



Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA
Engenharia de Energia

Diagnóstico de Vazamentos em Reservatório para Bancada de Ensaios de Turbina Hidráulica

Autor: Jéssica Brito Rocha
Orientador: Prof. Dr. Luciano Gonçalves Noletto

Brasília, DF
2018



Jéssica Brito Rocha

Diagnóstico de Vazamentos em Reservatório para Bancada de Ensaios de Turbina Hidráulica

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Universidade de Brasília – UnB

Faculdade UnB Gama – FGA

Orientador: Prof. Dr. Luciano Gonçalves Noletto

Brasília, DF

2018

Jéssica Brito Rocha

Diagnóstico de Vazamentos em Reservatório para Bancada de Ensaios de Turbina Hidráulica/ Jéssica Brito Rocha. – Brasília, DF, 2018-
69 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Gonçalves Noletto

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA , 2018.

1. Forças Hidrostáticas. 2. Ensaio de Turbinas Hidráulicas. I. Prof. Dr. Luciano Gonçalves Noletto. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Diagnóstico de Vazamentos em Reservatório para Bancada de Ensaios de Turbina Hidráulica

CDU 02:141:005.6

Jéssica Brito Rocha

Diagnóstico de Vazamentos em Reservatório para Bancada de Ensaios de Turbina Hidráulica

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 11 de dezembro de 2018:

Prof. Dr. Luciano Gonçalves Noletto
Orientador

**Prof. Dra. Rita de Cássia Silva, UnB/
FGA**
Convidado 1

**Prof. Dr. Jorge Andrés Cormane
Angarita, UnB/ FGA**
Convidado 2

Brasília, DF
2018

Agradecimentos

Escrevo estes agradecimentos com emoção, lembrando de tudo o que passei nessa graduação. Foram muitas as dificuldades, desde o início, mas tive muitas pessoas ao meu lado, que muito me incentivaram, lembro de todas com muito carinho.

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, que sempre esteve ao meu lado, me dando toda a força que eu necessitei. À Nossa Senhora, que me protegeu e esteve comigo em todas as horas difíceis, eu sei que estava.

Aos meus pais Gerson Oliveira e Alzira Veras, e ao meu irmão Gerson Junior, que são a minha família que tanto amo, que me passaram toda a simplicidade e humildade, valores que sempre carrego comigo, que sempre me apoiaram e acreditaram em mim. Sei que estão muito orgulhosos com a minha conquista.

À família que estou construindo com Natan Augusto meu esposo e Alice Rocha minha filha, meus amores, motivação de todas as minhas lutas diárias. Antes de vocês eu não era tão responsável e tão guerreira quanto sou hoje, amo vocês, nossa vida, nossa casa, nossa união. Tenho certeza que essa vitória é muito mais saborosa porque foi conquistada com vocês e teremos muitas mais a comemorar.

À minha amiga na graduação Karen Beatriz, sem você sinceramente eu não sei se conseguiria, me inspirei em você em muitos momentos, muito obrigada pelos puxões de orelha, por me levantar quando tantas vezes eu quis desistir, por tonar meus dias mais leves, e também por compartilhar muitos momentos bons e felizes, tanto na universidade, quando fora dela.

À minha grande amiga Fernanda, que por tantos anos vem sendo minha amiga, confidente, apoiadora, fico feliz com as conquistas dela e ela com as minhas, obrigada por ser um exemplo, uma das pessoas em quem me inspiro, e por me apoiar e compartilhar coisas boas comigo.

Ao meu professor orientador Luciano Noletto, que exerce uma profissão tão bonita que é ser professor e se preocupa com o aprendizado dos seus alunos, me ensinou muito tanto nas disciplinas quanto na orientação, e sempre foi paciente com as minhas particularidades.

Ao pessoal do meu estágio no Ministério de Minas e Energia, que foram muito pacientes comigo, me ajudaram sempre no que fosse preciso e não mediram esforços nesse final de curso para que eu conseguisse conciliar todas as tarefas que eu tinha de cumprir.

Aos meus sogros, Célia Serra e Onofre Rodrigues, que muito me incentivaram também, não mediram esforços em me ajudar, e sei que ficam muito felizes com a minha

conquista.

Agradeço também a todos que em algum momento me ajudaram na concretização desse sonho. Tenho certeza que jamais teria conseguido sem vocês.

Resumo

A bancada para ensaio de turbinas hidráulicas da FGA é um aproveitamento hidrelétrico didático, que permite aos alunos na universidade ter aulas práticas, proporcionando uma visualização de conceitos aprendidos em sala de aula, desde mecânica dos fluidos, hidroeletricidade até sistemas de controle. Ocorre que desde o final do segundo semestre do ano de 2017, vazamentos estão acontecendo no reservatório da bancada, impossibilitando a continuação das aulas. Sendo assim, o objetivo do presente trabalho é investigar as causas de tais vazamentos, realizando estudos de forças hidrostáticas, esforços, tensões e deflexão, além disso, orientar boas práticas de uso para preservar a estrutura. O estudo mostrou que a ordem de grandeza das forças hidrostáticas está entre $10^2 N$ e $10^3 N$, os esforços de cisalhamento maiores são da ordem de $10^2 N$ e de momento fletor são da ordem de $10^2 Nm$. As tensões estão na ordem de $10^2 kN/m^2$ e a deflexão nas paredes está entre as faixas de $10^{-6} m$ e $10^{-9} m$. O diagnóstico é que a junção de todos esses efeitos por um período de tempo levou ao rompimento da solda do reservatório. Orientou-se esvaziar o reservatório nos períodos em que não for utilizado, a fim de preservar o mesmo de esforços e tensões, deve-se ainda realizar inspeções rotineiras, a fim de verificar a integridade das estruturas e da solda.

Palavras-chaves: forças hidrostáticas, bancada didática, ensaio de turbinas hidráulicas.

Abstract

The FGA hydraulic turbine test bench is a pedagogic hydroelectric potential, which allows students in the university to take practical classes, providing a visualization of concepts learned in the classroom, from fluid mechanics, to hydroelectricity to control systems. Since the end of the second half of 2017, leaks are occurring in the reservoir of the hydroelectric bench, making it impossible to continue the classes. Therefore, the objective of the present work is to investigate the causes of such leaks, conducting studies of hydrostatic forces, and also to identify the risks in the laboratory. The study showed that the order of magnitude of the hydrostatic forces is between 10^2N e 10^3N , os esforços de cisalhamento são da ordem de 10^2N , and bending moment are of the order of 10^2N . The shear stresses are in the order of $10^2\text{kN}/\text{m}^2$ and the deflection is between 10^{-6} and 10^{-9}m . The diagnosis is that the junction of all these effects over a long time led to the rupturing of the weld. It was advised to empty the tank during periods when it was not used, with the purpose of preserving it from the efforts and tensions. Routine inspections should also be carried out in order to verify structures and welding.

Key-words: hydrostatic forces, pedagogic hydroelectric potential, hydraulic turbine testing

Lista de ilustrações

Figura 1 – Esquema de um aproveitamento hidrelétrico. Fonte: (MELEGARI, 2018)	17
Figura 2 – Turbina Indalma. Fonte: (OLIVEIRA, 2014)	20
Figura 3 – Esquemático da bancada. Fonte: (OLIVEIRA, 2014)	22
Figura 4 – Manômetro. Fonte: Autora	23
Figura 5 – Freio de Prony. Fonte: (ALVES, 2018)	24
Figura 6 – Sensor indutivo de rotação. Fonte: (CALIXO, 2015)	25
Figura 7 – Sensor eletromagnético de vazão. Fonte: Autora	26
Figura 8 – Método Vertedouro Triangular. Fonte: (OLIVEIRA, 2014)	26
Figura 9 – Vertedor. Fonte: Autora	26
Figura 10 – Superfície Plana Submersa. Fonte: (WHITE, 2007)	29
Figura 11 – Centróides e Momentos de Inércia de Figuras Planas. Fonte: (PÉREZ, 2015)	31
Figura 12 – Volume de Controle Arbitrário. Fonte:(WHITE, 2007)	32
Figura 13 – Tipos de Carregamentos. Fonte:(ENGENHEIRAÇO, 2013)	34
Figura 14 – Tipos de Apoio Fonte: (HIBBELER, 2004)	35
Figura 15 – Barra rígida Fonte: (CHRISTOFORO, 2018)	36
Figura 16 – Corte Seção Transversal. Fonte:(CHRISTOFORO, 2018)	36
Figura 17 – Equilíbrio de Forças na Barra. Fonte:(CHRISTOFORO, 2018)	36
Figura 18 – Esforço Normal. Fonte:(CHRISTOFORO, 2018)	37
Figura 19 – Esforço Cortante. Fonte:(CHRISTOFORO, 2018)	37
Figura 20 – Momento Fletor. Fonte: (CHRISTOFORO, 2018)	38
Figura 21 – Distribuição de Tensões Cisalhantes. Fonte:(HIBBELER, 2004)	38
Figura 22 – Viga em Balanço, Deflexão e Condições de Contorno. Fonte:(BEER F. P.; JOHNSTON, 2008)	40
Figura 23 – Carga distribuída triangular. Fonte: Autoria Própria	42
Figura 24 – Carga distribuída retangular lateral. Fonte: Autoria Própria	43
Figura 25 – Carga distribuída retangular frontal. Fonte: Autoria Própria	43
Figura 26 – Forças no reservatório. Fonte: Autoria Própria	46
Figura 27 – Diagramas de Esforços (estático). Fonte: Autoria Própria	49
Figura 28 – Diagramas de Esforços Frontal(movimento). Fonte: Autoria Própria	50
Figura 29 – Diagramas de Esforços Lateral(movimento). Fonte: Autoria Própria	50
Figura 30 – Rompimento da Solda. Fonte: Comunicação Interna	54

Lista de tabelas

Tabela 1 – Medidas do reservatório. Fonte: Autoria Própria	45
Tabela 2 – Centroides das Paredes do Reservatório. Fonte: Autoria Própria	45
Tabela 3 – Forças Hidrostáticas nas Paredes do Reservatório. Fonte: Autoria Própria.	46
Tabela 4 – Força no Fundo do Reservatório. Fonte: Autoria Própria.	46
Tabela 5 – Forças Bancada em Funcionamento. Fonte: Autoria Própria.	47
Tabela 6 – Esforços nas Paredes Lateral e Frontal(estático). Fonte: Autoria Própria	48
Tabela 7 – Esforços Parede Lateral e Frontal (em funcionamento).Fonte: Autoria Própria	49
Tabela 8 – Esforços por tempo. Fonte: Autoria Própria	51
Tabela 9 – Tensões Parede Lateral e Frontal. Fonte: Autoria Própria	51
Tabela 10 – Tensões Normais Parede Lateral e Frontal. Fonte: Autoria Própria . . .	52
Tabela 11 – Deflexão Parede Lateral e Frontal. Fonte: Autoria Própria	53

Lista de abreviaturas e siglas

EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
FURNAS	Furnas Centrais Elétricas S.A
FGA	Universidade de Brasília - Faculdade do Gama
EDO	Equação Diferencial Ordinária

Lista de símbolos

γ	Letra grega Gama
ρ	Letra grega Rô
ζ	Letra grega minúscula zeta
η	Letra Grega Eta
α	Letra Grega Alfa
\hat{n}	Vetor Normal
δ	Letra Grega Delta
θ	Letra Grega Teta
I_{xx}	Momento de Inércia
I_{xy}	Produto de Inércia
β	Letra Grega Beta
τ	Letra Grega Tau

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	14
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivos específicos	15
2	METODOLOGIA	16
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1	ENERGIA HIDRAULICA E APROVEITAMENTO	17
3.2	TURBINAS HIDRÁULICAS	19
3.2.1	Turbina Indalma	19
3.3	ENSAIO DE TURBINAS HIDRAULICAS	20
3.3.1	Bancada de Ensaio para Turbinas Hidráulicas FGA	21
3.4	FORÇAS HIDROSTÁTICAS	27
3.4.1	Pressão em um Fluido	27
3.4.2	Teorema de Stevin	27
3.4.3	Forças Hidrostáticas	28
3.4.3.1	Forças Hidrostáticas em superfícies planas	28
3.4.3.2	Centróides e Momentos de Inércia de Figuras Planas	30
3.5	FLUIDOS EM MOVIMENTO	31
3.5.1	Teorema Transporte de Reynolds	32
3.6	RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS	34
3.6.1	Equilíbrio de Forças em um Corpo	34
3.6.2	Esforços Nas Estruturas	35
3.6.2.1	Esforço Normal	37
3.6.2.2	Esforço Cortante	37
3.6.2.3	Momento Fletor	37
3.6.3	Tensão Cisalhante Máxima	38
3.6.4	Tensão Normal Máxima	39
3.6.5	Deflexão de Vigas	39
4	MEMORIAL DE CÁLCULO	41
4.1	FORÇAS HIDROSTÁTICAS	41
4.2	ESFORÇOS	42
4.3	TENSÃO DE CISALHAMENTO MÁXIMO	43

4.4	TENSÃO NORMAL MÁXIMA	44
4.5	DEFLEXÃO	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1	FORÇAS	45
5.1.1	Forças Hidrostáticas Bancada Ociosa	45
5.1.2	Forças Exercidas Quando a Bancada está em Funcionamento	47
5.2	ESFORÇOS	48
5.3	TENSÕES DE CISALHAMENTO MÁXIMAS	51
5.4	TENSÕES NORMAIS MÁXIMAS	52
5.5	DEFLEXÃO	53
5.6	INSPEÇÃO DO RESERVATÓRIO	53
6	CONCLUSÕES	56
	REFERÊNCIAS	58
	ANEXOS	60
	ANEXO A – CÁLCULOS	61
A.1	FORÇAS HIDROSTÁTICAS	61
A.2	FORÇAS COM MOVIMENTO	62
A.3	ESFORÇOS	62
A.4	TENSÕES	65
A.5	DEFLEXÃO	68

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A água é um dos recursos naturais mais abundantes do planeta Terra, sendo o Brasil um país favorecido pela quantidade considerável de recursos hídricos quando comparado a outros países. Esse privilégio brasileiro há tempos tem se tornado ponto estratégico na produção de energia elétrica, visto que a água é uma importante fonte energética. Dados do Balanço Energético Nacional de 2017 (EPE, 2017) mostram que a energia proveniente de centrais hidrelétricas corresponde à 68,1% da oferta interna nacional de energia elétrica.

A energia hidrelétrica é uma fonte renovável de energia, gerada pelo aproveitamento do potencial hidráulico, ou energia potencial da água em um rio, proporcionado por desníveis ou quedas, assim como pela vazão de água ao longo do curso do rio (FURNAS, 2018).

No Brasil, as hidrelétricas são responsáveis pela maior parte da produção de energia elétrica, com destaque para a usina hidrelétrica de Itaipu Binacional, que é controlada em conjunto com o Paraguai, em Foz do Iguaçu, segunda maior usina hidrelétrica do mundo. A maior parte dos recursos hídricos do país está hoje no Norte do Brasil, o que tem impedido a curto prazo o aproveitamento das fontes hídricas por entraves judiciais e ambientais (ANEEL, 2008), visto que esse aproveitamento pode causar danos na floresta que está ali inserida, além de impactos sociais, em comunidades indígenas e quilombolas.

Apesar dos entraves na construção de novos grandes empreendimentos hidrelétricos, esta fonte se perpetua como a mais importante na geração de energia elétrica no país, tendo como vantagens a segurança do suprimento do sistema interligado, o custo relativamente baixo e ser uma alternativa não poluente na geração de energia, dessa forma, não há a possibilidade a longo prazo de que esta seja uma fonte totalmente substituída no país.

Tendo em vista a importância da geração hidrelétrica na matriz energética brasileira, o ensino relacionado a ela nas universidades se mostra indispensável à formação de profissionais do setor elétrico e da área energética como um todo. É nesse contexto que se insere a bancada de ensaio de turbinas hidráulicas, instalada no laboratório de Termofluidos da Faculdade Do Gama da Universidade de Brasília, objeto de estudo principal do presente trabalho.

A bancada é utilizada na universidade para pesquisa e em disciplinas do curso

de Engenharia de Energia. Além disso há pretensão de ser utilizada em disciplinas de outras engenharias. Trata-se de um aproveitamento hidrelétrico didático, que permite a visualização de conhecimentos teóricos das disciplinas ministradas na FGA de forma prática.

No segundo semestre do ano letivo de 2017, observou-se alguns vazamentos no reservatório da bancada, o que tem impedido a continuação do calendário para disciplinas que necessitam da prática do laboratório. Uma das hipóteses é que os vazamentos ocorreram pelas paredes do reservatório, portanto, o presente trabalho mostrará cálculos de forças hidrostáticas nas paredes do mesmo, com o objetivo de investigar as causas desses vazamentos e se as forças estão dentro do que o reservatório realmente suporta.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem o objetivo de investigar as causas de vazamentos no reservatório da bancada didática de ensaios de turbinas hidráulicas e orientar melhores práticas de uso da bancada para que os vazamentos não voltem a ocorrer.

1.2.2 Objetivos específicos

- Calcular as forças hidrostáticas atuantes nas estruturas do reservatório e do vertedouro;
- Calcular os esforços e tensões nas paredes do reservatório;
- Calcular a deflexão de vigas;
- Analisar os dados;
- Orientar melhores práticas de utilização da bancada.

2 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos deste trabalho, foi feita uma investigação das causas dos vazamentos no reservatório da bancada, em que realizou-se cálculos de forças hidrostáticas, esforços, tensões e deflexão da estrutura. Em posse dos resultados, realizou-se um diagnóstico do que levou o reservatório a vazar.

Para a realização dos cálculos, fez-se uma revisão bibliográfica para reunir a teoria de forças hidrostáticas, cálculos de resistência dos materiais (esforços, tensões e deflexão de estruturas), além da teoria para orientar melhores práticas no uso do reservatório.

Além da determinação matemática das forças, esforços e tensões a que o reservatório estava submetido, para a conclusão do diagnóstico foram feitas imagens do rompimento da solda entre as paredes e o fundo do reservatório, o que junto com a formulação matemática corrobora para a conclusão do diagnóstico.

Por fim, em posse de todos os dados e a partir da conclusão do diagnóstico, orientou-se boas práticas de uso do reservatório e medidas para manter a integridade do mesmo.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 ENERGIA HIDRAULICA E APROVEITAMENTO

De forma simplificada, a produção de energia hidráulica ocorre combinando vazão e altura de queda de água, um aproveitamento hidrelétrico portanto, é o conjunto que permite o aproveitamento dessa energia hidráulica, capaz de converter a energia cinética e potencial presente em um corpo d'água em energia útil.

O aproveitamento é composto por dois reservatórios interligados, onde o fluido escoar do reservatório superior para o inferior, em que a distância entre seus níveis montante e jusante seja a Queda bruta (H_b), havendo ao final um grupo gerador, que permite a conversão de energia mecânica em elétrica (SOUZA, 2009).

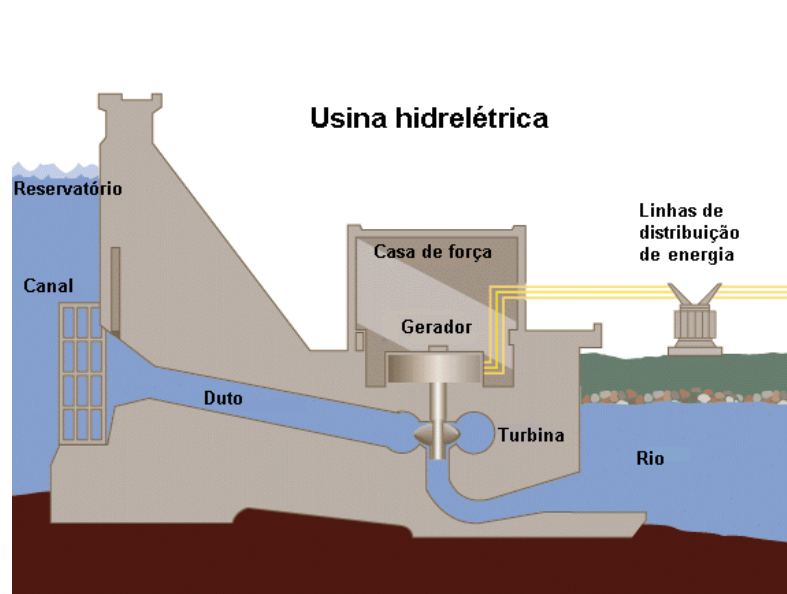


Figura 1 – Esquema de um aproveitamento hidrelétrico. Fonte: (MELEGARI, 2018)

A modelagem do aproveitamento passa pela energia hidráulica média disponível, que pode ser obtida pela equação 3.1, a partir da conservação de massa entre os níveis de montante e jusante.

$$E = \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} + gz \quad (3.1)$$

Ou ainda,

$$E = \frac{p}{\gamma} + \frac{u^2g}{2} + z \quad (3.2)$$

Onde:

- ρ é a massa específica da água;
- γ é o peso específico da água;
- u é a velocidade do escoamento;
- z é a altura;
- g é a aceleração da gravidade;
- p é a pressão.

E a energia hidráulica que pode ser transformada em trabalho pode ser determinada pela seguinte equação:

$$E_1 - E_2 = \frac{p_1 - p_2}{\gamma} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} + (z_1 - z_2) \quad (3.3)$$

No que se refere à potência, tem-se que a potência de entrada da turbina é dada pela seguinte equação:

$$P = \rho Q g H \quad (3.4)$$

E a potência após as perdas é obtida da seguinte maneira:

$$P = 9,81 \eta_t \eta_g \rho Q_p g H [KW] \quad (3.5)$$

Onde:

- η_t é a eficiência da turbina;
- η_g é a eficiência da turbina;
- Q_p é a vazão de projeto.

Obtida a potência, segundo (ANEEL, 2008) as usinas podem ser classificadas como minicentraís hidrelétricas (aproveitamento menos ou igual a 1000KW), pequena central hidrelétrica (aproveitamento entre 1000KW e 30MW) e centrais hidrelétricas (maior ou igual a 30MW).

3.2 TURBINAS HIDRÁULICAS

Segundo (HENN, 2006), uma máquina de fluido é um dispositivo capaz de promover a troca de energia entre um sistema mecânico e um fluido, transformando energia mecânica em energia para mover ou elevar um fluido, ou energia de cinética do fluido em energia mecânica. As máquinas de fluido podem ser classificadas como geratrizes, quando há um aumento na energia do fluido, ou, motrizes, quando há uma queda de energia no fluido.

As turbina hidráulica é uma maquina de fluxo motriz. As máquinas de fluxo são assim classificadas por não confinar em nenhum momento o fluido, que promove um escoamento contínuo no interior da máquina (HENN, 2006). A turbina hidráulica então, é um dispositivo capaz de converter a energia cinética da água em energia mecânica, a ser transformada em elétrica quando acoplada a um gerador.

Entre os elementos construtivos principais de uma turbina estão o rotor, onde ocorre o aproveitamento da energia cinética do fluido, transformando-se em energia mecânica, este componente permite essa conversão pois possui pás fixadas a um eixo livre para sofrer rotação. O sistema distribuidor ou anel distribuidor, tem por finalidade coletar o fluido e conduzir o mesmo para um caminho determinado (HENN, 2006).

As turbinas podem ser classificadas de acordo com o modo de atuação do fluido, as de ação transformam a energia cinética em mecânica à pressão constante, o fluido incidente no rotor contém apenas energia cinética, não há perda de queda líquida (NOLETO, 2015b). Na turbina de reação há queda de pressão da montante para a jusante, o fluido incidente no rotor possui energia cinética e energia devido à pressão, há perda de queda líquida (NOLETO, 2015b).

Quanto à trajetória do fluido no rotor, as turbinas podem ser classificadas ainda como radial, quando a trajetória é radial ao eixo do rotor e circula com o eixo, axial, quando a trajetória é paralela ao eixo do rotor e tangencial, quando a trajetória do fluido é normal ao eixo do rotor (NOLETO, 2015b).

A turbina instalada no Laboratório de TermoFluidos da FGA é uma turbina Indalma, o presente trabalho se atentará portanto apenas a este tipo de turbina, com suas características expressas a seguir.

3.2.1 Turbina Indalma

A turbina Indalma é uma turbina com classificação centrípeta-axial, desenvolvida empiricamente através da turbina Francis, diferindo desta por não possuir distribuidor de água (ALVES, 2018). Foi desenvolvida e patenteada pela empresa Indalma Indústria e Comércio, localizada em Santarém Pará (OLIVEIRA, 2014).



Figura 2 – Turbina Indalma. Fonte: (OLIVEIRA, 2014)

As características principais desta turbina são de robustez e simplicidade, fazendo com que ela seja uma boa opção para utilização em pequenos aproveitamentos. Como características físicas, possui uma caixa espiral de seção triangular desprovida de pás diretrizes (OLIVEIRA, 2014), um rotor de duas seções, com lâminas do rotor radiais na primeira seção e longitudinais no centro do rotor (ALVES, 2018).

3.3 ENSAIO DE TURBINAS HIDRAULICAS

Segundo (MACINTYRE, 1983), o ensaio de uma turbina hidráulica consiste na medição e cálculo de grandezas durante sua operação, de maneira que permita a avaliação das condições de funcionamento da mesma.

Para (MACINTYRE, 1983), as turbinas devem ser de pequena capacidade, de maneira que sejam compatíveis com os recursos existentes no laboratório. Dessa maneira, uma turbina de dimensões reais não permite ensaios e captação de parâmetros, recorre-se então a modelos reduzidos.

Segundo (SANTANDER, 2014) para que o ensaio seja possível, o laboratório deve possuir os seguintes equipamentos, instrumentos e instalações complementares para realizar as medições:

- Um tubo e bombas de características compatíveis com a das turbinas a ensaiar;
- Freios dinamômetros para medição de potência;
- Sensores de pressão;
- Vertedouros e placas de orifício para medição de descarga;
- Reservatórios a nível constante de pressurização.

A bancada presente na FGA é semelhante a descrita por tais autores, deste modo, o tópico a seguir demonstra as características da bancada e os componentes e instrumen-

tação da mesma.

3.3.1 Bancada de Ensaio para Turbinas Hidráulicas FGA

A bancada didática para ensaio de turbinas hidráulicas da FGA teve sua concepção em 2012, sendo concluída em 2013 (OLIVEIRA, 2014), é utilizada atualmente em projetos de pesquisa e em disciplinas do curso de Engenharia de Energia, como Dinâmica dos Fluidos e Sistemas Hidroelétricos, com o objetivo de promover o contato com aplicações práticas das disciplinas.

A ideia da bancada teve início com o trabalho do docente Rudi Van Els, sobre eletrificação de comunidades isoladas na Amazônia a partir de microcentrais hidrelétricas, utilizando a turbina Indalma, a partir desse trabalho, foi trazido um modelo da turbina para a FGA e para possibilitar a caracterização e modelagem da turbina, foi construída uma bancada com a finalidade de reproduzir as condições reais de operação de uma central hidrelétrica (SANTANDER, 2014).

A turbina Indalma utilizada na bancada é de fabricação da empresa Indalma Indústria e Comércio, localizada em Santarém – PA, trata-se de uma turbina de reação centrípeta-axial, desenvolvida empiricamente através de uma turbina Francis (SANTOS, 2015), para centrais de pequeno porte (OLIVEIRA, 2014).

O trabalho de concepção e execução da bancada foi realizado por Santander 2014, reconduzida por Danilo Oliveira, Jessica Gama e José Henrique oliveira (OLIVEIRA, 2014). A bancada dispõe de uma bomba centrífuga, uma tubulação com queda de até 7 metros, um reservatório com capacidade de 1000 litros, a turbina Indalma acoplada a um gerador, canal de saída em um vertedouro Triangular. A figura 3 demonstra um esquemático da bancada instalada no laboratório de Termofluidos.

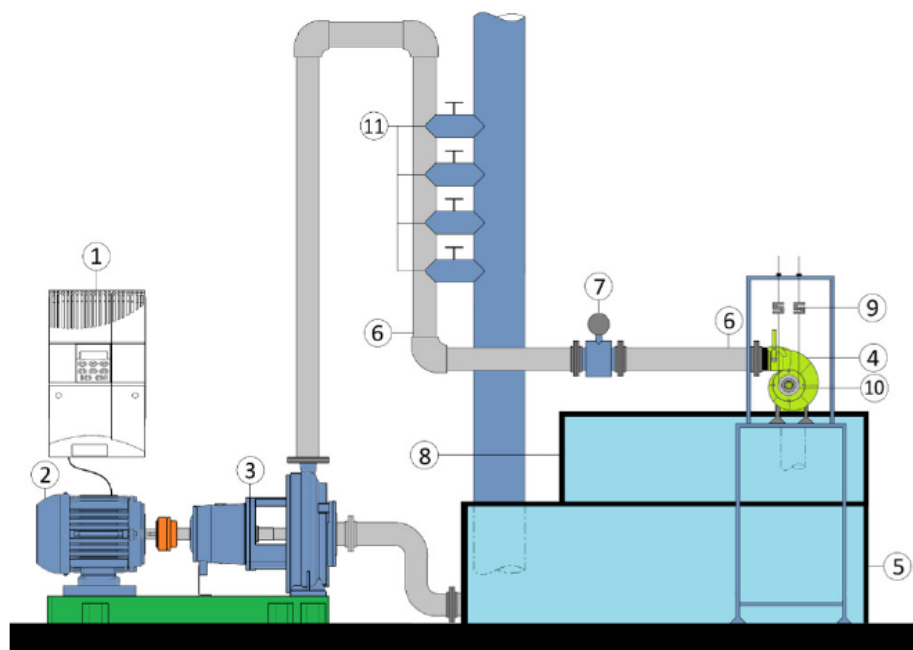


Figura 3 – Esquemático da bancada. Fonte: (OLIVEIRA, 2014)

Em (1) têm-se um inversor de frequência, representado em (2) está o motor e em (3) a bomba, responsáveis pela elevação do fluido, em (11) são as válvulas manuais, responsáveis pelo controle de pressão, em (6) estão os medidores de pressão. Representado em (7), está o medidor de vazão volumétrica, em (9) estão as células de carga do freio de Prony, em (4) a Turbina Indalma e em (10) um sensor indutivo. Finalmente, em (8) está representado o vertedouro triangular e em (5) o reservatório.

Para a medição de pressão, a bancada conta com um manômetro digital da marca WIKA, manômetros analógicos tipo Bourdon, e um manômetro de coluna de água (SANTOS, 2015).



Figura 4 – Manômetro. Fonte: Autora

A medição de torque da turbina é feita utilizando freio de Prony, este tipo de freio é composto por uma polia, fixada ao eixo de saída da turbina, um cinto é enrolado em torno da polia que está sujeita a balanças de mola (SANTANDER, 2014).



Figura 5 – Freio de Prony. Fonte: (ALVES, 2018)

Quando não há carga a mola está em equilíbrio, mas quando há, as leituras da mola são diferentes. A força de atrito entre o eixo da turbina e a correia aumentará a leitura da força em uma mola enquanto a outra diminui, o torque então é obtido através da seguinte equação:

$$T = r (F_1 - F_2) \quad (3.6)$$

Onde r é o raio da polia, e F_1 e F_2 são as leituras das forças das molas.

A medição de rotação da turbina, é feita com um sensor indutivo de presença, que realiza a contagem de pulsos a cada dente da engrenagem e do tempo entre eles, obtendo a rotação da mesma (CALIXO, 2015)

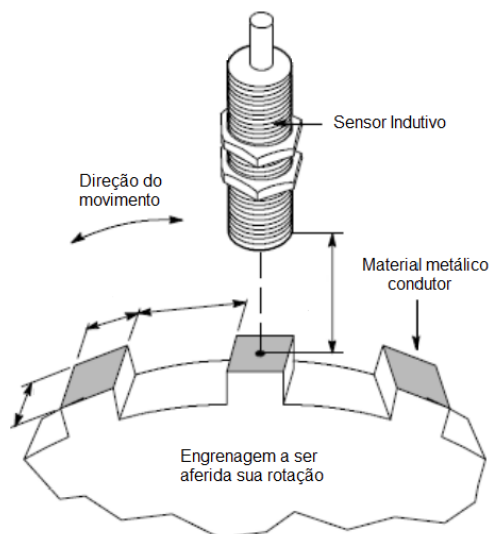


Figura 6 – Sensor indutivo de rotação. Fonte: (CALIXO, 2015)

A bomba que faz a elevação da água para que possa alimentar a turbina da bancada é uma KSB ETAN 100-250, com vazão de $184,4\text{m}^3/\text{h}$ e elevação de 21,3mca. A mesma é acionada por um motor WEG de 25 cv, com rotação de 1750 rpm. O inversor de frequência da instalação é responsável por fornecer uma fonte de frequência variável para o motor que aciona a bomba, permitindo assim o controle de vazão (SANTOS, 2015). O inversor em seu funcionamento, transforma a tensão da rede de alimentação em uma tensão de amplitude e frequência variáveis, que resulta em uma variação da velocidade do campo magnético girante, que por consequência, resulta na variação da velocidade do motor.

Por fim, a bancada conta com um medidor de vazão eletromagnético antes da turbina e um vertedouro triangular, que possibilita a medição de vazão na saída da turbina a partir do método do vertedouro triangular.



Figura 7 – Sensor eletromagnético de vazão. Fonte: Autora

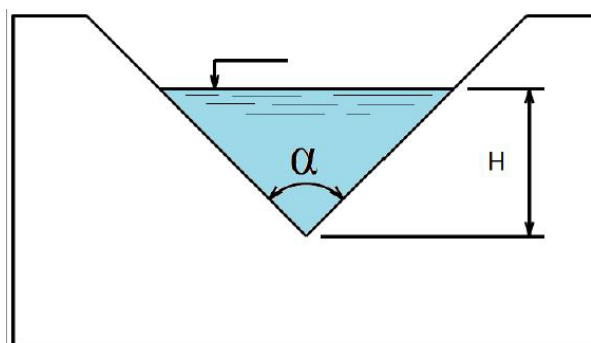


Figura 8 – Método Vertedouro Triangular. Fonte: (OLIVEIRA, 2014)

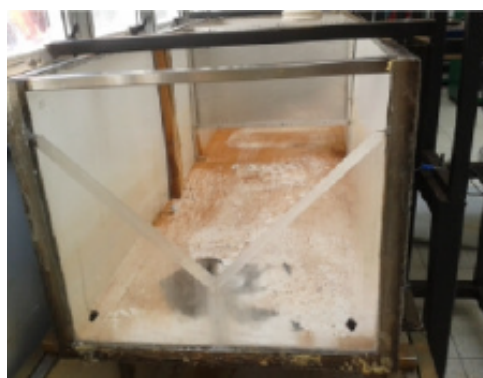


Figura 9 – Vertedor. Fonte: Autora

A distância H é a altura do Apex da divisão, o ângulo α é 90° a medição da vazão

então é obtida a partir da fórmula de Thompson:

$$Q = 1,4H^{\frac{5}{2}} \quad (3.7)$$

Além de todos estes dispositivos, a bancada conta com um reservatório, conectado ao vertedouro triangular e à bomba, de modo que a água percorra um ciclo fechado e seja sempre reaproveitada. Tal reservatório é o provável local da questão dos vazamentos, em que o presente trabalho se ancora.

3.4 FORÇAS HIDROSTÁTICAS

3.4.1 Pressão em um Fluido

A pressão é definida como uma força de compressão por unidade de área, que um fluido exerce sobre uma superfície com o qual está em contato (NOLETO, 2015a). Tomando um elemento de área de uma superfície, a força normal de compressão de um fluido sobre a superfície é dada por:

$$dF_c = -p\hat{n}dA \quad (3.8)$$

Onde \hat{n} é o vetor normal à superfície. Pressão é então:

$$p = \lim_{\delta A \rightarrow \delta A'} \frac{\|\delta F_c\|}{\delta A} \quad (3.9)$$

Onde $\delta A'$ é uma escala local (NOLETO, 2015a) e qualquer tensão normal aplicada em um fluido será a pressão, por convenção, o valor positivo é a compressão.

3.4.2 Teorema de Stevin

Descoberto por Simon Stevin, este teorema elucidada que a variação de pressão em dois pontos quaisquer de um fluido é igual ao produto de sua massa específica pela diferença de desnível (ou cota) entre os dois pontos e aceleração da gravidade.

$$\Delta P = \rho g H \quad (3.10)$$

ou então,

$$\Delta P = \gamma H \quad (3.11)$$

Em que:

- γ é o peso específico;
- ρ é a massa específica;
- g é a aceleração da gravidade;
- H é a altura do líquido ou altura manométrica.

Tal teorema tem validade para fluidos em repouso e incompressíveis, ou seja, sem variação de massa específica. O formato da estrutura de confinamento do fluido não tem importância na equação.

3.4.3 Forças Hidrostáticas

Forças hidrostáticas são forças que estão presentes em estruturas de confinamento de fluidos ou represas (NOLETO, 2015a) e são forças devido ao peso do fluido atuante na superfície destas estruturas. A geometria da estrutura interfere no cálculo das forças hidrostáticas atuantes na mesma, dessa forma, o cálculo das forças hidrostáticas se subdivide nas seguintes áreas:

- Forças em superfícies planas
- Forças em superfícies curvas
- Camadas de fluido

O presente trabalho tratará apenas das forças em superfícies planas, pois os cálculos de forças hidrostáticas feitos aqui, são para reservatório e canal de saída/vertedouro, e os mesmos contêm apenas estruturas planas.

3.4.3.1 Forças Hidrostáticas em superfícies planas

Para uma superfície plana, a distribuição linear de pressão se assemelha à flexão e à compressão combinadas de uma viga, na teoria da resistência dos materiais (WHITE, 2007). O problema se reduz a equações que envolvem o centróide e momentos de inércia da área de seção transversal da estrutura.

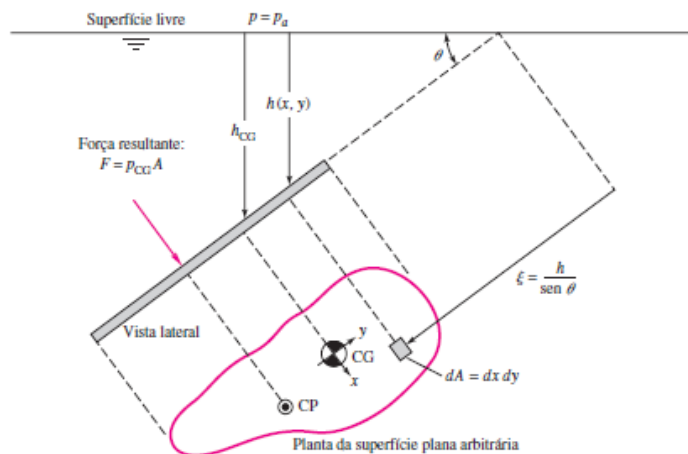


Figura 10 – Superfície Plana Submersa. Fonte: (WHITE, 2007)

Tomando-se uma superfície plana submersa em um líquido, a força hidrostática total sobre um lado da placa é dada por:

$$F = \int p dA \quad (3.12)$$

Onde p refere-se à pressão, que calculada pela equação da hidrostática, ou teorema de Stevin:

$$p = p_{atm} + \gamma h \quad (3.13)$$

Aqui, γ é o peso específico do líquido e h a altura. Substituindo na primeira equação, tem-se:

$$F = \int (p_{atm} + \gamma h) dA = p_{atm} A + \gamma \int h dA \quad (3.14)$$

Observando na figura, tem-se que $h = \xi \sin \theta$ então:

$$F = p_{atm} A + \gamma \int \xi \sin \theta dA = p_{atm} A + \gamma \sin \theta \int \xi dA \quad (3.15)$$

No centróide da superfície:

$$\int \xi dA = \xi_{ct} A \quad (3.16)$$

$$F = p_{atm} A + \gamma \sin \theta \xi_{ct} A = p_{atm} A + \gamma h_{ct} A = (p_{atm} + \gamma h_{ct}) A \quad (3.17)$$

$$F = p_{ct}A \quad (3.18)$$

A força sobre um dos lados de qualquer superfície plana submersa é igual ao produto da pressão no centróide pela área da mesma, independente de seu formato ou do ângulo de inclinação (WHITE, 2007). Além disso, pode ser interpretada como a resultante de uma distribuição linear de tensão sobre a área da placa, assemelhando-se à compressão e flexão em uma viga (WHITE, 2007). Para equilibrar a porção do momento de flexão, a força F atua mais abaixo do centróide, seu ponto de aplicação é chamado centro de pressão ou CP, com as coordenadas (X_{cp}, Y_{cp}) , para calcular esse ponto de aplicação, na direção Y têm-se:

$$F_{y_{cp}} = \int pydA = \int y(p_{atm} + \gamma\xi\sin\theta\xi)dA = p_{atm} \int ydA + \gamma\sin\theta \int y\xi dA \quad (3.19)$$

Rearranjando:

$$F_{y_{cp}} = \gamma\sin\theta \left(\xi_{ct} \int ydA - \int y^2 dA \right) \quad (3.20)$$

A integral de ydA é nula, e a integral de $y^2 dA$ é o momento de inércia. O ponto de aplicação ou centro de pressão em y pode ser encontrado então da seguinte maneira:

$$y_{cp} = -\gamma\sin\theta \frac{I_{xx}}{p_{ct}A} \quad (3.21)$$

Com o sinal negativo apontando que o centro de pressão está abaixo do centróide. De forma similar, obtém-se que o centro de pressão em X é encontrado da seguinte forma:

$$x_{cp} = -\gamma\sin\theta \frac{I_{xy}}{p_{ct}A} \quad (3.22)$$

Com o sinal negativo indicando que está à esquerda do centróide, para o caso de figuras simétricas, a coordenada de x_{cp} é zero e o ponto de aplicação da força estará abaixo do centróide e sobre o eixo y .

3.4.3.2 Centróides e Momentos de Inércia de Figuras Planas

Os centroides e momentos de inércia de algumas superfícies planas podem ser encontrados a partir de equações demonstradas na figura 9.

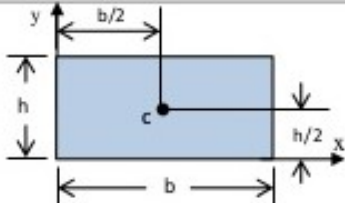
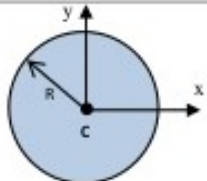
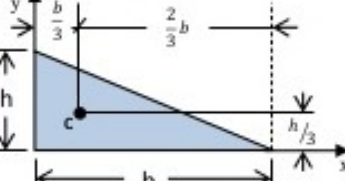
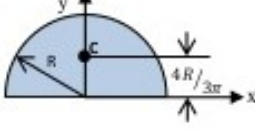
<p>Rectângulo</p> 	<p>Círculo</p> 
$\bar{I}_x = \frac{bh^3}{12} \quad \bar{I}_y = \frac{b^3h}{12} \quad \bar{I}_{xy} = 0$ $I_x = \frac{bh^3}{3} \quad I_y = \frac{b^3h}{3} \quad I_{xy} = \frac{b^2h^2}{4}$	$I_x = I_y = \frac{\pi R^4}{4} \quad I_{xy} = 0$
<p>Triângulo Rectângulo</p> 	<p>Semicírculo</p> 
$\bar{I}_x = \frac{bh^3}{36} \quad \bar{I}_y = \frac{b^3h}{36} \quad \bar{I}_{xy} = -\frac{b^2h^2}{72}$ $I_x = \frac{bh^3}{12} \quad I_y = \frac{b^3h}{12} \quad I_{xy} = \frac{b^2h^2}{24}$	$\bar{I}_x = 0,1098R^4 \quad \bar{I}_{xy} = 0$ $I_x = I_y = \bar{I}_y = \frac{\pi R^4}{8} \quad I_{xy} = 0$

Figura 11 – Centróides e Momentos de Inércia de Figuras Planas. Fonte: (PÉREZ, 2015)

3.5 FLUIDOS EM MOVIMENTO

De acordo com (NOLETO, 2015a) um escoamento pode ser classificado das seguintes formas:

- Quanto às dimensões: unidimensional, bidimensional ou tridimensional;
- Com a variação no tempo: permanente (grandezas se mantêm constantes ao longo do tempo) ou transiente (grandezas variam com o tempo);
- De acordo com a trajetória: Uniforme (todos os pontos em mesma velocidade) ou Variado (não há mesma velocidade em todos os pontos);
- Quanto ao regime de escoamento: Laminar (partículas descrevem trajetórias comportadas), Turbulento (partículas descrevem trajetórias sem comportamento definido), Transição (entre permanente e turbulento);
- Quanto à massa específica: Compressível (massa específica varia com a pressão), Incompressível (massa específica não varia) ou Dilatável (massa específica varia com a temperatura).

Para efeitos de compreensão, define-se: (WHITE, 2007):

- Sistema: quantidade de massa fixada, com tudo ao externo designado por "vizinhança", com o sistema sendo separado desta pelas fronteiras.
- Volume de controle: é um volume de controle arbitrário por onde o fluido escoa, não estando em confinamento.

3.5.1 Teorema Transporte de Reynolds

O Teorema Transporte de Reynolds, fazendo uma análise para volumes de controle, transforma o equacionamento a fim de aplicar a uma região fixa ao invés de massas individuais e facilitar a compreensão (WHITE, 2007). Para obter tal transformação é necessário determinar os fluxos que entram e saem do volume de controle (NOLETO, 2015a).

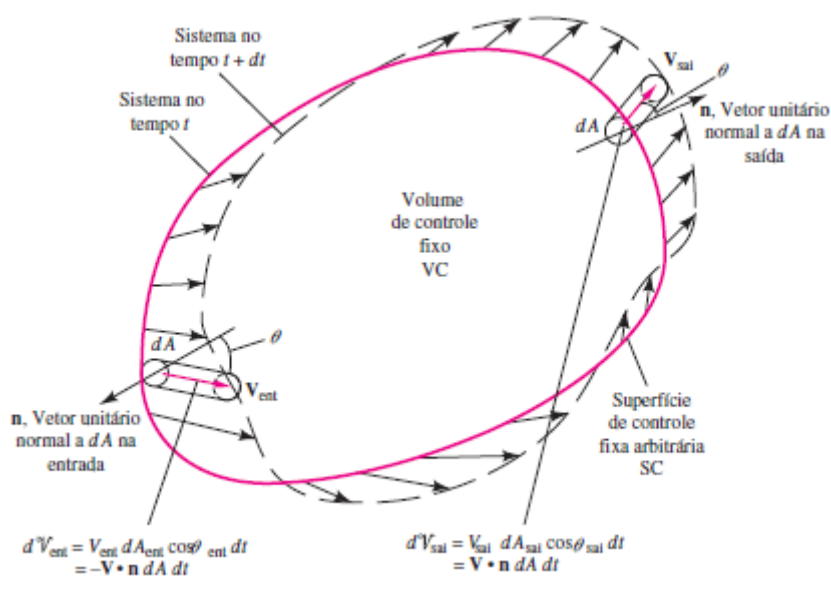


Figura 12 – Volume de Controle Arbitrário. Fonte:(WHITE, 2007)

A figura 10 demonstra um volume de controle fixo arbitrário, com um escoamento atravessando-o. cada vetor velocidade na superfície estará em um elemento de área dA , fazendo um ângulo θ com o vetor normal à dA (WHITE, 2007).

Seja B uma propriedade qualquer do fluido, e $\beta = \frac{dB}{dm}$, a grandeza intensiva correspondente, a quantidade total de B no volume de controle será:

$$B_{vc} = \int_{vc} \beta dm = \frac{dB}{dm} \quad (3.23)$$

Avaliando as fontes de variações de B no volume de controle:

- Variação em seu interior:

$$\frac{d}{dt} \int \beta p dV \quad (3.24)$$

- Fluxo de saída:

$$\int_{sc} \beta \rho V \cos \theta dA_{(sai)} \quad (3.25)$$

- Fluxo de entrada:

$$\int_{sc} \beta \rho V \cos \theta dA_{(entra)} \quad (3.26)$$

Onde VC e SC são volume de controle e superfície de controle respectivamente. Somando a variação em seu interior com o fluxo que sai, subtraindo o fluxo de entrada, têm-se o Teorema Transporte de Reynolds:

$$\frac{d}{dt}(B_{sist}) = \frac{d}{dt} \left(\int_{vc} \beta \rho dV \right) + \int \beta \rho V \cos \theta dA_{sai} - \int_{sc} \beta \rho V \cos \theta dA_{entra} \quad (3.27)$$

E a partir do Teorema Transporte de Reynolds, pode-se reescrever as quatro leis básicas, na forma de volume de controle, sejam elas ([WHITE, 2007](#)):

- Conservação da Massa (Continuidade):

$$\frac{Dm}{Dt} = \iiint_{v(t)} \frac{\partial}{\partial t} \rho dV + \oiint_{A(t)} \rho \vec{u} \cdot \hat{n} dA \quad (3.28)$$

- Relação da Quantidade de Movimento Linear:

$$\sum F = \iiint_{v(t)} \frac{\partial}{\partial t} \vec{u} \rho dV + \oiint_{A(t)} u (\rho \vec{u} \cdot \hat{n}) dA \quad (3.29)$$

- Relação da Conservação do Momento da Quantidade de Movimento:

$$\sum M = \iiint_{v(t)} \frac{\partial}{\partial t} (\vec{r} \times \vec{u}) \rho dV + \oiint_{A(t)} (\vec{r} \times \vec{u}) (\rho \vec{u} \cdot \hat{n}) dA \quad (3.30)$$

- Equação da Energia.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \iiint_{V(t)} \frac{\partial}{\partial t} e \rho dV + \oiint_{A(t)} e (\rho \vec{u} \cdot \hat{n}) dA \quad (3.31)$$

3.6 RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

A resistência dos materiais é um ramo da mecânica que estuda as relações entre cargas externas aplicadas a um corpo deformável e a intensidade de forças internas que atuam dentro do corpo (HIBBELER, 2004). A determinação da deformação, da tensão e da deflexão de materiais faz parte dos assuntos abordados em resistência dos materiais, e no presente trabalho, além de determinar as forças a que as estruturas estão submetidas, fez-se necessário determinar também, os esforços, tensões e deflexão nas estruturas. Dessa forma, este tópico traz um pouco dos conceitos utilizados no presente trabalho e que fazem parte desta vasta área.

3.6.1 Equilíbrio de Forças em um Corpo

As forças de superfície em um corpo são causadas pelo contato direto de um corpo com a superfície de outro (HIBBELER, 2004). Essas forças são distribuídas pela área de contato entre eles, podendo elas serem classificadas como **forças concentradas** quando a superfície de contato é muito pequena e ela está concentrada em um ponto apenas, **carga distribuída** quando essa força está distribuída ao longo de um comprimento ou de uma área, expressa por força/comprimento.

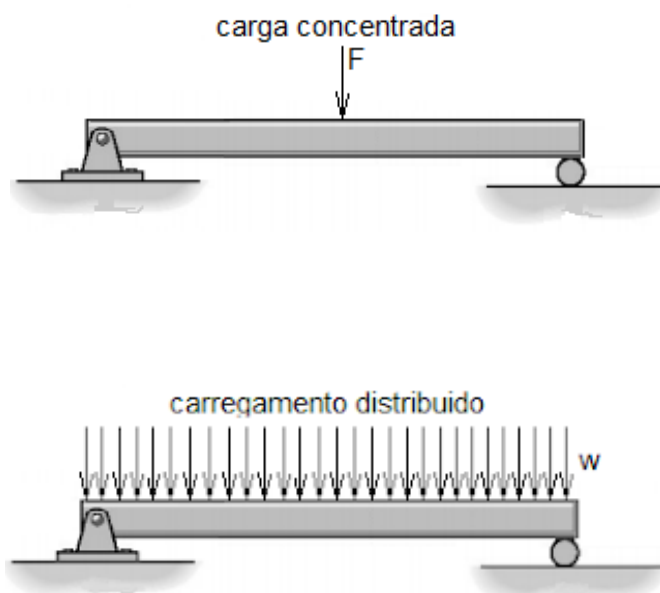


Figura 13 – Tipos de Carregamentos. Fonte:(ENGENHEIRAÇO, 2013)

As reações de apoio são forças de superfície, elas se desenvolvem nos apoios que são pontos de contatos entre corpos e tendem a apoiar o outro corpo(HIBBELER, 2004).

A determinação dessas reações de apoio passa pelo tipo de apoio, dependendo de quais movimentos este é capaz de restringir. Quando há a restrição de uma translação esta é causada por uma força, horizontal ou vertical, ou quando restringe uma rotação, é causada por um momento.

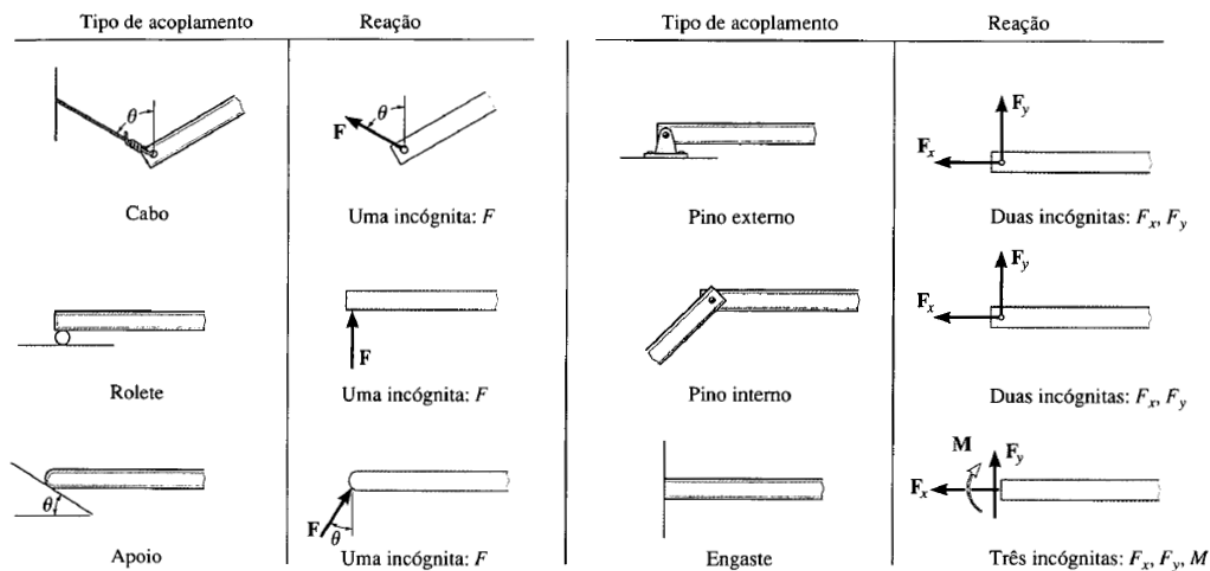


Figura 14 – Tipos de Apoio Fonte: (HIBBELER, 2004)

A determinação do valor destas reações de apoio, cotidianamente na engenharia, é determinada pelo equilíbrio de forças, a partir das seguintes equações de equilíbrio:

- $\sum F_x = 0$
- $\sum F_y = 0$
- $\sum M_o = 0$

3.6.2 Esforços Nas Estruturas

Seja uma barra desmembrada por uma seção transversal, em equilíbrio, com intensidades de reações nos apoios conhecidas.

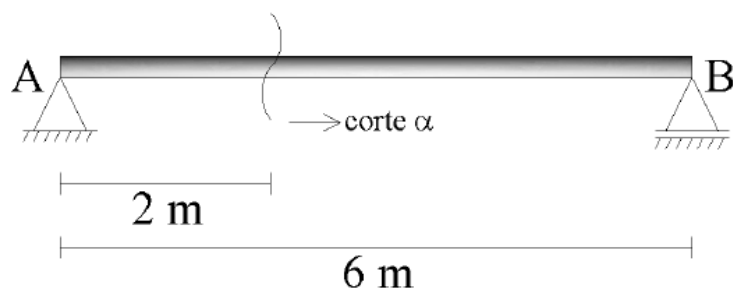


Figura 15 – Barra rígida Fonte: (CHRISTOFORO, 2018)

Ao efetuar um corte qualquer α , para que as partes isoladas permaneçam em equilíbrio, aparecem alguns esforços internos na barra.

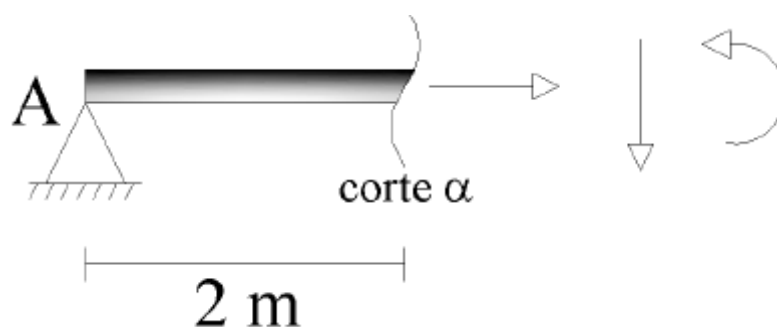


Figura 16 – Corte Seção Transversal. Fonte:(CHRISTOFORO, 2018)

Pode-se dizer que no centro de gravidade desta seção há esforços internos de força e de momento que mantêm o corpo em equilíbrio com as forças externas atuantes, e as resultantes dessas forças em ambos os lados da barra devem ser tais que reproduzam a situação original, sendo de mesmo módulo, mesma direção e sentidos diferentes (CHRISTOFORO, 2018). A determinação de tais esforços é realizada a partir do equilíbrio de forças na horizontal e vertical e também pelo equilíbrio de momentos, tanto internos quanto externos.

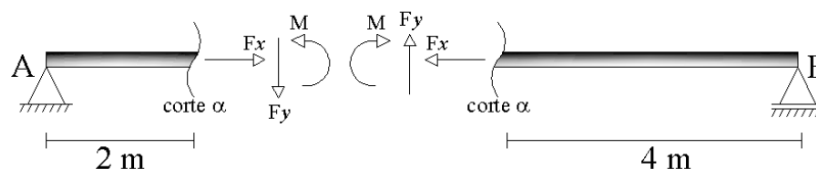


Figura 17 – Equilíbrio de Forças na Barra. Fonte:(CHRISTOFORO, 2018)

3.6.2.1 Esforço Normal

Essa força atua perpendicularmente à área da seção, é criada sempre que as forças externas tendem a empurrar (esforço normal de compressão) ou puxar (esforço normal de tração) as duas partes do corpo (HIBBELER, 2004).

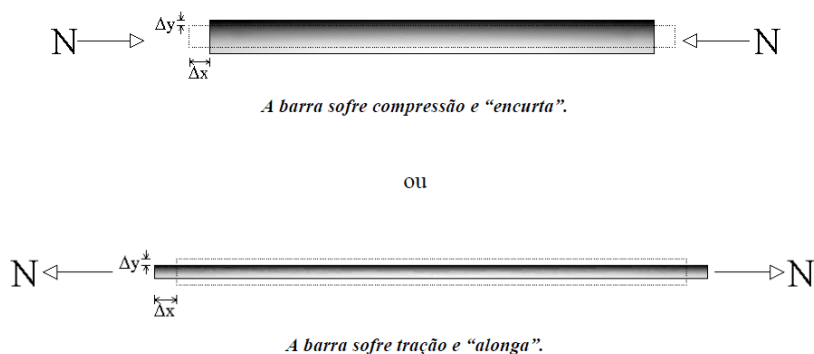


Figura 18 – Esforço Normal. Fonte:(CHRISTOFORO, 2018)

3.6.2.2 Esforço Cortante

Esforço cortante ou de cisalhamento, localiza-se no plano da área e é criada quando as cargas externas tendem a provocar o deslizamento de duas partes do corpo (HIBBELER, 2004), uma sobre a outra, provocando o corte ou cisalhamento da mesma.

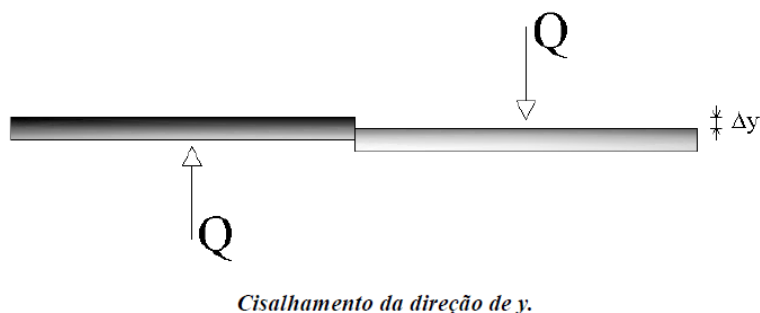


Figura 19 – Esforço Cortante. Fonte:(CHRISTOFORO, 2018)

3.6.2.3 Momento Fletor

O momento fletor é provocado pelas cargas externas que tendem a flexionar o corpo em relação ao eixo localizado no plano da área,(HIBBELER, 2004) comprimindo uma parte e distendendo a outra.

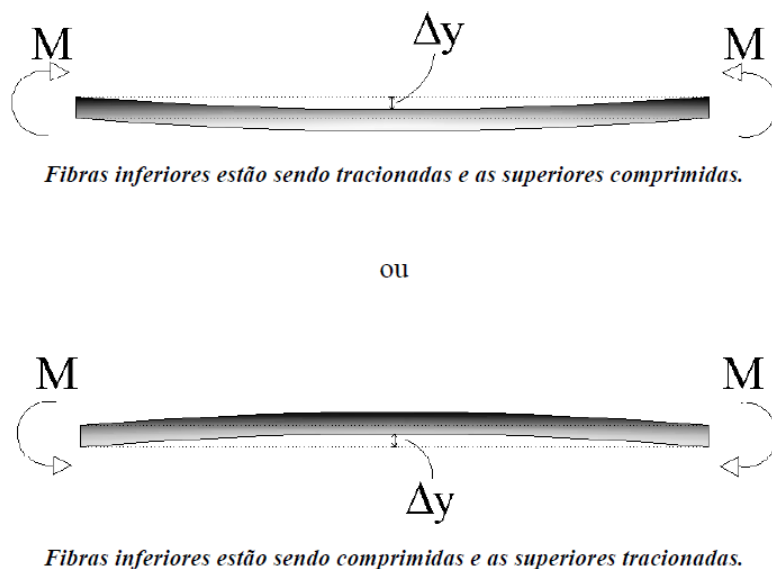


Figura 20 – Momento Fletor. Fonte: (CHRISTOFORO, 2018)

3.6.3 Tensão Cisalhante Máxima

A tensão pode ser definida como a distribuição da força por unidade de área (BEER F. P.; JOHNSTON, 2008). No presente trabalho, fez-se necessário determinar a tensão cisalhante máxima nas paredes do reservatório, neste tópico traz-se uma revisão bibliográfica do que significa essa tensão.

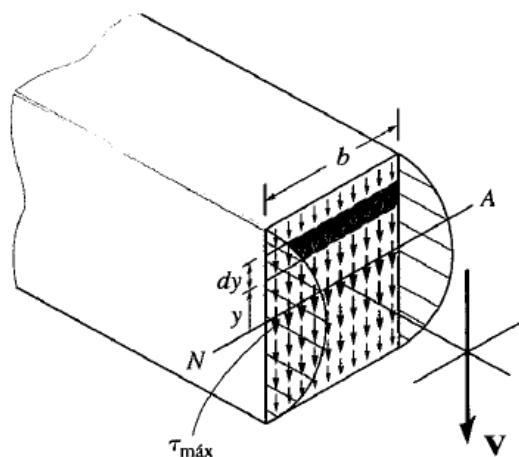


Figura 21 – Distribuição de Tensões Cisalhantes. Fonte: (HIBBELER, 2004)

A tensão de cisalhamento ocorre devido ao esforço cortante na seção da barra, é uma tensão longitudinal, e é dada por:

$$\tau = \frac{VQ}{It} \tag{3.32}$$

Onde:

- τ é a tensão cisalhante no ponto localizado a uma distância y' do eixo neutro do elemento;
- V é a força cortante resultante interna, determinada pelo método das seções e equações de equilíbrio;
- Q é o momento estático da seção transversal em relação à linha neutra;
- I é o momento de inércia de toda a área de seção transversal;
- t é a largura da área de seção transversal

Seu valor máximo ocorre onde o cisalhamento é máximo.

3.6.4 Tensão Normal Máxima

A viga está sujeita a uma flexão simples, ou seja, quando o esforço normal é nulo. Dessa forma, a componente de tensão normal está associada apenas ao momento fletor e pode ser determinada a partir da seguinte equação (HIBBELER, 2004):

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I} \quad (3.33)$$

Onde:

- σ é a tensão normal máxima no elemento que ocorre no ponto da área da seção transversal mais afastado do eixo neutro;
- M é o momento interno resultante, determinado pelo método das seções e pelas equações e equilíbrio, e calculado em torno do eixo neutro da seção transversal;
- c é a distância perpendicular do eixo neutro ao ponto mais afastado desse eixo, no qual σ_{max} atua;
- I é o momento de inércia de toda a área de seção transversal;

3.6.5 Deflexão de Vigas

A deflexão de vigas submetidas a um dado carregamento é de interesse do projeto de vigas, pode contribuir pro colapso das mesmas, e no presente trabalho também é objeto de investigação. O interesse particular da determinação da máxima deflexão em uma viga sujeita a um carregamento, está no fato de que, geralmente, as especificações do projeto de uma viga incluem um valor máximo admissível para esta deflexão (BEER F. P.; JOHNSTON, 2008).

Uma viga sujeita a flexão, se encurva tomando a forma de um arco de circunferência, onde a curvatura pode ser expressa por (BEER F. P.; JOHNSTON, 2008):

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (3.34)$$

Onde M é o momento fletor, E é o módulo de elasticidade e I é o momento de inércia da seção transversal, em relação à linha neutra.

A declividade e a deflexão de vigas em um determinado ponto, pode ser calculada pela equação diferencial da linha elástica (BEER F. P.; JOHNSTON, 2008), expressa a seguir:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (3.35)$$

Se o momento fletor puder ser representado para todos os valores de x como uma função $M(x)$, a deflexão pode ser obtida na resolução da E.D.O após duas integrações, onde faz-se necessário também determinar os valores das constantes de integração a partir de condições de contorno. Caso a função $M(x)$ não seja contínua em toda a barra, pode-se utilizar a superposição para calcular a deflexão em cada trecho.

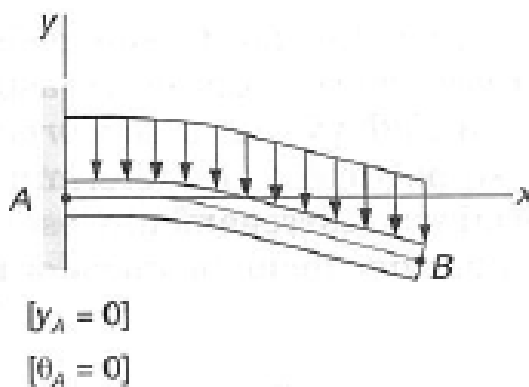


Figura 22 – Viga em Balanço, Deflexão e Condições de Contorno. Fonte:(BEER F. P.; JOHNSTON, 2008)

4 MEMORIAL DE CÁLCULO

Este capítulo apresenta o memorial de cálculo de todas as operações realizadas no presente trabalho a fim de investigar as causas dos vazamentos no reservatório da bancada de ensaio de turbinas hidráulicas. São expressas neste tópico, todas as equações e fórmulas utilizadas para cálculo de forças, esforços, tensões e deflexão nas estruturas. Os cálculos desenvolvidos estão anexados ao trabalho.

4.1 FORÇAS HIDROSTÁTICAS

As forças hidrostáticas quando a bancada não está funcionando nas paredes do reservatório foram calculadas a partir da seguinte equação:

$$F = \rho g h_{ct} A \quad (4.1)$$

onde ρ é a massa específica da água, g a aceleração da gravidade, h_{ct} é a altura do centro de gravidade e A , a área da superfície.

O ponto de aplicação dessa força em y foi calculado como:

$$y_{cp} = -\gamma \sin \theta \frac{I_{xx}}{\rho_{ct} A} \quad (4.2)$$

onde γ é o peso específico da água, $\sin \theta$ é o seno do ângulo de inclinação da superfície, I_{xx} é o momento de inércia e p_{ct} é a pressão no centroide.

Quando a bancada está ligada, as forças hidrostáticas nas paredes do reservatório foram calculadas da seguinte maneira:

$$\sum F = \iint u(\rho \vec{u} \cdot \hat{n}) dA \quad (4.3)$$

Resolvendo a integral, sabendo que o ângulo entre a velocidade e \hat{n} é 180 graus, obtém-se:

$$\sum F = -\rho u A_1 - \rho u A_2 - \rho u A_3 - \rho u A_4 \quad (4.4)$$

Onde A é cada área das paredes do reservatório e u é a velocidade da água. Para descobrir a velocidade, utilizou-se o método do vertedouro triangular:

$$Q = 1,4H^{\frac{5}{2}} \quad (4.5)$$

Onde sabendo-se a vazão máxima da bomba, sabe-se a altura, para cálculo do diâmetro hidráulico, que é uma maneira de fazer uma equivalência entre dutos de seção circular, com outras formas de seção, pela seguinte equação:

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (4.6)$$

Depois pela equação da vazão, têm-se a velocidade do fluido:

$$u = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi D_h^2} \quad (4.7)$$

4.2 ESFORÇOS

Para o cálculo quando a bancada não está funcionando, foi realizada uma modelagem de carga distribuída, onde a força da água cresce linearmente até a parte mais baixa do reservatório. Dessa maneira, a modelagem do problema para o cálculo de esforços foi de uma viga engastada (3 reações de apoio) com uma carga distribuída triangular, da seguinte maneira:

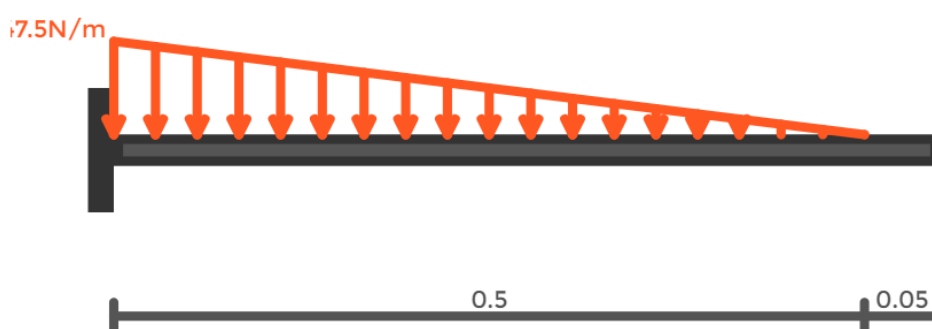


Figura 23 – Carga distribuída triangular. Fonte: Autoria Própria

O valor da carga distribuída foi calculado pela seguinte equação:

$$w = \rho g h^2 \quad (4.8)$$

Como depende apenas da altura, o valor se manteve para a parede frontal e lateral.

O esforço normal é nulo por não há forças na direção x . O esforço cortante foi calculado pelo método das seções, fazendo um corte em um ponto qualquer a distância x do engaste, com a carga se tornando trapezoidal, e pelo equilíbrio de forças:

$$\sum F_y = 0 \quad (4.9)$$

Na mesma seção foi arbitrado o momento fletor e calculado pelo somatório de momentos.

$$\sum M_o = 0 \quad (4.10)$$

Para os cálculos de esforços com movimento, modelou-se como uma carga uniformemente distribuída, por a força é distribuída igualmente pelas paredes.

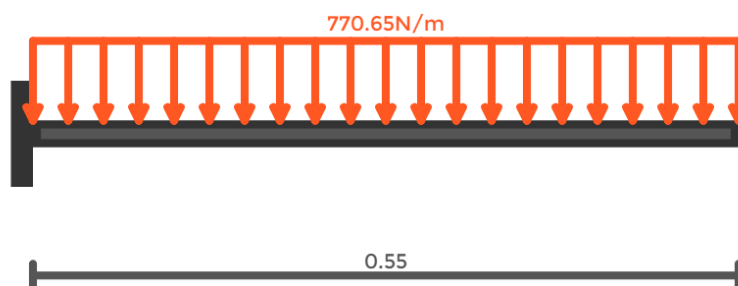


Figura 24 – Carga distribuída retangular lateral. Fonte: Autoria Própria

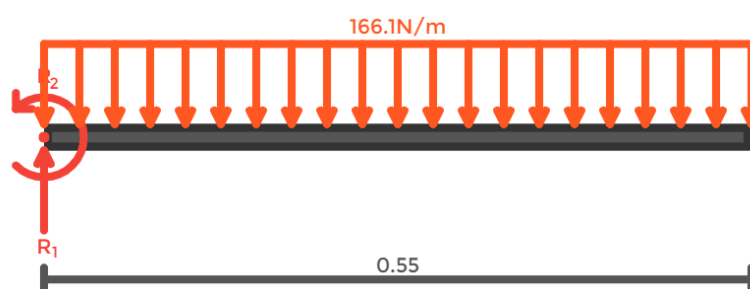


Figura 25 – Carga distribuída retangular frontal. Fonte: Autoria Própria

E os esforços calculados pelo equilíbrio de formas da mesma maneira que o anterior.

4.3 TENSÃO DE CISALHAMENTO MÁXIMO

A tensão de cisalhamento máxima ocorre onde o esforço cortante é atingido seu maior valor, no caso das paredes do reservatório, no ponto mais baixo da parede. O valor foi calculado tomando-se a seção transversal da barra, pela seguinte equação:

$$\tau = \frac{VQ}{IT} \quad (4.11)$$

Onde V é o valor máximo do esforço de cisalhamento. Q é o valor do momento estático da seção em relação à linha neutra, que pode ser calculado da seguinte maneira:

$$Q = \sum \bar{y}_i A_i \quad (4.12)$$

t é o valor da largura da seção transversal e I é o momento de inércia:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (4.13)$$

4.4 TENSÃO NORMAL MÁXIMA

A tensão normal máxima em uma viga sujeita à flexão simples ocorre onde o momento fletor é máximo, no caso do reservatório, no ponto mais baixo das paredes, os valores foram calculados a partir da seguinte equação:

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I} \quad (4.14)$$

Onde σ é a tensão normal máxima no elemento, M é o momento máximo e c é a distância perpendicular do eixo neutro ao ponto mais afastado desse eixo. I é o momento de inércia de toda a área de seção transversal e foi calculado a partir da seguinte equação:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (4.15)$$

4.5 DEFLEXÃO

A deflexão nas paredes do reservatório foi calculada pelo método da integração, utilizando a superposição visto que o carregamento não é uniforme em todo o comprimento da mesma. A partir do método da integração encontrou-se a equação da linha elástica resolvendo a seguinte equação diferencial de segunda ordem:

$$EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = M(x) \quad (4.16)$$

Onde E é o módulo de elasticidade do material, que no caso é o alumínio que tem um módulo de elasticidade de $70GPa$ e I é o momento de inércia da seção transversal.

Essa equação foi resolvida para a carga triangular até 0.55 , e para o restante do comprimento sem carga, colocou-se uma carga triangular oposta que anulasse a primeira parte nos $0.05m$ não tem carga.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 FORÇAS

Inicialmente foram obtidas as medidas do reservatório, que estão expressas na tabela a seguir.

Tabela 1 – Medidas do reservatório. Fonte: Autoria Própria

Medidas do reservatório	(m)
Comprimento	3,41m
Largura	0,735m
Altura	0,55m

Utilizando as equações da figura 11, calculou-se o centróide das paredes do reservatório. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 2 – Centroides das Paredes do Reservatório. Fonte: Autoria Própria

Parede	X(m)	Y(m)
Lateral	1,705	0,275
Frontal	0,3675	0,275

De posse desses valores, calculou-se as forças hidrostáticas com os resultados expressos no tópico seguinte.

5.1.1 Forças Hidrostáticas Bancada Ociosa

Para o cálculo das forças hidrostáticas a que as paredes do reservatório está submetido quando a bancada não está em funcionamento, ou seja, não há escoamento e a água está parada, utilizou-se a equação 4.1, encontrando os parâmetros necessários para cálculo da pressão no centroide, e, a partir da equação 4.2, encontrou-se a altura do centro de pressão, ou ponto de aplicação da força, de tal maneira que somado à altura do centroide, têm-se o ponto de aplicação. A altura da água medida é de 0.5m.

A tabela a seguir demonstra os resultados encontrados para o reservatório.

Tabela 3 – Forças Hidrostáticas nas Paredes do Reservatório. Fonte: Autoria Própria.

	Lateral	Frontal
Altura de Coluna de Água(m)	0,5	0,5
Peso Específico	9790	9790
θ	90	90
h_{ct}	0,275	0,275
Área(m²)	1,705	0,3675
F(N)	4590,286	989,402
h_{cp}	0,1833	0,1833

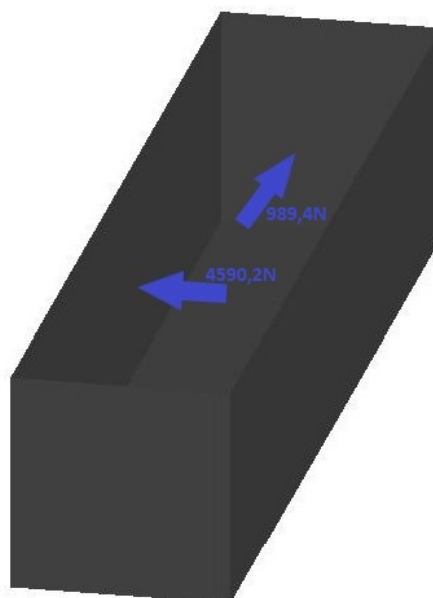


Figura 26 – Forças no reservatório. Fonte: Autoria Própria

Para o cálculo da força no fundo do reservatório, a fim de investigar a magnitude dessa força e relação com a questão dos vazamentos, utilizou-se a equação 3.13 para obter a pressão no fundo, e após, a equação 3.18 para obter a força no fundo..

Tabela 4 – Força no Fundo do Reservatório. Fonte: Autoria Própria.

Área(m²)	2,50635
Patm(Pa)	101325
Peso Específico	9790
Altura de Coluna de Água(m)	0,5
Pressão(N)	106220
F(N)	226224,5

Os dados obtidos são consistentes, estão dentro do esperado para a área das paredes e para o material alumínio. O período de aulas da faculdade em um ano tem a duração de 8 meses, e o período de férias, 4 meses. Durante o período de férias, aproximadamente 120 dias, o reservatório está submetido a estes valores de força, bem como nas 12 horas por dia em que a bancada está desligada quando em período de aulas.

5.1.2 Forças Exercidas Quando a Bancada está em Funcionamento

Segundo a Relação da Quantidade de Movimento Linear dada pela equação 3.33, é possível calcular as forças hidrostáticas nas paredes do reservatório quando a bancada está ligada e o reservatório recebe água do vertedouro, considerando Regime Permanente, as variações no tempo serão iguais à zero, têm-se:

$$\sum F = \iint u(\rho \vec{u} \cdot \hat{n}) dA \quad (5.1)$$

As áreas A1, A2, são as áreas laterais e A3 e A4 a frontal e traseira. O ângulo entre o vetor \vec{u} (vetor velocidade) e \hat{n} é 180 graus, $\cos(180) = -1$ e o valor da velocidade foi encontrado pelo método do vertedouro triangular (cálculos em anexo).

$$\sum F = -\rho u A_1 - \rho u A_2 - \rho u A_3 - \rho u A_4 \quad (5.2)$$

Substituindo os devidos valores encontrou-se os seguintes resultados para a força quando a bancada está em funcionamento:

Tabela 5 – Forças Bancada em Funcionamento. Fonte: Autoria Própria.

Forças	(N)
Lateral	423,8636
Frontal	91,36063
Total	1030,44846

A magnitude das forças encontradas novamente são consistentes e estão dentro dos valores esperados, durante 240 dias, quando a universidade está em período de aulas, por pelo menos 2 horas por dia, o reservatório da bancada está submetido a estes valores de força.

A magnitude das forças hidrostáticas calculadas quando a bancada não está em funcionamento são da ordem de grandeza de 10^2 N para as paredes frontal/traseira, e da

ordem de 10^3 N para as paredes laterais do reservatório. A maior magnitude de força encontrada foi para o fundo do reservatório, ultrapassando 200 KN, com tempo de aplicação de força por pelo menos 12 horas por dia.

A magnitude da força quando a bancada está em funcionamento é da ordem de 10^3 N, com tempo de aplicação de 2 horas.

5.2 ESFORÇOS

Em posse dos valores da forças no reservatório, calculou-se os esforços a que as paredes do mesmo estão sujeitas, pelo equilíbrio de forças e método das seções, os cálculos estão em anexo. Realizou-se também o diagrama de esforços na barra utilizada como modelagem do problema. A tabela a seguir demonstra os resultados de valores máximos encontrados de esforços para a bancada sem funcionamento, com a água parada no reservatório.

Tabela 6 – Esforços nas Paredes Lateral e Frontal(estático). Fonte: Autoria Própria

Esforço	Valor
Normal(N)	0
Cortante(N)	611,875
Momento Fletor(Nm)	101,57

Esses valores ocorrem no ponto mais baixo do reservatório ($x=0$) nas proximidades do rompimento da solda. Os gráficos a seguir demonstram os diagramas de esforços na estrutura.

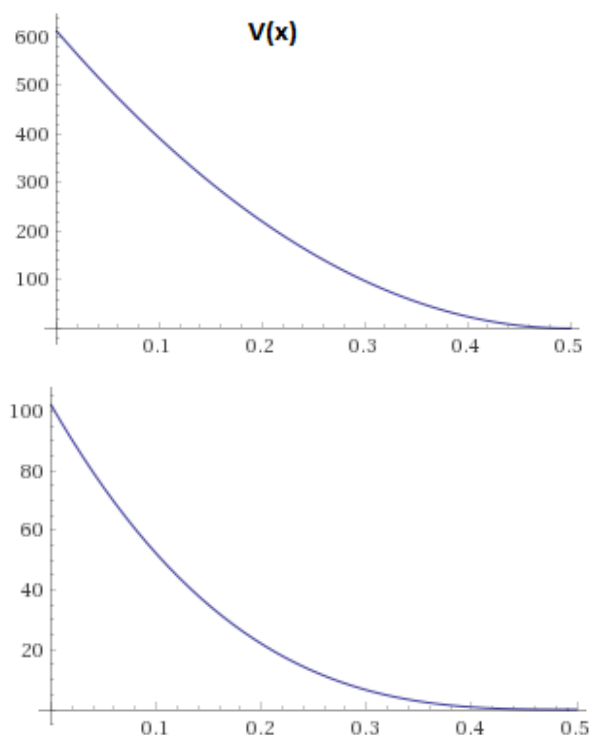


Figura 27 – Diagramas de Esforços (estático). Fonte: Autoria Própria

Observa-se no gráfico que o maior valor de esforço ocorre junto ao engastamento, onde está a parte da solda. Isso ocorre devido ao fato de se ter o maior momento fletor nessa parte, conseqüentemente, os maiores esforços estarão concentrados nessa área, devido à tendência de a parede fletir uma vez que há a presença de água e esse momento fletor. Esta é a provável causa do rompimento. Observa-se também que o valor do esforço cortante decai em uma equação do segundo grau até 0, quando $x = 0.5$ local mais alto onde a água está, e que conseqüentemente exerce menor pressão. O valor do momento fletor cai mais rapidamente, em uma equação de terceiro grau, até 0 no ponto mais alto.

Quando a bancada está em funcionamento os maiores valores de esforços encontrados foram os da tabela a seguir.

Tabela 7 – Esforços Parede Lateral e Frontal (em funcionamento). Fonte: Autoria Própria

Parede	Esforço	Valor
Lateral	Normal(N)	0
	Cortante(N)	423,8575
	Momento Fletor(Nm)	116,56
Frontal	Normal(N)	0
	Cortante(N)	91,355
	Momento Fletor(Nm)	25,1223

A figura a seguir expressa os diagramas de esforços com movimento para a parede

frontal:

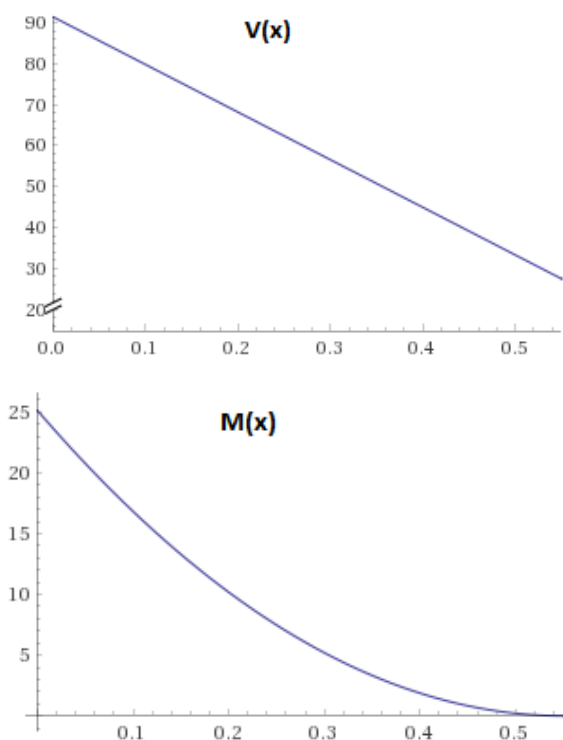


Figura 28 – Diagramas de Esforços Frontal(movimento). Fonte: Autoria Própria

A figura a seguir expressa os diagramas para a parede lateral com movimento:

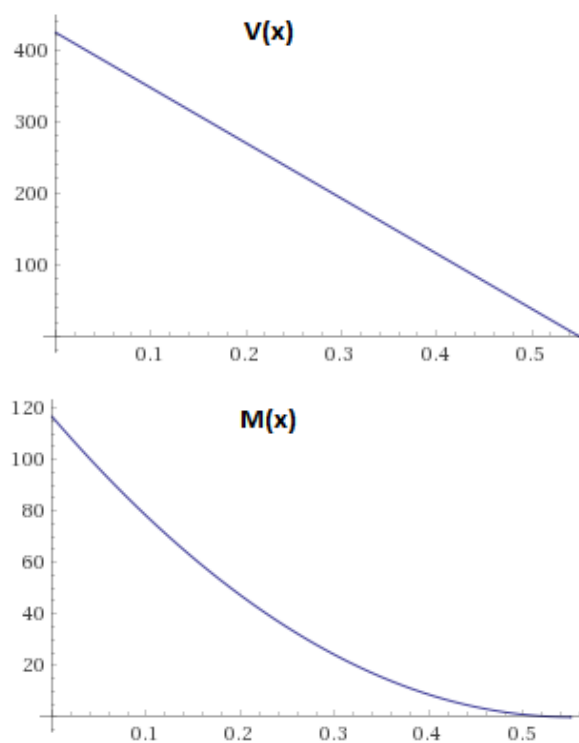


Figura 29 – Diagramas de Esforços Lateral(movimento). Fonte: Autoria Própria

Observa-se que em comparação aos outros gráficos de esforços, estes são diferentes, mas seguem a mesma lógica, o valor dos esforços também são maiores no ponto de engastamento, devido novamente ao momento fletor ser maior neste ponto, o esforço cortante também é maior, porém, observa-se uma diminuição da magnitude desses esforços, sendo que a força também é menor nesse caso. No contexto, a velocidade da água encontrada foi suficientemente baixa para que as forças e esforços sejam menores, em comparação à água estar parada. O esforço cortante decai de acordo com uma equação linear, já o momento fletor decai menos rapidamente até o ponto $x = 0.5m$ do que no caso em que a água está parada, com uma equação de segundo grau.

Fazendo-se uma extrapolação. dividindo o valor desses esforços pelo tempo em que a bancada fica ligada ou desligada, temos uma noção do valor de esforços por tempo de acordo com a tabela a seguir.

Tabela 8 – Esforços por tempo. Fonte: Autoria Própria

Período de aulas				
Bancada Ociosa		Movimento		
Cortante(N/h)	50,98	Lateral	Cortante(N/h)	211,92
			Momento fletor(Nm/h)	58,28
Momento Fletor(Nm/h)	8.46	Frontal	Cortante(N/h)	45,67
			Momento Fletor(Nm/h)	12,56
Período de Férias				
Cortante(N/h)			25,49	
Momento Fletor(Nm/h)			4,23	

Dessa maneira, pelo menos estes valores de esforços são aplicados continuamente na bancada.

5.3 TENSÕES DE CISALHAMENTO MÁXIMAS

As tensões de cisalhamento máximas foram calculadas tomando a seção transversal onde ocorre o máximo esforço cortante(cálculos em anexo). Os resultados foram os seguintes:

Tabela 9 – Tensões Parede Lateral e Frontal. Fonte: Autoria Própria

	Parede	Tensão(kN/m ²)
Sem movimento	Lateral	134,57
	Frontal	624,36
Com movimento	Lateral	93,22
	Frontal	93,22

A parte mais baixa do reservatório (onde ocorreu o rompimento) está sujeita a estes valores de tensão. Para efeitos de comparação, a tensão admissível para uma liga comum de alumínio é de 186MPa (HIBBELER, 2004), todos os valores encontrados estão abaixo do valor da tensão máxima de cisalhamento que o alumínio suporta. Apesar de os valores encontrados, tanto de esforços, quanto de tensões, estarem dentro dos valores esperados, não foi considerado neste trabalho uma determinação dos esforços acumulados, mas tais valores são aplicados ao reservatório continuamente, e não apenas uma vez, sem uma manutenção ou monitoramento. Fica o questionamento de se é adequado aplicar continuamente esses esforços e tensões às estruturas, sem uma manutenção, pois, não há valores exorbitantes de esforços e tensões, e o problema não está nos valores em si, mas sim na continuidade da aplicação dos mesmos. Por quanto tempo a bancada suporta a esse regime de trabalho? Esta também é uma indagação que se faz.

O caso mais crítico de valores de tensão encontrados é o caso da parede frontal, com $624,36\text{kN/m}^2$, deve-se dar mais atenção a esse caso, quando houver a avaliação ou monitoramento.

Não há ainda a possibilidade de avaliar de maneira completa o valor da tensão, se ela está dentro do limite que o material suporta, ou tensão admissível, devido ao fato de não ter sido feita uma análise completa do material, que agora é um compósito, contendo fibra de vidro, resina, e ainda, na sua construção, foram feitas algumas emendas de materiais que haviam no local da construção.

5.4 TENSÕES NORMAIS MÁXIMAS

As tensões normais máximas foram calculadas tomando a seção transversal onde ocorre o máximo momento fletor (cálculos em anexo). Os resultados foram os seguintes:

Tabela 10 – Tensões Normais Parede Lateral e Frontal. Fonte: Autoria Própria

	Parede	Tensão (kN/m^2)
Sem movimento	Lateral	22,2
	Frontal	518,6
Com movimento	Lateral	30,07
	Frontal	139,51

A parte onde ocorre o maior momento fletor, conseqüentemente o maior esforço cortante, está sujeita às tensões normais da Tabela 11, devido à flexão que ocorre por causa da presença de água. Dessa forma, as tensões principais a que o reservatório está submetido

foram determinadas. A tensão admissível para tração e compressão de uma liga comum de alumínio é $290MPa$, os valores encontrados estão dentro dos valores esperados que o alumínio suporte. Entretanto, é importante resaltar que são aplicados continuamente.

5.5 DEFLEXÃO

A deflexão máxima foi calculada a partir do método da integração, encontrando a equação da linha elástica, e também pelo método da superposição.

Tabela 11 – Deflexão Parede Lateral e Frontal. Fonte: Autoria Própria

	Parede	Deflexão(m)
Sem movimento	Lateral	$1,613 * 10^{-8}$
	Frontal	$1,613 * 10^{-6}$
Com movimento	Lateral	$5,0809 * 10^{-9}$
	Frontal	$1,0936 * 10^{-7}$

Esses são os valores encontrados para o deslocamento máximo, que ocorre na parte mais alta das paredes, devido ao momento a que as paredes estão submetidas.

Ressalta-se que apesar de os valores encontrados estarem entre 10^{-8} e 10^{-6} , uma vez que a presença de água é contínua, há a hipótese de se terem deflexões cíclicas nas paredes, que por sua vez causam esforços. A presença dessas deflexões cíclicas podem levar a estrutura à falha por fadiga, que é a falha prematura, ou dano permanente devido à carregamentos cíclicos nas estruturas. É uma hipótese a ser levantada, até mesmo em trabalhos futuros e o presente trabalho pode servir como ponto de partida para essa análise.

Deve-se também realizar manutenção em pontos onde a solda venha a falhar devido à deflexão, visto que já se sabe que é um ponto importante de falha, a manutenção deverá dar mais atenção também a esse caso.

5.6 INSPEÇÃO DO RESERVATÓRIO

A aplicação continuada dos esforços calculados no item anterior pode ter levado a danos que causaram os vazamentos. Estes danos foram avaliados através de uma inspeção do reservatório. Foram encontradas evidências de rompimento da solda, as imagens a seguir demonstram as evidências.



Figura 30 – Rompimento da Solda. Fonte: Comunicação Interna

O fato de partes da solda terem se rompido foi o que levou o reservatório a apresentar vazamentos muito expressivos, chegando a alagar em certo momento o espaço do laboratório onde estava a bancada. Foi aplicado fibra de vidro e resina numa tentativa de sanar os vazamentos.

Diante de tais evidências, acredita-se que o que levou ao rompimento da solda foi a aplicação por um longo período de tempo dos esforços determinados, onde o esforço de cisalhamento atuava na tentativa de deslizar em duas partes, ou cortar, na parte onde estava a solda, além de uma tensão atuante onde seu valor máximo também estava nessa parte da estrutura, causando o colapso da mesma.

Além desses atuantes, o momento, que tende a flexionar a estrutura também atingia seu valor máximo nessa parte, ajudando a causar o descolamento da solda. Para a deflexão foram encontrados valores pequenos, mas ao longo de todo o tempo de uso da bancada são consistentes pela presença de água, o que também pode contribuir para os danos causados. Não é adequado aplicar continuamente esses esforços e tensões às estruturas, sem uma manutenção, há então a necessidade de haver uma manutenção preditiva, onde há um monitoramento periódico da estrutura, baseando-se na coleta de dados por meio de inspeções. Dessa forma, a verificação pode antecipar a comunicação de eventuais problemas, de maneira que a evitar que eles aconteçam e manter a integridade das estruturas.

Não houve a necessidade de trocar o reservatório, visto que ainda tem boas condições de uso e, se mitigado, não trará maiores problemas. A proposta inicial é esvaziar o reservatório no período de férias, quando geralmente o mesmo não tem uso, nesse período, limpá-lo e passar um material na parte da solda como resina de vidro ou silicone para sanar o problema.

Se feito sempre que a universidade estiver em período de férias, o esvaziamento do reservatório vai poupar que o mesmo esteja exposto por tanto tempo pelos esforços e tensão maiores, que é quando a água está parada, além disso, evitará que as estruturas,

como a parte de sucção da bomba no reservatório, enferrugem.

A segunda parte das medidas, inclui realizar inspeções periódicas na estrutura, a fim de verificar o estado da solda, das conexões e condições dos componentes. A inspeção pode fazer parte da disciplina de sistemas hidrelétricos, com ajuda dos alunos. A princípio, um intervalo de tempo razoável para as inspeções é de 2 vezes por semestre, ou a cada 3 meses.

No caso das inspeções apontarem danos na solda, realizar medidas mitigatórias para controlar o problema, como aplicação de resina. Se o dano for muito expressivo, a alternativa é soldar novamente a parte danificada.

6 CONCLUSÕES

A bancada didática de ensaio de turbinas hidráulicas da FGA é de suma importância para o aprendizado prático dos alunos, faz parte da conexão entre o teórico que aprendem nas salas de aula e o concreto, prático. Problemas de vazamentos na bancada trazem insegurança às atividades realizadas no laboratório, além disso, têm dificultado que as aulas aconteçam.

O presente trabalho realizou um estudo sobre as causas dos vazamentos no reservatório da bancada, realizando um diagnóstico a partir do cálculo das forças hidrostáticas atuantes nas estruturas que compõem o reservatório, dos esforços atuantes bem como as tensões e deflexão nas estruturas. As forças encontradas quando a bancada está desligada são da ordem de 10^2N e 10^3N , nas paredes do reservatório.

Para a bancada em funcionamento, ou seja, quando há movimento do fluido, a magnitude da força foi da ordem de 10^3N , a hipótese é de que o reservatório esteja sujeito à essa magnitude de força por pelo menos 2 horas, que é o tempo mínimo que a bancada está funcionando, já para quando não está funcionando, e as forças hidrostáticas nas paredes são para a água parada, a hipótese é de que o reservatório esteja sujeito à essa magnitude de força por pelo menos 12 horas.

Diante dos cálculos de esforços, tensões e deflexão, conclui-se que o que pode ter levado ao rompimento da solda foi a aplicação por um longo período de tempo dos esforços determinados e a deflexão nas paredes, os maiores valores encontrados ocorrem justamente na parte que entrou em colapso, devido à pressão da água ser maior no fundo.

Para manter a integridade da estrutura, não houve a necessidade de trocar o reservatório, a proposta inicial é esvaziar o reservatório no período de férias, para poupar que o mesmo esteja exposto por tanto tempo pelos esforços e tensão maiores, que é quando a água está parada.

Ainda na questão das medidas mitigatórias, propõe-se a realização de manutenção preditiva, através de inspeções periódicas na estrutura, a fim de verificar o estado da solda, das conexões e condições dos componentes. A inspeção pode fazer parte da disciplina de sistemas hidrelétricos, com ajuda dos alunos.

Por fim, espera-se que o presente trabalho seja de grande ajuda para a faculdade de engenharias do gama, visto que o reservatório não estando em bom estado, prejudica as aulas, que as medidas sejam suficientes para manter a sua integridade, para que as aulas possam voltar a acontecer dentro da normalidade. Caso haja a necessidade no futuro, os cálculos presentes neste trabalho podem auxiliar em um novo projeto, ou para orientar

novas medidas a serem tomadas.

Como propostas de trabalhos futuros, recomenda-se :

- Uma caracterização completa do material do reservatório e estudo da tensão admissível;
- Um estudo de falha por fadiga na estrutura;
- Estudo de materiais para construção de um novo reservatório que traga maior confiança e necessitem de menos manutenção, para que não seja necessário parar as atividades da bancada por muito tempo.

Referências

- ALVES, K. D. *Desenvolvimento de Regulador de Velocidade para Turbina Indalma com sintonia PID Baseado em Otimização por Enxame de Partículas (PSO)*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 8, 19, 20 e 24.
- ANEEL. *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*. 2008. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap3.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 18.
- BEER F. P.; JOHNSTON, E. R. Resistência dos materiais. In: . [S.l.: s.n.], 2008. v. 3. Citado 4 vezes nas páginas 8, 38, 39 e 40.
- CALIXO, R. d. O. Sistema supervisorio para bancada de ensaio de picoturbina hidráulica indalma. In: . [S.l.: s.n.], 2015. Citado 3 vezes nas páginas 8, 24 e 25.
- CHRISTOFORO, A. L. Esforços solicitantes em vigas. In: . [S.l.: s.n.], 2018. Citado 4 vezes nas páginas 8, 36, 37 e 38.
- ENGENHEIRAÇO. *Estática, carga concentrada e distribuída*. 2013. Disponível em: <<https://engenheiraco.blogspot.com/2013/11/estatica-carga-concentrada-e-carga.html>>. Acesso em: 30 nov. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 34.
- EPE. *Balanço Energético Nacional 2016*. 2017. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2018. Citado na página 14.
- FURNAS. *Usina Hidrelétrica*. 2018. Disponível em: <http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina_hidr_funciona.asp>. Acesso em: 20 jun. 2018. Citado na página 14.
- HENN, E. A. L. Máquinas de fluido. In: . [S.l.: s.n.], 2006. v. 2. Citado na página 19.
- HIBBELER, R. C. Resistência dos materiais. In: . [S.l.: s.n.], 2004. v. 5. Citado 7 vezes nas páginas 8, 34, 35, 37, 38, 39 e 52.
- MACINTYRE, A. Máquinas motrizes hidráulicas. In: . [S.l.: s.n.], 1983. Citado na página 20.
- MELEGARI, S. *Geração de Energia Elétrica - Sistema Elétrico*. 2018. Disponível em: <https://www.unicentro.br/posgraduacao/mestrado/bioenergia/material_didatico/2014/Prof_SAMUEL_Aula_3_GERA_O_DE_ENERGIA_EL_TRICA_HIDREL_TRICA_53710b9176809.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 17.
- NOLETO, L. G. Fenômenos de transporte - notas de aula. In: . [S.l.: s.n.], 2015. Citado 4 vezes nas páginas 27, 28, 31 e 32.
- NOLETO, L. G. Sistemas hidrelétricos - notas de aula. In: . [S.l.: s.n.], 2015. Citado na página 19.

OLIVEIRA, D. d. S. Avaliação experimental em modelo reduzido da turbina hidráulica indalma. In: . [S.l.: s.n.], 2014. Citado 6 vezes nas páginas 8, 19, 20, 21, 22 e 26.

PÉREZ, J. *Centróide e Momento de Inércia de Figuras Planas*. 2015. Disponível em: <<https://es.slideshare.net/jaimeperez31521/tabla-centroidemomentoinercia>>. Acesso em: 18 jun. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 31.

SANTANDER, O. L. S. Montagem e instrumentação de uma bancada para turbina hidráulica. In: . [S.l.: s.n.], 2014. Citado 3 vezes nas páginas 20, 21 e 23.

SANTOS, M. E. C. M. Controle da pressão de operação da bancada de testes para turbinas hidráulicas. In: . [S.l.: s.n.], 2015. Citado 3 vezes nas páginas 21, 22 e 25.

SOUZA, Z. d. Centrais hidrelétricas: Implantação e comissionamento. In: *Centrais Hidrelétricas: Implantação e Comissionamento*. [S.l.: s.n.], 2009. v. 2ed., p. 150–155; 169. Citado na página 17.

WHITE, M. F. Mecânica dos fluidos, 6ed. In: . [S.l.: s.n.], 2007. Citado 7 vezes nas páginas 8, 28, 29, 30, 31, 32 e 33.

Anexos

ANEXO A – CÁLCULOS

A.1 FORÇAS HIDROSTÁTICAS

Parede Lateral

$$F = \rho g h_{ct} A \quad (\text{A.1})$$

- $A = 0.5 * 3.41 = 1.705m^2$
- $\rho g = 9790N/m^3$
- $h_{ct} = 0,275m$

$$F = 4590,286N$$

$$y_{cp} = -\gamma \sin \theta \frac{I_{xx}}{\rho_{ct} A} \quad (\text{A.2})$$

- $\theta = 90^\circ$
- $I_{xx} = 0,0473m^4$

$$y_{cp} = -0,09166m$$

$$h_{cp} = h_{ct} + y_{cp} \quad (\text{A.3})$$

$$h_{cp} = 0,1833m$$

Parede Frontal

De acordo com a equação A.1 e substituindo os valores:

- $A = 0.5 * 0.735 = 1.705m^2$
- $\rho g = 9790N/m^3$
- $h_{ct} = 0,275m$

$$F = 989,402N$$

De acordo com a equação A.2 e A.3 e substituindo os valores:

$$h_{cp} = 0,1833m$$

A.2 FORÇAS COM MOVIMENTO

$$Q = 1,4H^{5/2} \quad (A.4)$$

- Vazão máxima da bomba (Q) = $184 \text{ m}^3/h$ ou $0,05111 \text{ m}^3/s$

$$H = 0,266042m$$

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (A.5)$$

$$D = 4[(26,6+19)*65,2]/2(65,2+19+26,6) = 53,66 \text{ cm}$$

$$u = \frac{Q}{A} \quad (A.6)$$

$$u = 0,0511/\pi(0,5366/2)^2$$

$$u = 0,22600032m/s$$

$$F = \rho u A_1 + \rho u A_2 + \rho u A_3 + \rho u A_4 \quad (A.7)$$

- $A_1 = A_2 = 1,8755m^2$
- $A_3 = A_4 = 0,40425m^2$

$$F = 1030,44N$$

A.3 ESFORÇOS

- Estático

$$w = \rho g h \cdot h \quad (A.8)$$

- $h = 0.5m$
- $\rho g = 9790N/m^3$

$$w = 2447,5N/m$$

Reações de apoio

$$\sum F_x = 0 \quad (A.9)$$

$$H_a = 0$$

$$\sum F_y = 0 \quad (A.10)$$

$$V_a - 2447,5 * 0,5/2 = 0; V_a = 611,875N$$

$$\sum M_a = 0 \quad (A.11)$$

$$M_a - 611,875 * 0,166 = 0; M_a = 101,57Nm$$

Esforço Normal

$$N(x) = 0 \quad P/ 0m \leq x \leq 0.55m$$

Esforço Cortante

$$P/ 0m \leq x \leq 0.5m \text{ (carga trapezoidal)}$$

$$w = 2447,5 - 4895x \quad (A.12)$$

$$\sum F_y = 0 \quad (A.13)$$

$$V(x) + 611,875 - wx - (2447,5 - w) * x/2 = 0$$

$$V(x) = 611,875 - 2447,5x + 2447,5x^2$$

$$P/ 0.5m \leq x \leq 0.55m; V(x) = 0$$

Momento Fletor

$$P/ 0m \leq x \leq 0.5m$$

$$\sum M_b = 0 \quad (A.14)$$

$$101,57 + M(x) - w * x^2/2 - [(2447,5 - w)x/2] * x/3 = 0$$

$$M(x) = 101,57 - 1223,74x^2 + 1631,66x^3$$

$$P/ 0 \leq x \leq 0.5; M(x) = 0$$

- Movimento

- Lateral

Carga retangular

$$w = 770.65/0.55 \quad (\text{A.15})$$

Reações de apoio

$$V_a = 423,85N; M_a = 116,56Nm$$

Esforço Normal

$$P/ 0m \leq x \leq 0.55m N(x) = 0$$

Esforço Cortante

$$P/ 0m \leq x \leq 0.55m$$

$$V(x) = -770,65x + 423,8575$$

Momento Fletor

$$P/ 0m \leq x \leq 0.55m$$

$$M(x) = -385,325x^2 + 423,8575x - 116,56$$

- Frontal

Reações de apoio

$$V_a = 91,36N; M_a = 25,1266Nm$$

Esforço normal

$$P/ 0m \leq x \leq 0.55m N(x) = 0$$

Esforço Cortante

$$P/ 0m \leq x \leq 0.55m$$

$$V(x) = -166x + 91,355$$

Momento fletor

P/ $0m \leq x \leq 0.55m$

$$M(x) = -83,05x^2 + 91,355x - 25,1226$$

A.4 TENSÕES

Tensão de Cisalhamento Máximo

$$\tau_{max} = \frac{VQ}{It} \quad (A.16)$$

V = cisalhamento máximo;

Q = momento estático;

I = momento de inércia;

t = espessura

A seção transversal calculada compreende o comprimento e a espessura:

Parede lateral: 3,41mx0,002m

Parede Frontal: 0,735mx0,002m

Momento Estático em Relação à Linha Neutra

$$Q = \sum \bar{y}' A' \quad (A.17)$$

Momento de Inércia

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (A.18)$$

base = espessura 0,002m;

altura = comprimento

Estático

Parede Lateral

Substituindo os valores:

$$\tau_{max} = 134,57kN/m^2$$

Parede Frontal

Substituindo os valores:

$$\tau_{max} = 624,36kN/m^2$$

Movimento

Parede Lateral

Substituindo os valores:

$$\tau_{max} = 93,22kN/m^2$$

Parede Frontal

Substituindo os valores:

$$\tau_{max} = 93,22kN/m^2$$

Tensão Normal Máxima

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I} \tag{A.19}$$

M = Momento fletor máximo;

c = distância da linha neutra ao ponto mais afastado em que a tensão atua;

I = momento de inércia;

A seção transversal calculada compreende o comprimento e a espessura:

Parede lateral: 3,41mx0,002m

Parede Frontal: 0,735mx0,002m

Momento de Inércia

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (\text{A.20})$$

base = espessura 0,002m;

altura = comprimento

Estático

Parede Lateral

Substituindo os valores:

$$\sigma_{max} = 22,2kN/m^2$$

Parede Frontal

Substituindo os valores:

$$\sigma_{max} = 518,6kN/m^2$$

Movimento

Parede Lateral

Substituindo os valores:

$$\sigma_{max} = 30,07kN/m^2$$

Parede Frontal

Substituindo os valores:

$$\sigma_{max} = 139,5kN/m^2$$

A.5 DEFLEXÃO

Deflexão para viga em balanço, engastada, carga triangular. P/ $0 \leq x \leq L$

$$\frac{w_0}{L} = \frac{w}{x} \quad (\text{A.21})$$

$$w = \frac{w_0 x}{L}$$

$$\sum M(b) = 0 \quad (\text{A.22})$$

$$M(x) = -\left[\frac{w_0 x}{L} * x/2\right] * x/3 = -\frac{w_0 x^3}{6L}$$

$$EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = M(x) = -\frac{w_0 x^3}{6L} \quad (\text{A.23})$$

$$EI \frac{\partial y}{\partial x} = -\frac{w_0 x^4}{12L} + c_1 \quad (\text{A.24})$$

$$EI y = -\frac{w_0 x^5}{120L} + c_1 x + c_2 \quad (\text{A.25})$$

Condições de contorno

$$\text{quando } x = L; y = 0 \text{ e } \frac{\partial y}{\partial x} = 0$$

$$c_1 = \frac{w_0 L^3}{24}; c_2 = -\frac{w_0 L^4}{30}$$

Equação da Linha Elástica

$$y = \frac{w_0}{120EIL} (-x^5 + 5L^4 x - 4L^5) \quad (\text{A.26})$$

A deflexão máxima ocorre quando $x = 0$, substituindo:

$$y = -\frac{w_0 L^4}{30EI}$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \theta = \frac{w_0 L^3}{24EI}$$

Pelo método da superposição, fazendo a deflexão de $L = 0.55$, somando à deflexão de $1/11L$ oposta:

$$y = -\frac{w_0 L^4}{30EI} + \frac{w_0 L^4}{439230EI} \quad (\text{A.27})$$

- Os momentos de inércia é calculado igualmente ao da tensão
- O módulo de elasticidade do material que é o alumínio e $70 * 10^9 Pa$

Substituindo os valores.

- Estático

Lateral

$$y = 1,6136 * 10^{-8}m$$

Frontal

$$y = 1,614 * 10^{-6}m$$

- Movimento

Lateral

$$y = 5,08 * 10^{-9}m$$

Frontal

$$y = 1,093 * 10^{-7}m$$