



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ – UFPA
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ – CAMTUC
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA – FEM

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MODELOS ESTRUTURAIS PARA DISPOSITIVOS
DE ANCORAGEM SUBMETIDOS A AUMENTO SIGNIFICATIVO DE CARGA

EVERTON VIANA DE SOUZA

TUCURUÍ
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ – UFPA
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ – CAMTUC
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA – FEM

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MODELOS ESTRUTURAIS PARA DISPOSITIVOS
DE ANCORAGEM SUBMETIDOS A AUMENTO SIGNIFICATIVO DE CARGA

EVERTON VIANA DE SOUZA

Trabalho de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Dr. Maciel da Costa Furtado
Coorientador: Prof. Msc. Arthur dos Reis Lemos Fontana

TUCURUÍ
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ – UFPA
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ – CAMTUC
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA – FEM

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MODELOS ESTRUTURAIS PARA DISPOSITIVOS
DE ANCORAGEM SUBMETIDOS A AUMENTO SIGNIFICATIVO DE CARGA

EVERTON VIANA DE SOUZA

Trabalho de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Data da aprovação: 03/04/2025

Conceito: Bom

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof^o Dr. Maciel da Costa Furtado
FEM/ CAMTUC/ UFPA

Membro interno: Prof^o Msc. Arthur dos Reis Lemos Fontana
FEM/ CAMTUC/ UFPA

Membro interno: Prof^o Msc. Maycon Magalhães Castro
FEM/ CAMTUC/ UFPA

Este trabalho é dedicado a meu falecido pai
Jocivaldo Alves de Souza o qual não pôde ver a
conclusão desta etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Faculdade de Engenharia Mecânica da UFPA Campus Tucuruí – CAMTUC, através do Laboratório de Mecânica Computacional em Parceria com o Grupo de Pesquisa do Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados – FluidPar.

“Um pedaço de pão comido em paz é melhor do que um banquete comido com ansiedade.”

(Provérbios 17:1)

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo técnico de modificação estrutural em um dispositivo de ancoragem originalmente projetado para suportar cargas máximas de até 300 kg, com o objetivo de elevá-lo à capacidade de 1 tonelada. A necessidade da modificação surgiu a partir de novas exigências operacionais em sistemas de contenção biológica, especialmente em atividades de descida na sucção de estruturas hidráulicas. O dispositivo original era composto por duas vigas do tipo perfil I, fabricadas em aço ASTM A36, e possuía uma mão francesa tubular que suportava o braço principal. Inicialmente, foi realizada uma análise estrutural utilizando o método dos elementos finitos (FEA), com base no critério de Von Mises, avaliando o desempenho da estrutura sob carga máxima concentrada. Os resultados indicaram tensões próximas ao limite de escoamento do material, sugerindo a necessidade de reforços. A modificação envolveu a substituição da mão francesa por uma viga do tipo perfil I, a ampliação dos olhais de ancoragem, a inclusão de uma viga perfil T na parte superior e reforços inferiores para redistribuição dos esforços. A nova configuração foi validada por meio de simulações adicionais em FEA, com carga distribuída entre dois pontos de ancoragem. Os resultados revelaram tensões de até 218,12 MPa e uma deformação total de 3,1656 mm, mantendo-se dentro dos limites admissíveis do material utilizado. Conclui-se que as modificações propostas são eficientes e seguras, com potencial de aplicação em sistemas sujeitos a solicitações similares, proporcionando maior confiabilidade operacional e segurança estrutural.

Palavras chave: Engenharia Mecânica; Método dos elementos finitos (MEF); Análise Estrutural; Dispositivo de Ancoragem.

ABSTRACT

This paper presents a technical study of structural modification in an anchoring device originally designed to support maximum loads of up to 300 kg, with the aim of increasing its capacity to 1 ton. The need for modification arose from new operational requirements in biological containment systems, especially in activities involving lowering the suction of hydraulic structures. The original device consisted of two I-beams, manufactured in ASTM A36 steel, and had a tubular French arm that supported the main arm. Initially, a structural analysis was performed using the finite element method (FEA), based on the Von Mises criterion, evaluating the performance of the structure under maximum concentrated load. The results indicated stresses close to the yield point of the material, suggesting the need for reinforcements. The modification involved replacing the French arm with an I-beam, enlarging the anchoring eyes, including a T-beam in the upper part and lower reinforcements for redistribution of forces. The new configuration was validated through additional FEA simulations, with distributed load between two anchorage points. The results revealed stresses of up to 218.12 MPa and a total deformation of 3.1656 mm, remaining within the admissible limits of the material used. It is concluded that the proposed modifications are efficient and safe, with potential for application in systems subject to similar demands, providing greater operational reliability and structural safety.

Keywords: Mechanical Engineering; Finite Element Method (FEM); Structural Analysis; Anchoring Device.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Vista de perspectiva do dispositivo de ancoragem.....	12
Figura 2 – Condição de contorno aplicado ao sistema de ancoragem.....	13
Figura 3 – Tensão calculada pelo estresse equivalente de Von-Mises para a região do apoio.	14
Figura 4 – Ideia para reforço da região de apoio.....	15
Figura 5 – Tensões distribuídas ao longo do dispositivo de ancoragem.....	15
Figura 6 – Deformação total do dispositivo de ancoragem original.....	16
Figura 7 – Proposta de modificação.....	16
Figura 8 – Modificação nos olhais: a) olhal original; b) olhal modificado.....	17
Figura 9 – Campo de Tensões do dispositivo de ancoragem modificado.....	18
Figura 10 – Campo de deformações do dispositivo de ancoragem modificado.....	18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do material utilizado.....	12
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS

ASMT	American Society for Testing and Materials
FEA	Finite Element Analysis
Kg	Quilograma
Mpa	Mega Pascal

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Tensões fornecidas pelo software
σ_e	Tensão de escoamento do material
f_y	Limite elástico

1 INTRODUÇÃO

Estruturas de dispositivos de ancoragem desempenham papel crucial na segurança e eficiência de operações industriais, especialmente em aplicações que envolvem levantamento e movimentação de cargas significativas. A confiabilidade estrutural dessas estruturas está diretamente relacionada à capacidade de suportar esforços mecânicos sem comprometer sua integridade, evitando falhas catastróficas e garantindo segurança operacional (Santos et al., 2018).

Um dos desafios enfrentados em ambientes aquáticos é o acúmulo de organismos marinhos, e o atual crescimento descontrolado da população do mexilhão-dourado (*Limnoperna fortunei*) que aderem às superfícies metálicas e reduzem a eficiência operacional dos sistemas. Esse fenômeno tem sido observado em diversas regiões e tem causado impactos significativos em diversas usinas hidrelétricas do Brasil, exigindo procedimentos frequentes de limpeza e remoção dessas incrustações (Santos, C. P; Darrigran, 2009).

Nesse contexto, dispositivos originalmente projetados para uma determinada capacidade de carga frequentemente exigem adaptações estruturais ao serem submetidos a aumentos expressivos de carga. Essa situação demanda um criterioso processo de avaliação estrutural, no qual ferramentas computacionais, particularmente a Análise por Elementos Finitos (FEA), destacam-se pela capacidade de prever tensões, deformações e regiões críticas com elevada precisão e eficiência (Zienkiewicz & Taylor, 2005; Bathe, 2006).

Diversos estudos apontam a importância da simulação numérica baseada em critérios robustos como o critério de Von Mises para garantir que as estruturas permaneçam dentro de limites seguros de operação, prevenindo deformações permanentes e falhas mecânicas devido a esforços inesperados ou aumentos de cargas operacionais (Budynas & Nisbett, 2019).

Este trabalho apresenta um estudo comparativo detalhado entre dois modelos estruturais de dispositivos de ancoragem, analisando a adaptação de um dispositivo originalmente projetado para suportar cargas de até 300 kg e modificado para uma nova condição de operação com carga máxima de 1.000 kg. O estudo tem por objetivo avaliar, através da aplicação de análise estrutural via elementos finitos, o impacto das modificações na distribuição de tensões, regiões críticas e deformações máximas, proporcionando assim insights relevantes sobre a eficácia das modificações estruturais implementadas.

As análises realizadas buscam não apenas garantir a segurança operacional do dispositivo modificado, mas também estabelecer diretrizes claras para futuras adaptações estruturais similares em contextos industriais semelhantes.

2 METODOLOGIA

O dispositivo de ancoragem atual é construído com duas vigas de perfil I 4x 2 e 5/8 polegadas fabricado em aço ASTM A36, cujas características são apresentadas na Tabela 1.

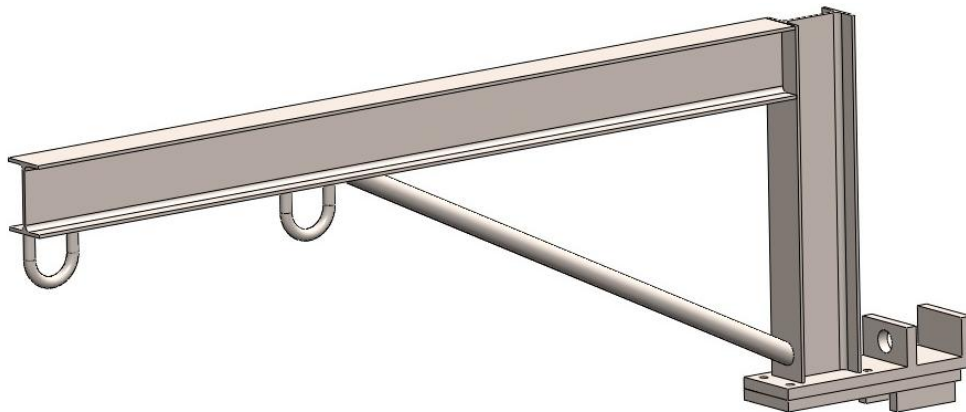
Tabela 1 – Características do material utilizado (Bertene, 2024).

Materiais utilizados							
Material		E (Mpa)	ν	G (Mpa)	f_y (Mpa)	α_t (m/m°C)	γ (t/m ³)
Tipo	Designação						
Aço laminado	A-36 250Mpa	200000.0	0.300	77000.0	249.99	0.000012	7.850
Notação: <i>E</i> : Módulo de elasticidade <i>n</i> : Módulo de poisson <i>G</i> : Módulo de corte <i>f_y</i> : Limite elástico <i>a_t</i> : Coeficiente de dilatação <i>γ</i> : Peso específico							

Fonte: Bertene (2024).

A Figura 1 ilustra uma vista em perspectiva do dispositivo de ancoragem originalmente projetado, cujas dimensões foram fornecidas pela fabricante responsável pelo sistema. Este modelo foi concebido para suportar uma carga máxima de 300 kg, atendendo às demandas operacionais inicialmente previstas.

Figura 1 – Vista de perspectiva do dispositivo de ancoragem



Fonte: Autoria Própria.

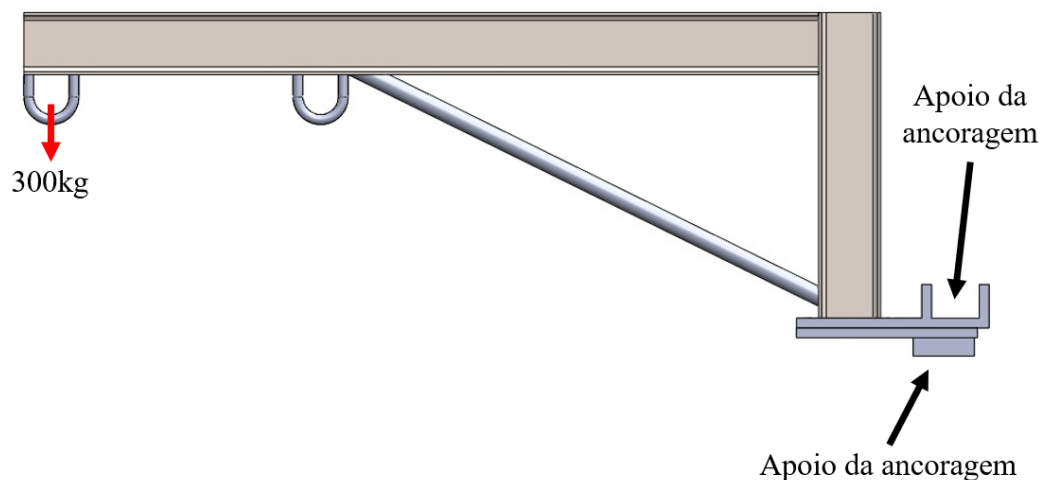
Para verificar a adequação estrutural do dispositivo de ancoragem original frente à carga limite de projeto, foi realizada uma análise numérica por meio do Método dos Elementos Finitos (FEA – Finite Element Analysis). O objetivo da simulação consistiu em avaliar a distribuição de tensões na estrutura e verificar se os esforços resultantes se mantêm dentro dos limites admissíveis do material empregado.

A discretização do domínio geométrico gerou uma malha com 5.761.075 nós e 3.879.004 elementos. O refinamento foi aplicado principalmente em regiões de descontinuidade geométrica e alta curvatura, obtendo 0,34 e 0,88 como parâmetro para as métricas de skewness e ortogonal.

As propriedades mecânicas do material foram definidas com base na Tabela 1, adotando-se as especificações técnicas do aço ASTM A36. As condições de contorno aplicadas ao modelo são apresentadas na Figura 2.

Os resultados obtidos permitiram avaliar a tensão equivalente e subsidiar eventuais recomendações de reforço geométrico ou alteração de material, assegurando o atendimento aos critérios normativos de segurança estrutural.

Figura 2 – Condição de contorno aplicado ao sistema de ancoragem.



Fonte: Autoria Própria.

A avaliação da integridade estrutural do dispositivo de ancoragem foi conduzida com base no critério de resistência de Von Mises, também denominado critério da energia de distorção. Esse critério é amplamente utilizado para materiais dúcteis, uma vez que considera que a falha ocorre quando a energia de deformação por cisalhamento excede um valor limite, correspondente à tensão de escoamento do material.

A ferramenta ANSYS® fornece as tensões mínimas e máximas através do método de elementos finitos. Com esses valores, é possível calcular a tensão equivalente de Von Mises por meio da relação apresentada na Equação 1, a qual permite verificar se o material permanece na região elástica ou se há risco de plastificação (Budynas & Nisbett, 2019).

$$\sigma_e > \left(\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Ou seja, a tensão de escoamento do material (σ_e) apresentado na tabela 1 como o limite elástico (f_y) precisa ser maior que a relação entre as 3 tensões principais descritas na equação 1, caso esse critério seja obedecido o material vai permanecer na zona elástica, não apresentando deformações permanentes.

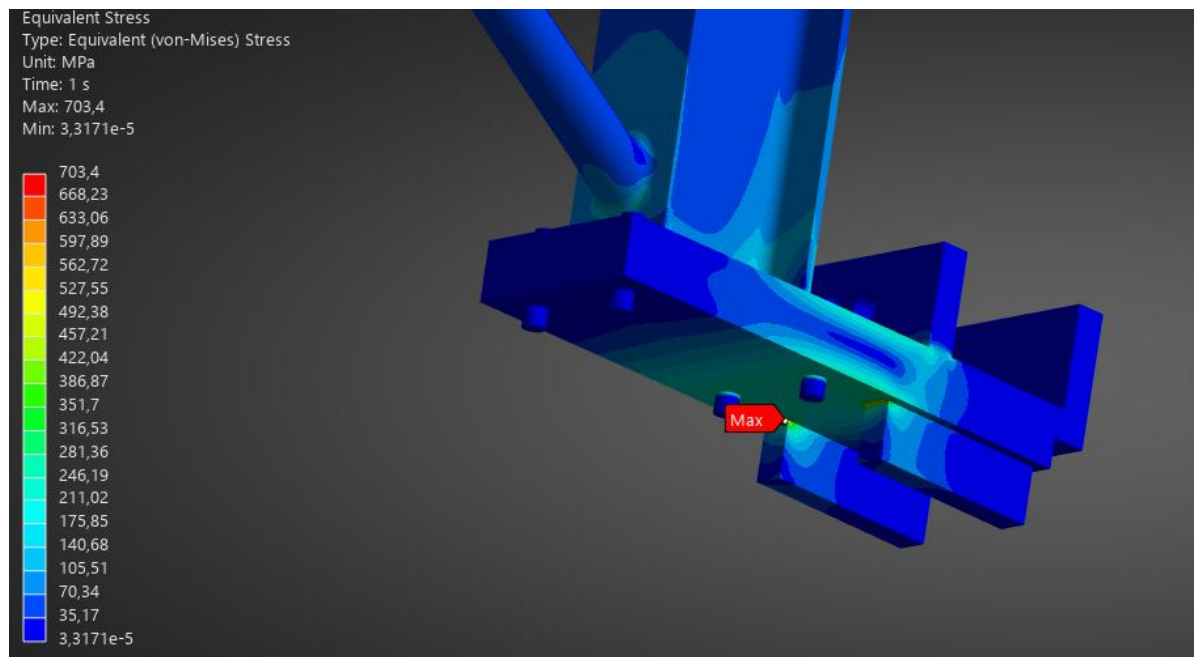
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na primeira vez que foi simulado, o material atingiu o limite de escoamento em uma região próxima a região de ancoragem, conforme apresentado na Figura 3, por esse motivo, recomenda-se incluir em uma região próxima ao suporte do dispositivo de ancoragem um reforço do apoio, conforme apresentado na Figura 4.

A ideia do reforço do apoio destacado em amarelo na Figura 3 é que ele seja apoiado em uma superfície vertical, aliviando o esforço sofrido na região de apoio.

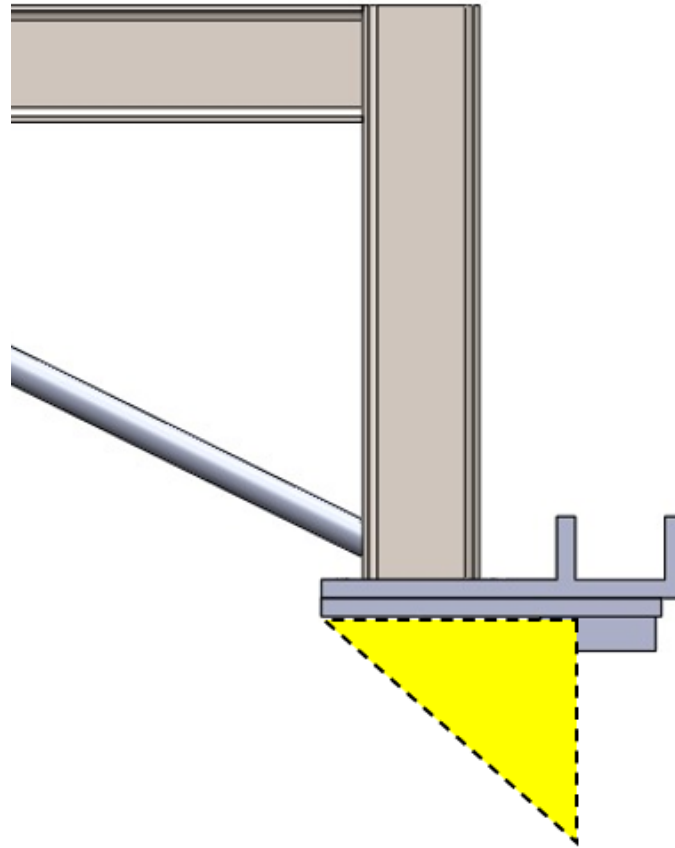
Feito essa modificação e simulado com o reforço do apoio, sendo os valores de tensão e deformação podendo ser observados pelas Figura 5 e 6 respectivamente. O máximo valor de tensão obtido foi de 206,62 MPa, que está em conformidade da tensão admissível de aproximadamente 250 Mpa conforme Tabela 1 no caput deste. Estando apto a trabalhar com a carga de 300kg para o pior cenário.

Figura 3 – Tensão calculada pelo estresse equivalente de Von-Mises para a região do apoio.



Fonte: Autoria Própria.

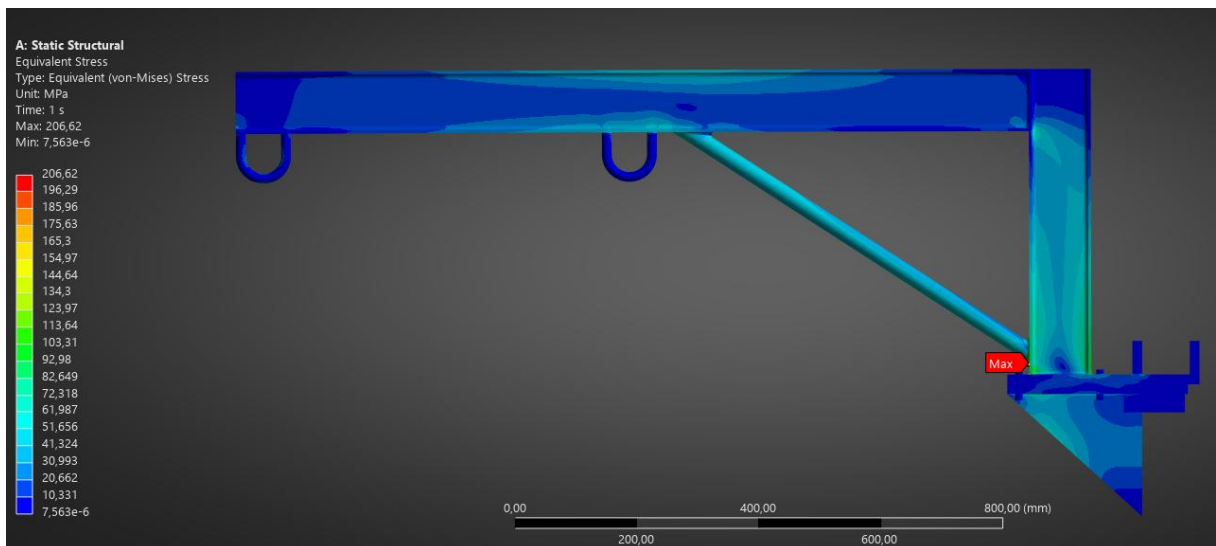
Figura 4 – Ideia para reforço da região de apoio.



Fonte: Autoria Própria.

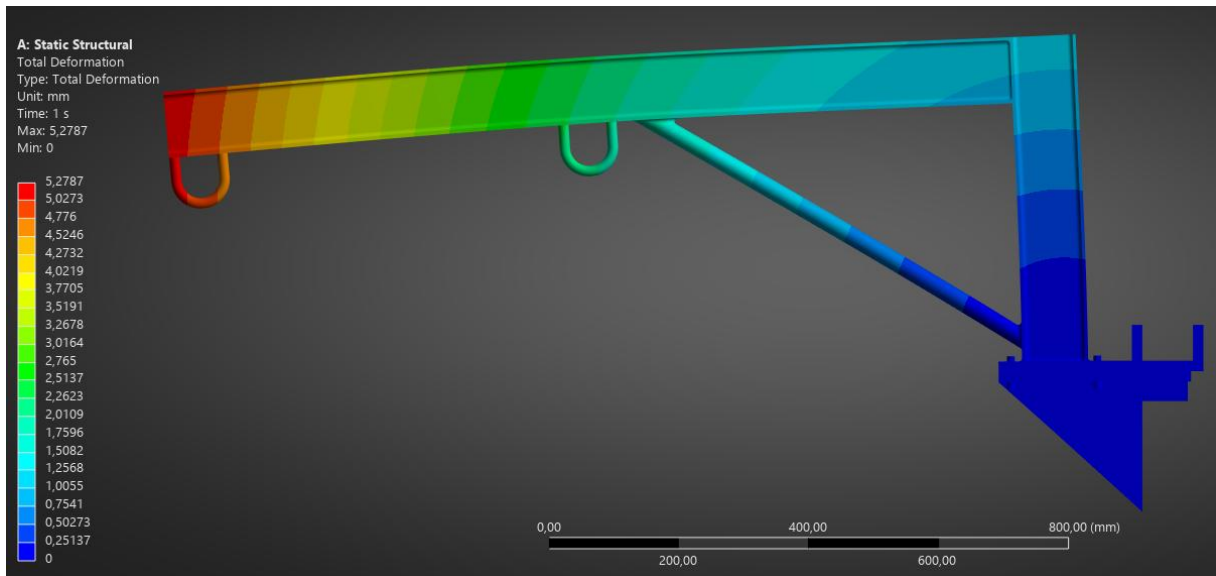
A região de maior tensão nesse último caso foi exatamente na mão francesa, indicando que esse ponto é um ponto de atenção a ser observado ao fazer a proposta de modificação. A deformação máxima foi de 5,8725mm.

Figura 5 – Tensões distribuídas ao longo do dispositivo de ancoragem.



Fonte: Autoria Própria.

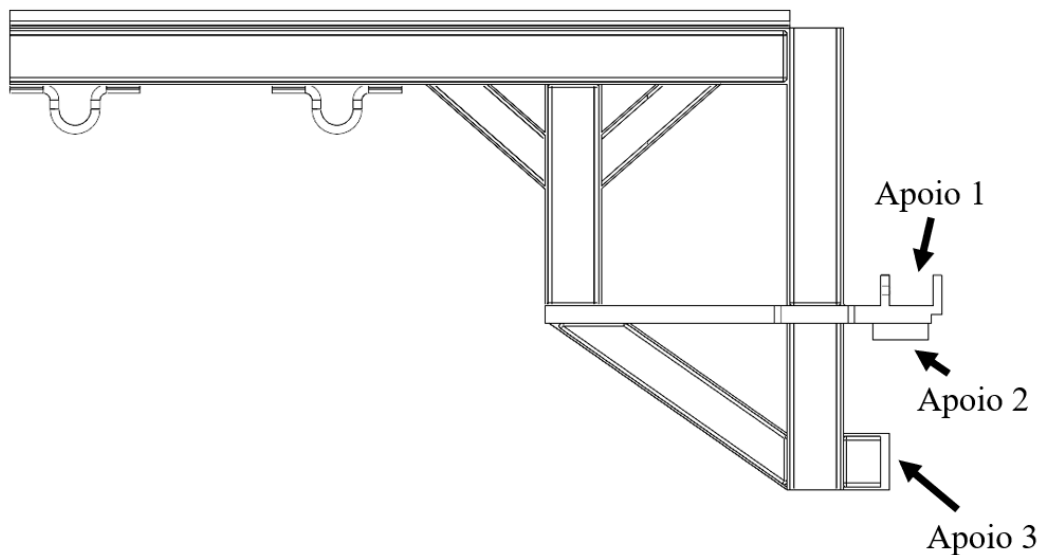
Figura 6 – Deformação total do dispositivo de ancoragem original.



Fonte: Autoria Própria.

O ponto de maior tensão foi no tubo utilizado como mão francesa, assim, foi substituído a mão francesa em formato de tubo por um perfil de viga I similar ao já utilizado na estrutura, aumentando a rigidez no ponto mais frágil da estrutura, além disso, foi modificado o ponto de ancoragem para comportar a carga desejada de 1000kg. A modificação sugerida pode ser observada na Figura 7, o dispositivo continua sendo bipartido, a diferença é que o ponto de ancoragem foi alongado para incluir algumas vigas na parte inferior do dispositivo, criando assim um momento contrário ocasionado pelo apoio 3 apresentado na Figura 7.

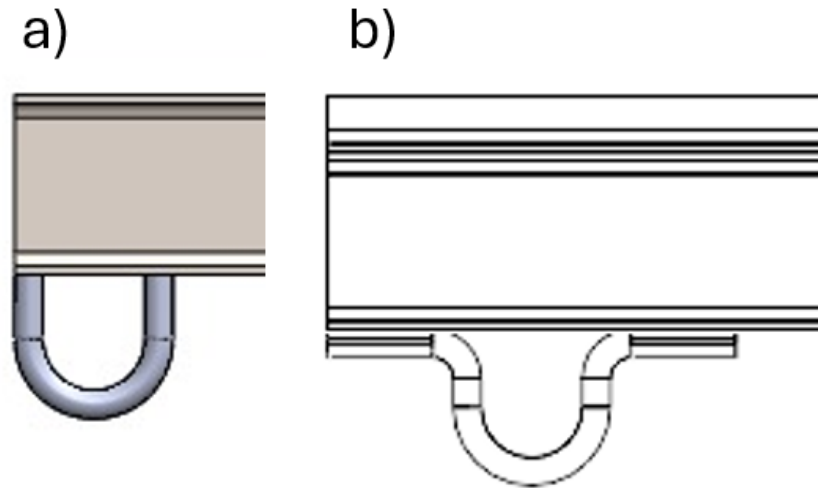
Figura 7 – Proposta de modificação.



Fonte: Autoria Própria.

Outro ponto a ser destacado na proposta de modificação é a modificação dos “olhais” de ancoragem, possuindo uma área maior de fixação conforme ilustrado na Figura 8, além disso, foi incluído uma viga T soldada na parte superior do dispositivo para auxiliar na redução das tensões ao longo do braço que irá suportar os olhais.

Figura 8 – Modificação nos olhais: a) olhal original; b) olhal modificado.

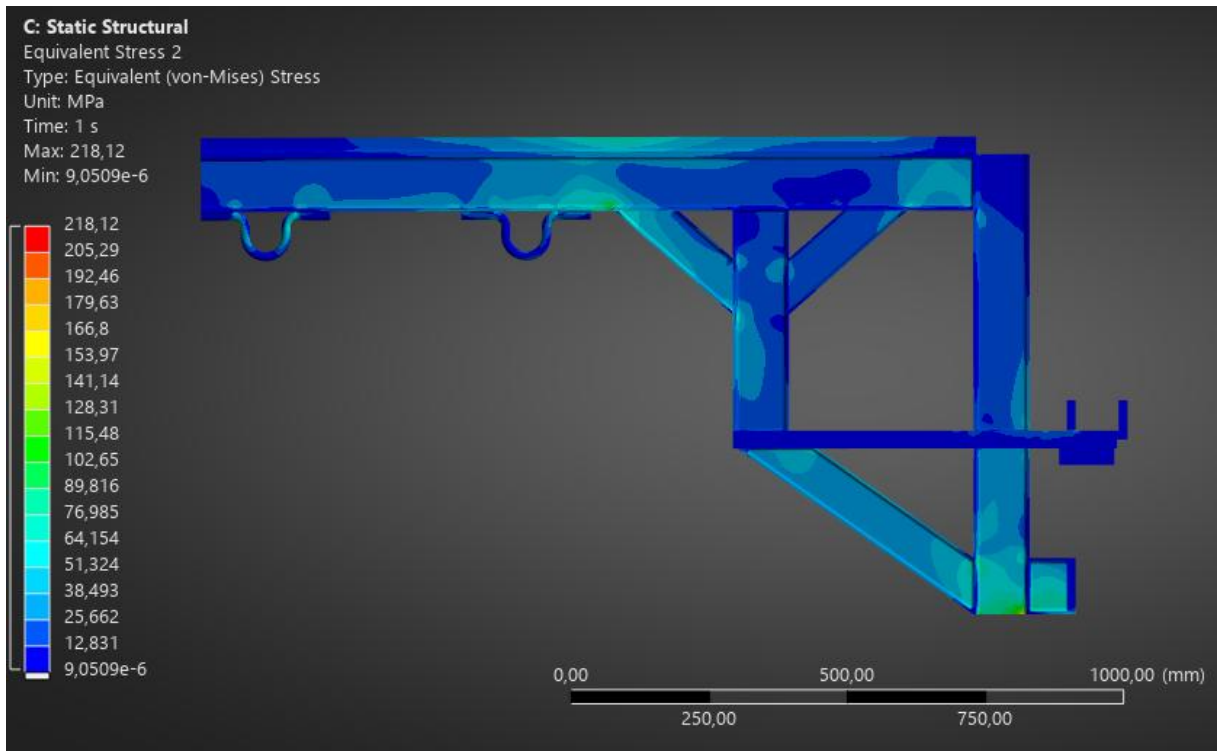


Fonte: Autoria Própria.

Inicialmente, tentou-se seguir o mesmo princípio para o dispositivo original colocando a carga na ponta do dispositivo de ancoragem e alterando a carga para 1000 kg, porém, nesse caso devido ao ponto onde é engatado, para que o critério de falha de Von-Mises seja respeitado o dispositivo de ancoragem acabaria ficando muito pesado e sem ergonomia, dessa forma, optou-se por distribuir a carga de 1000 kg para os dois olhais ao invés de concentrar essa carga em 1 só olhal. A malha na condição modificada passou pelos mesmos critérios de qualidade, apresentando uma quantidade de nós de 11.534.438 e de elementos de 7.873.701.

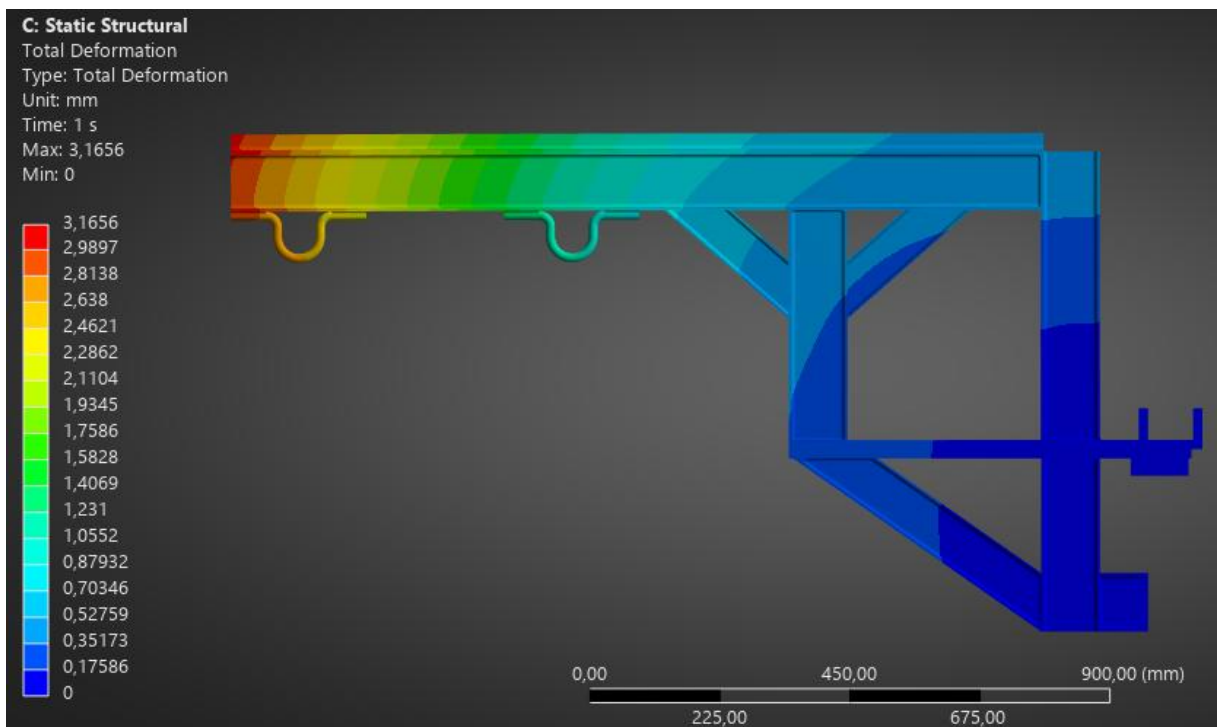
As Figuras 9 e 10 apresentam as tensões e deformações no dispositivo de ancoragem, sendo o maior valor de tensão igual a 218,12 MPa, dentro do limite de escoamento, e a deformação máxima de 3,1656mm. As modificações atingiram o seu objetivo de decompor os esforços para um número maior de vigas, reduzindo as tensões geradas e permitindo que o dispositivo de ancoragem suporte cargas maiores.

Figura 9 – Campo de Tensões do dispositivo de ancoragem modificado.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 10 – Campo de deformações do dispositivo de ancoragem modificado.



Fonte: Autoria Própria.

4 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou um estudo técnico de modificação estrutural de um dispositivo de ancoragem originalmente projetado para suportar cargas de até 300 kg. Em função das novas demandas operacionais relacionadas ao controle do acúmulo de mexilhões-dourados, foi necessário ampliar a capacidade de carga do equipamento para 1000 kg, garantindo segurança estrutural e adequação às condições reais de operação.

A análise do dispositivo original, conduzida por meio de simulação numérica utilizando o método dos elementos finitos (FEA) no software ANSYS®, evidenciou pontos críticos de tensão e deformações excessivas, indicando a necessidade de reforço. A substituição da mão francesa tubular por uma viga perfil I, a redistribuição da carga entre dois olhais, o reforço inferior com novas vigas e a adição de uma viga perfil T na parte superior foram medidas fundamentais para aumentar a rigidez e distribuir os esforços de forma mais eficiente.

As simulações demonstraram que a tensão máxima de 218,12 MPa e a deformação total de 3,1656 mm estão dentro dos limites admissíveis para os materiais utilizados, confirmando a viabilidade da nova configuração. As regiões mais críticas se concentraram nas proximidades das soldas, mas com margem de segurança suficiente devido à maior resistência do material do cordão de solda em relação ao aço base.

O dispositivo modificado mostrou-se plenamente capaz de atender às exigências operacionais, especialmente nas atividades de instalação e manutenção de barreiras de contenção voltadas ao controle biológico. Sua aplicação prática contribui diretamente para a continuidade e segurança das operações, reduzindo a necessidade de manutenções frequentes e o risco de falhas mecânicas durante o içamento de componentes pesados.

Além disso, foram apresentadas recomendações técnicas para a fabricação e montagem do dispositivo, destacando a importância de procedimentos de soldagem qualificados, seleção adequada de materiais e proteção anticorrosiva. Conclui-se que as modificações estruturais propostas são tecnicamente viáveis, seguras e efetivas, com grande potencial de aplicação em outras estruturas submetidas a condições operacionais similares.

REFERÊNCIAS

BATHE, K.-J. **Finite Element Procedures**. 2 ed. New Jersey: Prentice Hall, 2006.

BERTENE, Luciano. **Propriedades do aço ASTM A36, elasticidade, resistência ao escoamento, densidade do material, Dureza e equivalência**. Compraco, 02 de fevereiro de 2024. Disponível em: [<https://compraco.com.br/blogs/especificacoes-do-aco/propriedades-do-aco-astm-a36-modulo-de-elasticidade-resistencia-ao-escoamento-densidade-do-material-dureza-e-equivalente>]. Acesso em 03 de Abril de 2025.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley: Projeto de engenharia mecânica**. 10 ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2019.

SANTOS, C. P.; DARRIGRAN, G. **O mexilhão dourado na América do Sul: biologia, dispersão, impacto, prevenção e controle**. Porto Alegre: Redes Editora, 2009.

SANTOS, F. S. et al. **Segurança em operações de içamento de cargas: critérios estruturais e metodológicos**. Revista Brasileira de Segurança Operacional, São Paulo, v. 12, n. 3, p. 45-58, 2018.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. **O Método dos Elementos Finitos**. 6 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.