE AÇO BASEADA NA MEC NICA DA FRATURA. [S. l.], 28 abr. 2004. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/FACO -6AYH8B. Acesso em: 12 out. 2022.

[14] HIBBELER, R. C. RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS. 7. ed. [S. l.]: PEARSON, 2010.

[15] CLORETO DE POLIVINILA (PVC): Plásticos de Engenharia. [S. l.]. Disponível em: https://lastro.ind.br/materias-primas/pvc. Acesso em: 14 nov. 2022.

[16] LUZ, Gelson. Aço SAE 1020 Propriedades (e Fornecedores do Aço 1020). Blog Materiais, [s. l], 2017. Disponível em: https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco- sae-1020-propriedades-mecanicas.html. Acesso em: 14 de Novembro de 2022.

[17] https://www.tinkercad.com/. Acesso em 6 dez. 2022.