

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

CARLA TATA COSTA BILLS

INFLUÊNCIA DA VIBRAÇÃO DURANTE O TRATAMENTO DA ÁGUA DE LASTRO  
POR FILTRAGEM

Joinville

2025

Bills, Carla Tata Costa

INFLUÊNCIA DA VIBRAÇÃO DURANTE O TRATAMENTO DA ÁGUA DE  
LASTRO POR FILTRAGEM / Carla Tata Costa Bills ;  
orientador, Sérgio Junichi Idehara, 2025.

70 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville,  
Graduação em Engenharia Naval, Joinville, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia Naval. 2. Filtro. 3. Água de lastro. 4.  
Vibrações. I. Idehara, Sérgio Junichi. II. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Naval.  
III. Título.

CARLA TATA COSTA BILLS

INFLUÊNCIA DA VIBRAÇÃO DURANTE O TRATAMENTO DA ÁGUA DE LASTRO  
POR FILTRAGEM

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Sérgio Junichi Idehara

Joinville

2025

CARLA TATA COSTA BILLS

INFLUÊNCIA DA VIBRAÇÃO DURANTE O TRATAMENTO DA ÁGUA DE LASTRO  
POR FILTRAGEM

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 25 de novembro de 2025

**Banca Examinadora:**

---

Dr. Sérgio Junichi Idehara  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Dr. André Luis Condino Fugarra  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Dr. Newton Narciso Pereira  
Universidade Federal Fluminense

Dedico este trabalho à minha família, pelo apoio incondicional no meu percurso acadêmico, meu orientador pela inspiração, auxílio e dedicação nesse projeto, aos meus bons e verdadeiros amigos que sofreram e se alegraram comigo nessa jornada. E a minha paixão por conhecimento que me impulsionou até aqui.

## **AGRADECIMENTOS**

Concluir este trabalho representa mais do que encerrar um ciclo acadêmico; significa reconhecer a importância de cada pessoa que fez parte dessa trajetória, pois esse trabalho não é reflexo apenas do meu esforço, mas também do apoio, carinho e presença de todos vocês.

Assim, primeiro, agradeço à minha família, especialmente ao meu avô Renan, ao meu pai Marcelo e ao meu irmão Gabriel, que estiveram comigo em tantos momentos dessa jornada. Mas, acima de tudo, agradeço à minha mãe, Roberta, minha fonte inesgotável de amor, força e motivação. Vocês são a base de tudo o que me tornei.

Ao meu orientador, Sergio Idehara, deixo minha mais sincera gratidão. Sua confiança no meu potencial foi essencial, não apenas na realização deste trabalho, mas em diversas etapas da minha vida acadêmica.

À coordenadora do curso, Viviane Soethe, agradeço pelo suporte e pela direção que me permitiram chegar até aqui, e realizar o sonho de me formar.

Aos meus amigos, tanto os que me incentivaram a trilhar esse caminho, quanto aos que me encontraram no meio dele, obrigada por cada conversa, cada risada e por cada resiliência que vivemos juntos. Em vocês, encontro uma segunda família.

É por isso que dedico este momento a todos vocês.

Obrigada por fazerem parte da minha história.

## RESUMO

A preocupação com a introdução de espécies invasoras e exóticas no ecossistema de desague de água de lastro é constante, uma vez que isso afeta aspectos econômicos, geopolíticos e de segurança. Para mitigar os impactos dessa ameaça, diversos mecanismos foram desenvolvidos, incluindo a filtração por membrana. A qualidade desses controles é avaliada e estudada constantemente pelas áreas responsáveis, pois não se tem um mecanismo certo para evitar a contaminação pela água de lastro. Um dos parâmetros de projeto da filtração é a vibração mecânica induzida pelo equipamento em funcionamento, já que a vibração pode melhorar ou piorar a qualidade dessa filtração. Neste contexto, foi modelado um filtro de quatro camadas, cujo material é o aço inox 254 SMO, no SolidWorks e analisado no Ansys sua vibração livre e sua resposta em regime permanente forçado, cujo força aplicada foi de 336 kN, para simular a bomba em 0,06 Mpa, para entender como essas vibrações influenciam a abertura dos furos e poros das camadas filtrantes. As análises modais das camadas 1 e 3 indicaram frequências naturais não amortecidas variando entre 75 e 118 Hz para a camada externa e 90 e 162 Hz para a camada interna, já a resposta em regime permanente forçado, que se utiliza uma faixa em até 200 Hz, indicou que, que as vibrações expandem o tamanho dos furos e poros durante a operação: na camada 1 houve um crescimento de 60% em relação à abertura inicial de 3 mm, e na camada 3, responsável pela microfiltração, esse aumento chegou a 76%. Indicando a potencialidade da diminuição na efetividade do filtro durante o processo.

**Palavras-chave:** água de lastro; filtração de membrana; análise modal

## **ABSTRACT**

The concern with the introduction of invasive and exotic species into the ballast water discharge ecosystem is constant, since this affects economic, geopolitical, and safety aspects. To mitigate the impacts of this threat, several mechanisms have been developed, including membrane filtration. The quality of these controls is constantly evaluated and studied by the responsible areas, since there is no certain mechanism to avoid contamination by ballast water. One of the design parameters of filtration is the mechanical vibration induced by the equipment in operation, since vibration can either improve or worsen the quality of this filtration. In this context, a four-layer filter, made of 254 SMO stainless steel, was modeled in SolidWorks and its free vibration and forced steady-state response were analyzed in Ansys, with an applied force of 336 kN to simulate the pump at 0,06 Mpa, in order to understand how these vibrations influence the opening of the holes and pores of the filtering layers. The modal analyses of layers 1 and 3 indicated the frequencies ranging between 75 and 118 Hz for the outer layer and 90 and 162 Hz for the inner layer, while the forced steady-state response, using a range up to 200 Hz, indicated that the vibrations expand the size of the holes and pores during operation: in layer 1 there was a 60% increase relative to the initial 3 mm opening, and in layer 3, responsible for microfiltration, this increase reached 76%. This confirms the reduction of filter effectiveness during the process.

**Keywords:** ballast; membrane filtration; modal analysis

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema básico de captação de água de lastro. ....	13
Figura 2 - Sistema de lastramento.....	18
Figura 3-Tubulação com Mexilhões Dourados .....	19
Figura 4 - Sequência análise modal .....	23
Figura 5 - Análise modal de uma peça pós aplicação de MEF.....	26
Figura 6 - Fluxograma da metodologia .....	27
Figura 7 - Filtro para água de lastro FiltreSafe .....	28
Figura 8 - Especificações das camadas do filtro .....	29
Figura 9 - Criação do aço 254 SMO no Solid. ....	30
Figura 10 - Visão superior Filtro montado.....	31
Figura 11 – Estabilização de malha Camada 1 e 3 .....	34
Figura 12 – Região de aplicação da força na superfície interna do filtro. ....	36
Figura 13 - Método de cálculo da taxa de deflexão .....	37
Figura 14 - Von Mises Camada 1 .....	39
Figura 15 - Von Mises Camada 3 .....	40
Figura 16 - Visão frontal filtro completo .....	41
Figura 17 - Camada 1 .....	42
Figura 18 - Camada 2.....	43
Figura 19 – Camada 3 .....	44
Figura 20 - Malhas.....	45
Figura 21 – Análise modal Camada 1.....	55
Figura 22 - Análise modal Camada 3 .....	56
Figura 23 – Análise regime permanente forçado Camada 1 .....	58
Figura 24 - Análise regime permanente forçado Camada 3 .....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados para estabilidade de malha Camada 1 e 3 pela primeira frequência natural.....	33
Tabela 2 – Deflexão Camada 1 pós vibrações .....	37
Tabela 3 - Deflexão Camada 3.....	38
Tabela 4 – Tempo de processamento na Camada 1.....	46
Tabela 5 - Tempo de processamento na Camada 3.....	46
Tabela 6 - 8 Modos de vibração Camada 1.....	49
Tabela 7 - 8 Modos de vibração Camada 3.....	53
Tabela 8 - Dados Comparativos .....	61
Tabela 9 - Taxa deflexão Camada 1.....	61
Tabela 10 - Taxa deflexão Camada 3.....	61
Tabela 11 - Dados Camada 1 e 3.....	63

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BWM	Conversão Internacional para o Controle e Gerenciamento da Água de Lastro e Sedimentos dos Navios
DWT	Deadweight (Peso morto)
IBAMA	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IMO	Organização Marítima Internacional
LWT	Lightweight (Peso leve)
MEF	Método dos Elementos Finitos
NORMAM-20	Norma da Autoridade Marítima
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
rpm	Rotação por minuto
Hz	Hertz
$\zeta$	Razão de amortecimento

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1. OBJETIVOS .....	16
1.1.1. Objetivo Geral .....	16
1.1.2. Objetivos Específicos .....	16
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO</b> .....	<b>17</b>
2.1. ÁGUA DE LASTRO .....	17
2.1.1. Sistema da água de lastro .....	17
2.1.2. Bioinvasão da água de lastro .....	18
2.1.3. Tipos de limpeza da água de lastro .....	20
2.2. VIBRAÇÃO .....	21
2.2.1. Análise modal .....	22
2.2.1. Resposta em regime permanente forçado .....	24
2.2.1. Influências vibracionais no tratamento da água de lastro .....	24
2.3. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS .....	25
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>27</b>
3.1. MODELAGEM .....	27
3.1.1. Solidworks .....	28
3.2. ANSYS .....	32
3.3.1. Discretização do modelo .....	32
3.3.2. Análises .....	35
3.4. PROCEDIMENTO DO CÁLCULO DA TAXA DE DEFLEXÃO .....	37
3.4.1. Von Mises .....	38
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>41</b>
4.1. MODELAGEM DO FILTRO .....	41
4.2. APLICAÇÃO DA FERRAMENTA ANSYS .....	45
4.2.1. Representação gráfica da malha .....	45
4.2.1. Análise modal .....	47
4.2.2. Amplitude da forma modal .....	55
4.2.3. Resposta Regime Permanente Forçado .....	57
4.2.4. Von Mises .....	60
4.3. TAXA DE DEFLEXÃO .....	60
<b>5. IMPACTO DA VIBRAÇÃO NO FILTRO</b> .....	<b>63</b>

<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>64</b>
---------------------------	-----------

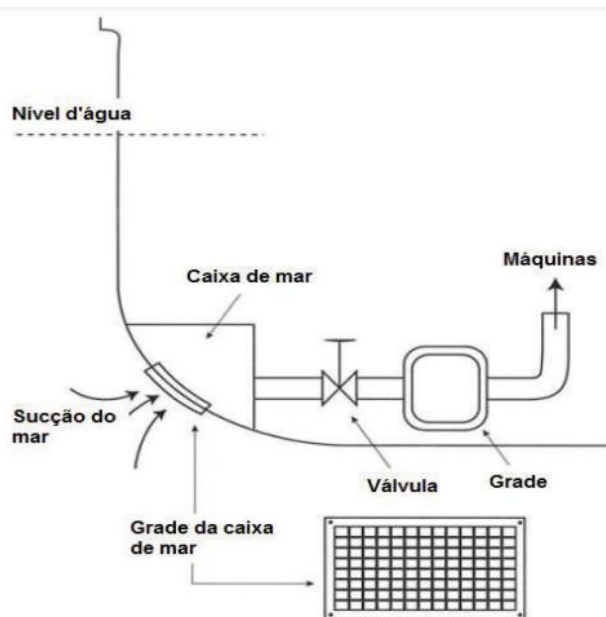
## 1. INTRODUÇÃO

A conquista e descoberta de novas rotas marítimas desempenhou mudanças no aprimoramento contínuo das embarcações (Beirão, 2014), importância que perdura até os dias de hoje. Uma das preocupações contemporâneas que evidenciam essa influência é a gestão da água de lastro (Güney, 2022), cujo desenvolvimento estabelece um equilíbrio sustentável entre comércio e vida marinha.

Destacando desse processo a limpeza pelo mecanismo de filtragem, especificamente, do filtro de membrana, percebe-se a ocorrência de vibrações tanto internas quanto externas que estão intrinsecamente ligadas à qualidade ao desempenho, como exposto por Takata e Tanida (2018). Portanto, abordar e analisar essa correlação, não apenas do ponto de vista estrutural e mecânico, como também do ponto de vista ambiental e da preservação dos ecossistemas marinhos tem importância, que não é aprofundada na literatura da área.

A água de lastro, segundo a Organização Água de Lastro Brasil (Marinha do Brasil, 2021), é o preenchimento, com água marítima ou fluvial, dos tanques de lastro das embarcações, cujo sistema é exemplificado na Figura 1.

Figura 1 – Sistema básico de captação de água de lastro.



Fonte: Pereira (2018, p. 39).

A função da água de lastro é fornecer o lastramento da embarcação ajustando a quantidade de água para aumentar ou diminuir o calado, garantindo a segurança das operações de navegação ou cabotagem. Logo, percebe-se que sempre haverá algum percentual de água de lastro durante a carga, trajeto e descarga do navio, pois esse mecanismo serve para garantir a estabilidade transversal e longitudinal da embarcação (Aldrovandi, 2015).

Esse contrapeso estratégico do Lightweight (LWT), que se refere ao peso da própria embarcação e é um dos pesos do Deadweight (DWT) do navio, que engloba a capacidade máxima de carga, permitindo operacionalidade e atuando diretamente na propulsão da embarcação, no manuseio das cargas e impedindo emborcamentos e falhas estruturais.

De acordo com a Marinha do Brasil (2021), o lastrear de uma embarcação ser atualmente de água deve-se à troca do lastramento sólido – pedras, madeiras e areia - para o uso de água dos mares, rios e oceanos. Todavia, essa troca culminou em desafios ambientais, haja vista que uma adversidade de espécies é puxada no lastramento e o lastrear e o desague por muitos anos realizou-se sem fiscalização, por conseguinte, levando a desequilíbrios ecossistêmicos marinhos, importunações socioeconômicas e desastres ecológicos.

Diante desse problema mundial de bioinvasão (espécies que sobrevivem a locais diferentes de sua origem) (Medeiros, 2004) pela água lastrada, a Organização Marítima Internacional (IMO) criou em 2004 a Convenção Internacional para o Controle e Gerenciamento da Água de Lastro e Sedimentos dos Navios (BWM), que administra, fiscaliza e minimiza os danos colaterais desse dispositivo, de acordo com as informações obtidas com a Marinha do Brasil (2021).

No Brasil, o instrumento que permite a fiscalização e instalação, uso e manutenção dos tratamentos de água de lastro é a Norma da Autoridade Marítima (NORMAM-20, 2022). A Normam-20 (2022) orienta e padroniza os tratamentos da água de lastro, objetivando eliminar uma ampla biota presente no meio lastrado sem comprometer a qualidade da água, essa limpeza varia de acordo com o tipo de embarcação, rota, condições climáticas, posição geográfica e legislação internacional e local (Pereira, 2018). Por essa razão, há dois grupos de limpeza, o abordo, deixando o navio autossuficiente, e o portuário, que são subdivididos em sistemas mecânicos (remoção física do organismo) e químicos (uso de agentes biocidas) (Pereira, 2018).

O principal tratamento mecânico é a filtração, cuja função é remover as partículas sólidas suspensas e qualquer ser vivo existente no meio, até certo nível micro. Dentro da filtração tem-se a do tipo de membrana, cuja finalidade é ser uma barreira seletiva e permeável que retém pesos moleculares maiores que o diâmetro de seus poros, realizando, em geral, uma nanofiltração da água de lastro (Gomes, 2017).

Segundo Pereira (2012), a eficiência da filtração é relativamente baixa, em torno de 70%, portanto, é comum que seja complementada com outros métodos para melhorar o grau de pureza da água descartada. Embora essa porcentagem represente um alto nível de remoção da contaminação bruta e certa parte da contaminação micro, ainda resta o equivalente a um terço de contaminação, número que não é assegurado devido a fatores que atuam durante o processo de filtração, inclusive as vibrações mecânicas induzidas no filtro (Pereira, 2012).

As vibrações em embarcações podem ser induzidas pelas máquinas, equipamentos, onda, vento e efeitos hidrodinâmicos (Moliner, 2014), todas podem alterar a qualidade de purificação da filtração e, mesmo atuando externamente ao sistema, ainda introduzem, indiretamente, excitações que modificam o resultado final do processo de filtração. É necessário, também, se preocupar com as forças que atuam diretamente no filtro de membrana, como vazão, velocidade e sucção da água lastrada (LaVelle, 2014).

No processo de filtração, as vibrações podem acarretar significativa diminuição na capacidade de eliminar partículas e contaminantes, comprometendo a qualidade da água tratada e ampliando o risco de introdução de espécies invasoras. Tais vibrações podem causar danos substanciais à estrutura e ao próprio filtro, como fadiga estrutural, vazamentos ou falhas de equipamento, além da redução de vida útil do sistema (Takada; Tanida, 2018).

Compreendendo-se a importância desse tema, modelou-se no solidworks, e aplicou-se o método de elementos finitos via o programa Ansys, um sistema de filtro de membrana em condições de filtração de água de lastro, cujas informações técnicas levantadas foram sobre condições operacionais de diferentes vibrações visando avaliar e quantificar a redução do desempenho do filtro.

## 1.1. OBJETIVOS

Para avaliar as condições de trabalho durante a filtragem da água de lastro, sobre vibrações, harmônicas e contínuas, externas, e sua eficiência, propõe-se os seguintes objetivos.

### 1.1.1. Objetivo Geral

Determinar se há influências vibracionais durante o tratamento da água de lastro por filtragem e confirmar a teoria de que essas vibrações são prejudiciais ao processo. A ideia é verificar se elas aumentam o tamanho dos orifícios do filtro, permitindo a passagem de impurezas cujos tamanhos o filtro deveria bloquear inicialmente.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Modelar em CAD o filtro escolhido;
- Desenvolver um modelo em elementos finitos para a análise modal computacional do sistema de filtragem;
- Simular condições de operação do filtro submetido às vibrações operacionais;
- Avaliar como a resposta vibratória impacta no desempenho da filtragem.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO**

Para um transporte marítimo seguro se utiliza a água de lastro, porém, seu uso indiscriminado pode causar danos ambientais e no intuito de diminuir a contaminação do deslastro, criaram-se diferentes maneiras de limpá-lo. Todavia, fatores como vibrações podem por diminuir sua efetividade, logo, o foco é realizar simulações computacionais na presença de vibrações e verificar se essa hipótese se encontra correta, uma vez que há poucos estudos sobre essa análise.

Para compreender essa problemática e as possíveis soluções, se apresenta neste capítulo o conceito do sistema de abastecimento e encerramento da água de lastro, da origem e proporção da bioinvasão náutica e da limpeza e manutenção do ciclo de água de lastro.

### **2.1. ÁGUA DE LASTRO**

De acordo com a Organização Marítima Internacional (IMO, 2021), o lastrear de uma embarcação é o bombear água para o navio com o intuito de realizar operações seguras, pois, essa prática de carregar a embarcação, reduz o estresse do casco, estabiliza o trim, melhora a propulsão e manobrabilidade e gera contrapeso de carga e descarga.

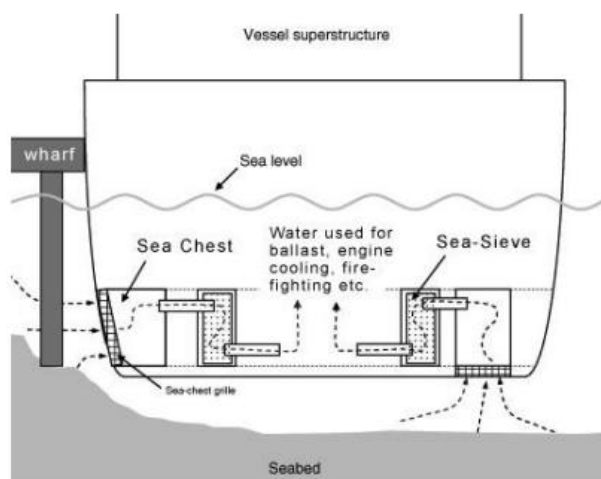
O sistema de abastecimento e descarga é simples e integrado a quase todo o navio, e conseqüentemente, o sistema de lastro não é isolado. Dessa maneira, é perifericamente atingido pelas vibrações do navio e diretamente pelas frequências de excitação da tubulação e dos mecanismos lastrantes e filtrosos (Pereira, 2012).

#### **2.1.1. Sistema da água de lastro**

De acordo com Pereira (2012), o sistema da água de lastro é formado por numerosas tubulações, bombas e válvulas ligadas aos tanques de lastro do navio. Os sistemas podem ser individuais ou interligados. O lastro é captado pelas caixas de mar conectadas com a bomba e interligadas por uma tubulação *sea bay* (Preuss, 2013).

O sistema de alimentação do lastro poderia ser por gravidade, como apresentado na Figura 2, tendo em vista que o sistema de lastro se encontra em duas partes do navio, na praça de máquinas e no duplo fundo, sendo ambos localizados abaixo da linha d'água da embarcação. Contudo, o nível da água aumentando dentro dos tanques, somado ao aumento de perda de carga devido ao comprimento da tubulação, faz o tempo dessa operação ser maior do que quando se utilizam bombas de sucção, de acordo com a vazão e pressão necessárias à embarcação (Preuss, 2013).

Figura 2 - Sistema de lastramento



Fonte: Preuss (2013, p. 27).

Esse mecanismo acaba por sugar não apenas a água do mar, mas também os organismos ao redor, gerando o que será a contaminação do despejo, podendo esse agravar a bioinvasão por água de lastro.

### 2.1.2. Bioinvasão da água de lastro

Atualmente, uma das quatro maiores ameaças aos oceanos no mundo é a dispersão de espécies marinhas exóticas, em diferentes ecossistemas, através da água de lastro. A água de lastro, embora fundamental, apresenta sérios problemas durante sua prática, pois o meio lastrado pode estar contaminado por bactérias, micróbios, pequenos invertebrados, ovos, cistos, larvas e algumas espécies de peixes, anfíbios e outros animais pequenos (Ciesla, 2007).

Em algumas situações, esses invasores conseguem sobreviver à viagem e se instalar no novo habitat, se reproduzem e podem superar as espécies nativas. Esse fenômeno é denominado bioinvasão e tem impactos significativos tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico e de saúde pública (Zanella, 2015).

A bioinvasão representa um desafio significativo devido à sua natureza. Quando se fala em poluição marinha sabe-se que há medidas mitigadoras possíveis de serem aplicadas para minimizar ou erradicar o problema, todavia, na bioinvasão a biota não se regenera, tornando assim esse fenômeno irreversível e impossibilitando o controle do avanço e prejuízo (Zanella, 2015).

O exemplo mais conhecido brasileiro é a bioinvasão dos mexilhões dourados, esse molusco é originário do sudeste da Ásia, e de acordo com Barbosa e Mello (2009), nos últimos 30 anos, através da contaminação da água de lastro, se expandiram para Hong kong, Japão, Taiwan e países da América do Sul.

Esse animal se reproduz rapidamente e tem alta capacidade de incrustação e dispersão (Forte, 2019). De acordo com Alex Nuñez, professor da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), “[...] esse animal incrusta sobre si, formando uma massa cada vez maior, de modo que mesmo tubulações muito grandes podem ser completamente fechadas.” (34. 2018). Isso causa um desastre econômico para, pelo menos, 50 usinas hidroelétricas brasileiras, que anualmente precisam parar a operação para limpar as tubulações, como mostrado na Figura 3.

Figura 3-Tubulação com Mexilhões Dourados



Fonte: Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama, 2018).

Ademais, esses mexilhões dourados afetam o ecossistema em que se infiltraram, pois são consumidores de microrganismos que serviam de alimentos para peixes e outras espécies nativas, causando inúmeros desequilíbrios na biota brasileira.

### **2.1.3. Tipos de limpeza da água de lastro**

A liberação comercial de qualquer alternativa de tratamento de água de lastro passa pelos trâmites impostos pela Organização Marítima Internacional (IMO) (Gomes, 2017), que se baseia em uma sequência padronizada e simples de captura, bombeio, armazenamento, tratamento e finalmente descarte da água de lastro, sendo o tratamento o foco principal de inspeção (Pereira, 2012).

As técnicas para o tratamento de água de lastro podem ser mecânicas ou químicas, e no geral são combinadas para conseguir, sempre, uma eficiência média de 85% de eliminação dos agentes infiltrantes (Pereira, 2012).

Na limpeza **química** são utilizados produtos para eliminar os organismos. Normalmente é combinado com outros métodos de controle, pois a IMO estipulou um limite de uso desse mecanismo para evitar uma contaminação química na água descartada.

Na **cloração** se utiliza um agente biocida, que é o mais utilizado em tratamentos de água. Tem fácil aplicação, baixo custo, ao mesmo que, trata grandes volumes de água (Araújo, 2012). Esse produto químico desinfeta a água de lastro, porém, apesar de ser muito diluído, pode poluir o local de desagüe.

Na utilização do **ozônio** não forma subprodutos tóxicos, mesmo sendo uma substância que elimina bactérias e vírus (Araújo, 2012), porém, isso só ocorre em água doce, em água salgada, produz subprodutos altamente corrosivos, todavia, ainda é um método eficiente de eliminação de microrganismos.

O tipo de limpeza **mecânica** visa eliminar os organismos retirando-os do meio, sem necessariamente matá-los, e sem gerar contaminantes finais na ação.

O **aquecimento** da água de lastro, dentro dos tanques, é uma maneira efetiva de não contaminar o meio ambiente, apesar de pouco eficiente, visto que, de acordo com Rigby (1994), esse método pode resultar em impactos no navio e não se sabe o exato nível de aquecimento preciso para matar todos os organismos lastrados.

Na técnica **Ultravioleta** instalam-se lâmpadas de raios UV-C, e assim inativam os microrganismos presentes nos tanques de lastro (Gomes, 2017). Esses raios possuem alta energia e são capazes de penetrar as células causando danos ao DNA e RNA, impedindo sua replicação. É difícil encontrar um mecanismo de filtragem de água de lastro que não tenha no sistema essa técnica.

A técnica de **filtragem** da água de lastro tem um princípio simples, consiste basicamente em fazer a passagem do fluxo de água por um elemento filtrante, cuja superfície é dotada de aberturas pré-estabelecidas, que funcionam como uma barreira física, uma seleção natural em que partículas e organismos maiores do que o tamanho dessas aberturas ficam retidos na superfície do filtro, enquanto a água e as partículas menores passam adiante.

Durante as operações de lastro e deslastro, o sistema é submetido a vazões muito altas e a uma grande quantidade de sedimentos em suspensão, o que exige que o filtro seja resistente e capaz de manter um desempenho estável mesmo sob condições adversas, desse modo, muitos filtros modernos possuem sistemas de autolimpeza, como retrolavagem ou raspagem mecânica, que removem o acúmulo de partículas sem interromper a operação.

A diversificação de mecanismos limpantes influencia a eficiência da purificação da água de lastro, visto que à variedades de influências que podem impactar negativamente o processo. Destaca-se em particular, a influência vibracional, cuja atuação direta e indireta exerce certos impactos na eficácia do processo.

## 2.2. VIBRAÇÃO

Vibração é o movimento oscilatório de um sistema mecânico em torno de sua posição de equilíbrio, seu resultado surge da soma entre elementos de inércia, elasticidade e dissipação. Durante esse movimento, diferentes pontos da estrutura apresentam deslocamentos, velocidades e acelerações que variam no tempo de forma periódica ou quase periódica. Do ponto de vista físicos, a massa armazena energia cinética, enquanto a mola armazena energia potencial, e os mecanismos de amortecimento atuam dissipando parte dessa energia ao longo do tempo, subsequentemente reduzindo a amplitude das oscilações.

Em geral, esse sistema pode ser: livre, forçado, não amortecido, amortecido, linear, não linear determinística ou aleatória, e é composto de um meio para armazenar energia potencial - mola -, um meio para armazenar energia cinética - massa - e um meio de perda gradual de energia - amortecedor -, como na Equação 1 (RAO, 2008).

$$[M].\{\ddot{X}\} + [C].\{\dot{X}\} + [K].\{X\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

- $[M]$  Matriz massa do sistema;
- $[C]$  Matriz amortecimento;
- $[K]$  Matriz de rigidez;
- $\{X\}$  Vetor de deslocamento da massa no tempo;
- $\{\dot{X}\}$  Vetor da velocidade da massa;
- $\{\ddot{X}\}$  Vetor de aceleração da massa;
- $\{F(t)\}$  Vetor da força externa aplicada ao sistema.

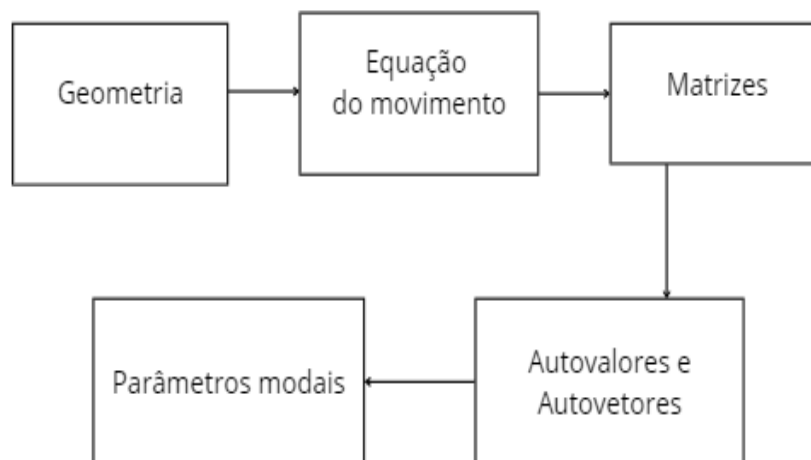
Diante disso, para entender melhor como essas vibrações acontecem e afetam a estruturas, é importante analisar o comportamento dinâmico do sistema. Uma forma de fazer isso é por meio da análise modal, que ajuda a identificar como as estruturas vibram e quais são suas frequências naturais.

### **2.2.1. Análise modal**

A análise modal numérica está relacionada com o estudo dos parâmetros de frequências naturais e modos de vibrações de estruturas, que dependem da distribuição da massa (inércia), da rigidez, condição de contorno do sistema e dissipação de energia, com base no modelo de elementos finitos (Macedo, 2020). Em outras palavras, analisa a quantidade de movimento dos sistemas elásticos, cuja configuração varia de acordo com as coordenadas dos graus de liberdade.

As frequências e os modos de vibrações obtidos são vinculados com as respostas dinâmicas do sistema, sendo a sequência da análise modal ilustrada conforme a Figura 4.

Figura 4 - Sequência análise modal



Fonte: Autoral (2023)

Assim, na **geometria** do sistema, identificam-se as dimensões físicas do modelo.

A **equação do movimento**, nos elementos do modelo, é derivada das leis do movimento e contabiliza todas as forças e momentos atuantes no sistema. É obtida a partir da discretização da geometria do modelo CAD e tem o formato mostrado na Equação 1. As **matrizes** são as representações das características do sistema é obtido na equação matricial.

Os **autovalores e autovetores** são encontrados pelas matrizes de massa, rigidez e amortecimento das equações de movimento. O primeiro, representa as frequências naturais e fatores de amortecimento e o segundo os modos de vibrações associadas às frequências naturais.

E com isso, obtém-se os **parâmetros modais**, ou seja, o padrão de vibração do sistema dinâmico.

Nas embarcações esse tema tem alta complexidade, pois sua indução pode ser originada de máquinas, ondas, ventos e efeitos hidrodinâmicos (Moliner, 2014). Por isso, além de entender as vibrações naturais da estrutura, também é importante avaliar como o sistema reage a forças que variam ao longo do tempo, que conhecemos como a análise harmônica, que permite estudar a resposta da estrutura frente a essas excitações periódicas.

### **2.2.1. Resposta em regime permanente forçado**

A análise da resposta em regime permanente forçado é uma técnica usada para medir a intensidade de resposta de cada modo de vibração de uma estrutura sob a ação de cargas que variam harmonicamente com o tempo. Esse tipo de análise permite observar a amplitude de vibração em diferentes frequências, o que é importante para identificar possíveis ressonâncias, e diferente da análise modal, que apenas mostra os modos de vibração naturais, a análise regime permanente forçado leva em conta a força aplicada e calcula a resposta quando o sistema já está em regime permanente (Silva, 2022).

A exemplo de, as vibrações excessivas em tubulações são uma das maiores causas de falha por fadiga e vazamentos (Pacheco, 2022). Essa vibração induzida por fluido é comumente originada de pulsação excessiva, ressonância mecânica e suporte ou estrutura inadequada, e não rara de acontecer, pois, sua pulsação, pressão e fluxo acabam excitando as frequências naturais do sistema de tubulação (Knight, 2014).

Da mesma forma, o mecanismo da água de lastro sofre influências das oscilações estruturais da embarcação, e ainda se tem variações operacionais pelo acúmulo de microrganismos que obstruem o filtro, ademais a própria engenharia operacional do lastro, como a pulsação e a vazão da água (LaVelle, 2014).

### **2.2.1. Influências vibracionais no tratamento da água de lastro**

Atualmente não há muitos estudos relacionados com as influências vibracionais durante o tratamento de água de lastro. Com tudo, há indícios que as vibrações causadas por sucção, pressão e a capacidade de fluxo do fluido causam o aumento da ineficiência da filtração (LaVelle, 2014).

Ou seja, as vibrações presentes nos sistemas de tratamento de água de lastro são geradas principalmente pelo funcionamento das bombas, pelas variações de pressão no interior das tubulações e pelo próprio escoamento do fluido, e que esses efeitos são intensificados também pelas condições ambientais e pela operação de equipamentos e maquinário a bordo e que apesar dessa grande potencial há explorar, ainda existem poucos estudos dessa relação entre vibrações e eficiência do processo de filtração.

Essas excitações podem modificar o regime de escoamento, alteração temporária da distribuição de partículas na superfície filtrante e até microexpansões no elemento filtrante, afetando o desempenho da barreira física. Na prática, esse fenômeno resulta no aumento da passagem de partículas e organismos que deveriam ser retidos, reduzindo a eficiência do tratamento. Além disso, vibrações persistentes podem acelerar a obstrução desigual do filtro, aumentar o acúmulo de sedimentos em regiões específicas e comprometer a estabilidade da camada filtrante, especialmente quando operando com vazões elevadas e grande volume de sólidos em suspensão

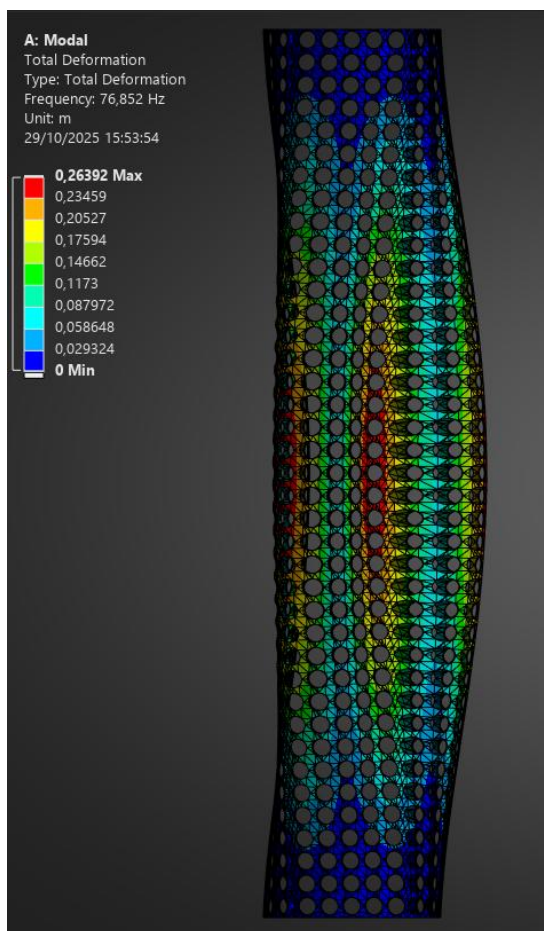
O estudo de LaVelle (2014) constatou a veracidade dessa hipótese, visto que nele evidencia que a existência de vibração durante o processo de filtração aumenta a passagem de substâncias contaminantes no processo de tratamento de água, o que seria análogo ao fato de quanto mais intensa a vibração maior o número de organismos contaminantes novos e organismos não filtrados que seriam encontrados no fluido do lastro.

### 2.3. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

O Método de Elementos Finitos (MEF) propõe que estruturas contínuas, de infinitas variáveis desconhecidas, sejam substituídas por um número limitado de elementos de comportamento definido (Suganthi, 2022). Assim, seu comportamento físico, estrutural e matemático não será resolvido de maneira exata, mas quanto mais refinado a malha mais aproximado da realidade é. Isso se deve que, a precisão dessa ferramenta está vinculada com a quantidade de nós e elementos, tamanho e tipo deles, quanto mais elementos e menor sua dimensão, mais exato os resultados serão (Suganthi, 2022).

A proposta de utilizar o método de elementos finitos é para depois poder realizar simulações numéricas e estudar o comportamento dinâmico do projeto, podendo avaliar, entre possíveis estudos, a influência das vibrações, como na Figura 5 de uma peça engatada em ambas as extremidades e posta para uma análise modal.

Figura 5 - Análise modal de uma peça pós aplicação de MEF

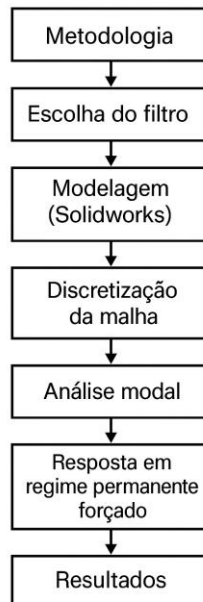


Fonte: Autoral (2025).

### 3. METODOLOGIA

Para determinar as influências vibracionais durante o tratamento da água de lastro por filtragem modelou-se um filtro 3D em CAD no SolidWorks, e, posteriormente, um modelo de elementos finitos para realizar a análise modal e regime permanente forçada da peça via Ansys. Para assim, determinar as possíveis falhas da filtração na presença de vibração como demonstrada na Figura 6.

Figura 6 - Fluxograma da metodologia



Fonte: Autoral (2025).

#### 3.1. MODELAGEM

Essa representação 3D no Computer Aided Design (CAD) foi o meio empregado para modelar a geometria do filtro analisado. Esses programas podem ser utilizados em vários setores de um projeto, pois, auxiliam a criar modelos tridimensionais de peças e estruturas, otimizando o tempo do processo de criação e facilita sua visualização, assistindo a engenharia no dimensionamento das características e funcionalidade da peça.

Os softwares tipo CAD possuem duas principais vertentes 2D, que é mais limitado por seus desenhos serem bidimensionais, e 3D que podem ser parametrizados ou não parametrizados, sendo que esse primeiro oferece os melhores recursos de automatizações (Nogueira, 2020).

Um dos softwares CAD mais conhecidos e utilizados na indústria é o SolidWorks. Ele permite criar modelos 3D, montar conjuntos, gerar desenhos técnicos com cotas e realizar análises simples de engenharia, sendo muito empregado em áreas como mecânica, naval e produtos em geral.

### 3.1.1. Solidworks

O software CAD Solidworks foi o instrumento modelador de estruturas 3D utilizado na criação do filtro que será usado como base de estudo e análise modal.

Com as Informações apresentadas pela empresa FiltreSafe, escolhe-se o filtro Single screen FS-100 H Super turbo (Single Screen Series, 2023,p 04), é visível sua parte externa e interna de acordo com a Figura 7.

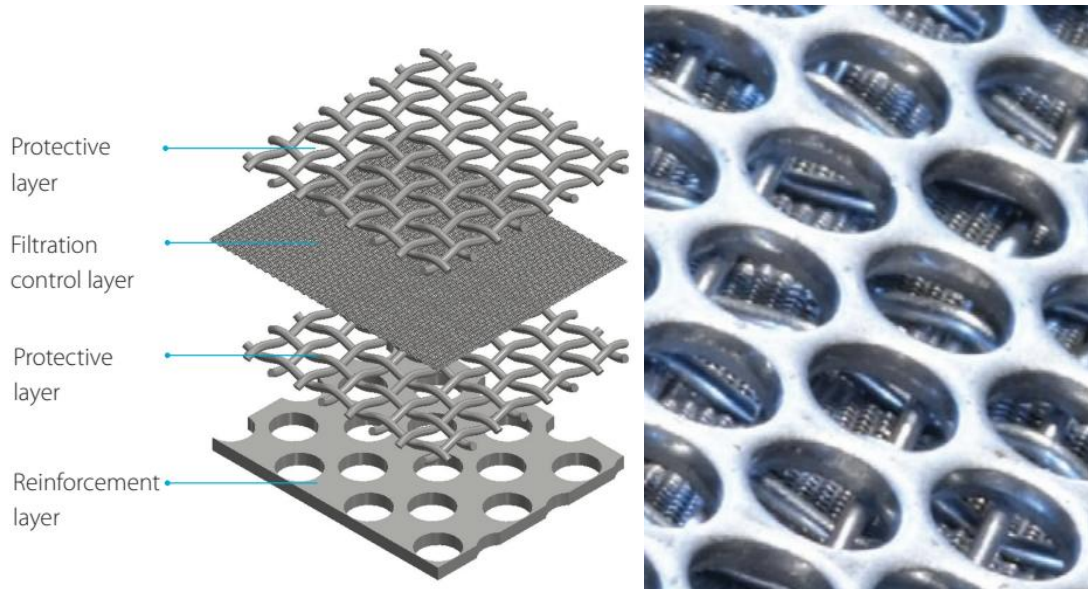
Figura 7 - Filtro para água de lastro FiltreSafe



Fonte: Filtersafe automatic screen filtration (2013)

Esse modelo possui quatro camadas ilustradas na Figura 8.

Figura 8 - Especificações das camadas do filtro



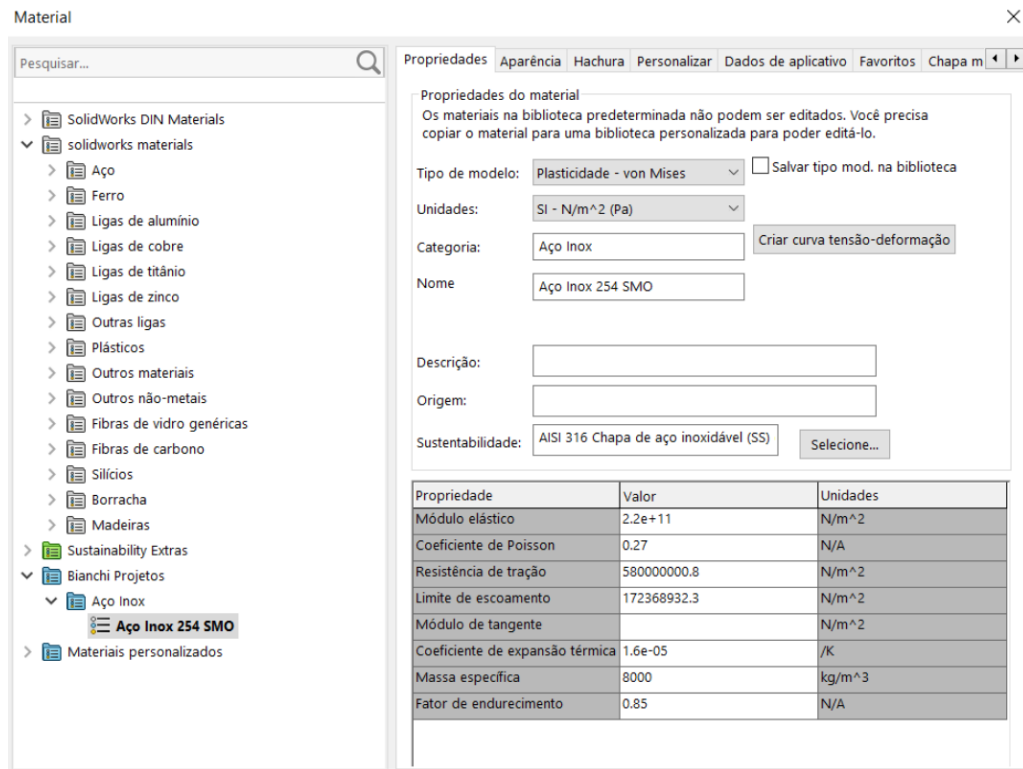
Fonte: Adaptada Filtersafe automatic screen filtration (2013).

Essas malhas têm 3 mm de espessura cada, com uma malha interna que filtra até 10  $\mu\text{m}$ , sendo essa a principal camada de filtração, (Ballast & Marine 2023, p 01), duas telas protetoras com geometria igual, mas o raio do cilindro diferente, para proteção estrutural, e por fim a camada externa, cuja função é suportar a pressão durante o processo (Filters Moss Hydro p 07) e ser a primeira barreira filtrante já contendo as impurezas de maior tamanho, prevenindo o entupimento do filtro.

Opera com uma pressão de até 2,5 Bar, e seu material é de 254 SMO, um aço inoxidável para resistência à corrosão por pite e frestas por água salgada (Single Screen Series, 2023,p 03). Ademais, o material tem uma densidade de 8,0  $\text{g/cm}^3$ , módulo de elasticidade (E) de 220 GPa e um coeficiente de poisson em 0,27 características de uma liga metálica de aço inoxidável.

O cilindro a ser modelado terá as 4 camadas, cada uma com suas respectivas características individuais sendo caracterizadas e aplicadas, umas das quais fora introduzido manualmente durante a modelagem, como apresentado na Figura 9, assim, foi empregado um raio de 300 mm e a altura de 3000 mm no filtro.

Figura 9 - Criação do aço 254 SMO no Solid.



Fonte: Autoral (2025).

Essa representação 3D, possibilitou a criação completa do filtro, Figura 10, e por consequência estudar a peça sobre efeito vibracional e finalizar a pesquisa proposta.

Figura 10 - Visão superior Filtro montado



Fonte: Autoral (2025)

A peça final possui 3 m de altura e 4 camadas:

- Camada 1 – Camada Externa com 300 mm de raio, e furos de 3 mm de diâmetro.
- Camada 2 – Camada Proteção 1 com 295 mm de raio e furos de 3 mm;
- Camada 3 – Camada Interna com 290 mm de raio, com poros de 10  $\mu\text{m}$ .
- Camada 4 – Camada Proteção 2 com 280 mm de raio, como é um espelho da Camada 2 o furo tem o mesmo tamanho de 3 mm.

Essa representação 3D possibilitou posteriormente o estudo do seu comportamento modal, para isso dividiu a estrutura em pequenos elementos, permitindo calcular tensões, deformações e vibrações com precisão, utilizando o software Ansys.

## 3.2. ANSYS

O Ansys é um software de modelagem por elementos finitos que pode ser utilizado nas mais diversas classes de problemas de engenharia (Ansys, 1998). Sua capacidade inclui ferramentas para resolver diferentes tipos de análises estruturais, tais como: estática, modal, harmônica, dinâmica transiente, espectral, flambagem e dinâmica explícita, além de várias modelagens particulares como a mecânica da fratura, compósitos e fadiga, que ajudam a estudar sobre os esforços operacionais que a peça pode sofrer (Ansys, 1998).

Seu uso do programa é simples e intuitivo. Primeiro, é feita a criação ou a importação da geometria a ser estudado. Depois, o programa realiza a discretização, gerando a malha que divide a estrutura em pequenas partes, podendo elas serem tetraédricas, hexaédricas, primas, piramidais ou triangulares e quadrangulares, conforme a complexidade da peça e o nível de precisão desejado. Com a malha pronta, são definidas as propriedades do material, as condições de contorno e os carregamentos que fazem parte do caso analisado. Por fim, configuram-se os parâmetros de solução e o modelo é processado para que o software calcule os resultados.

### 3.3.1. Discretização do modelo

No caso, para conseguir esse equilíbrio, realizou-se uma análise de estabilidade de malha, vale ressaltar que, por motivo de complexidade geométrica o Ansys Student apresentou limitações para gerar as malhas das Camadas de Proteção, o alto número de nós e elementos ultrapassava a capacidade disponível, não conseguindo assim, fornece uma malha adequada para as Camadas 2 e 4, resultando em um estudo apenas nas Camadas 1 e 3.

Apesar disso, a análise permaneceu válida porque as Camadas 1 e a Camada 3 representam adequadamente o comportamento estrutural global da peça que queremos estudar, uma vez que concentram os efeitos de rigidez estrutura e de eficiência de filtragem, respectivamente, os mais relevantes para análise. Assim, o foco nessas camadas permite capturar o fenômeno físico de interesse sem comprometer os resultados.

O estudo da deflexão durante a análise modal de 0,01 m até 0,07 m de discretização de malha, registrando a primeira frequência natural obtida em cada simulação e posteriormente calculado a porcentagem de variação entre elas, até uma, até uma estabilidade como na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados para estabilidade de malha Camada 1 e 3 pela primeira frequência natural.

<b>Malha [m]</b>	<b>Camada 1</b>		<b>Camada 3</b>	
	<b>Freq. Nat. [Hz]</b>	<b>Variação [%]</b>	<b>Freq. Nat. [Hz]</b>	<b>Variação [%]</b>
<b>0,03</b>	75,613	-	90,773	-
<b>0,04</b>	75,729	0,15	103,34	13,84
<b>0,05</b>	73,81	-2,53	117,31	13,52
<b>0,06</b>	74,444	0,86	90,839	-22,56
<b>0,07</b>	75,558	1,50	90,88	0,05
-	-	-0,03	-	4,84

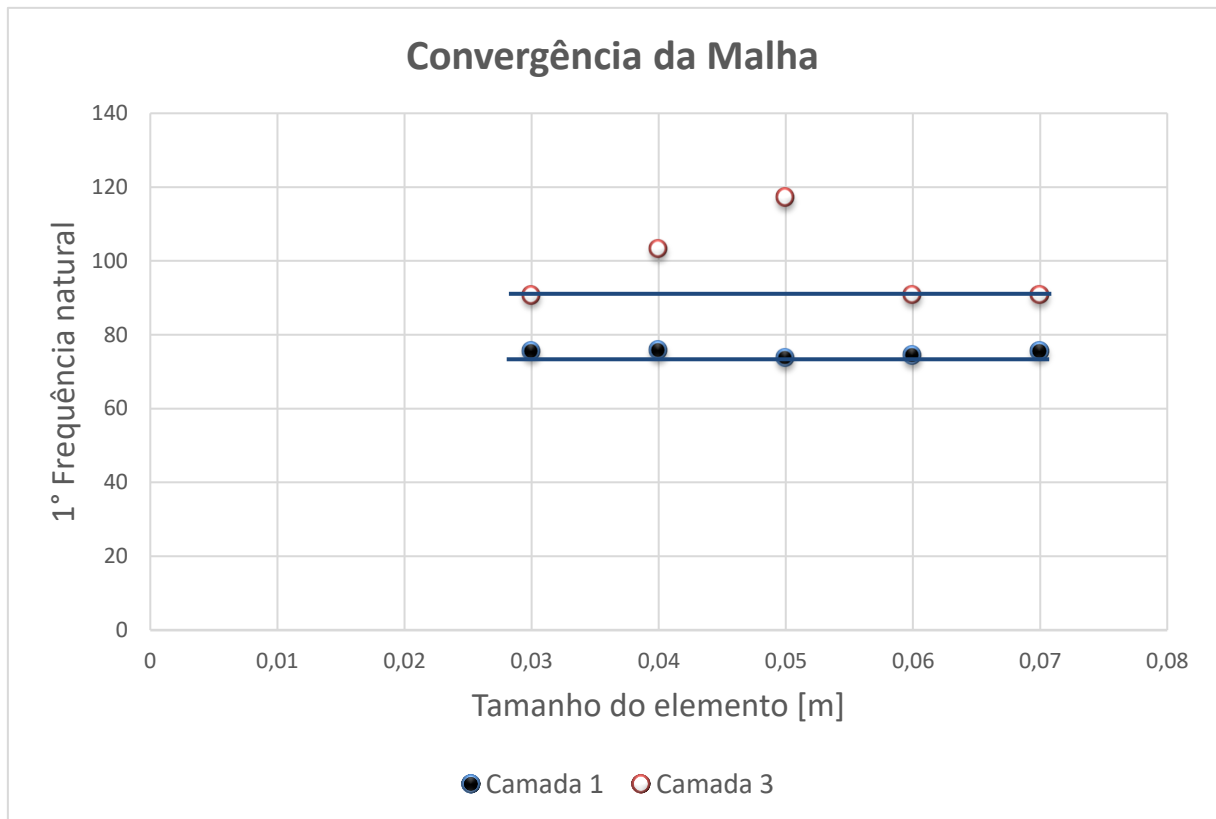
Fonte: Autoral (2025).

A ideia central desse procedimento é que, quando a malha ainda está muito grosseira, a frequência natural muda significativamente conforme o modelo é refinado. Porém, à medida que a discretização melhora, essas diferenças passam a diminuir. A convergência é atingida quando o refinamento adicional praticamente não altera mais o resultado, indicando que a solução se estabilizou.

Foi criado então, um gráfico, Figura 11 que identificou a estabilidade da malha vendo que a diferença entre elas ficou com um percentual muito abaixo, assim, a malha pode ser considerada convergida, pois novos refinamentos não produzem mudanças relevantes na resposta estrutural.

Convém observar que o Ansys não conseguiu estabilizar a malha abaixo de 0,03 m, e assim tais valores não foram introduzidos.

Figura 11 – Estabilização de malha Camada 1 e 3



Fonte: Autoral (2025).

A Camada 1 apresenta comportamento praticamente constante, com valores entre 73 e 76 Hz, independentemente do tamanho do elemento. Isso indica que o modelo dessa camada é pouco sensível ao refinamento e que a malha já se encontra convergida mesmo para elementos relativamente maiores. Por outro lado, a Camada 3 apresenta maior variação nas frequências, mas os resultados se estabilizam, na faixa dos 90 Hz, seguindo o mesmo alinhamento da Camada.

Assim, como ambas as camadas demonstraram convergência dentro da faixa de discretização estudada, prosseguiu-se para o próximo fator decisivo na escolha do tamanho da malha, o tempo do processamento, que é diretamente associado ao custo. Contudo, todas as simulações apresentaram tempos inferiores a dez minutos, resultando em custos muito semelhantes.

Diante disso, optou-se pela discretização com menor refinamento, pois seus comportamentos nas análises irão gerar os valores mais condizentes com a realidade, diminuindo assim o desvio padrão de resposta dos valores numéricos.

### 3.3.2. Análises

Os métodos adotados para a avaliação vibratória do filtro consiste na realização da análise modal e da análise em regime permanente forçado. A primeira, objetiva identificar as frequências naturais e os modos de vibração das camadas e a segunda determinar a resposta dinâmica do filtro quando submetido a uma força, para entender o comportamento e eficiência da peça sobre essas influências.

O estudo foi conduzido no software ANSYS Workbench através da análise modal pré-simulado anteriormente. Esse fez levantamentos das frequências naturais da Camada 1 e 3 do filtro individualmente; o material da estrutura foi o Aço inoxidável 254 SMO, optou-se por uma frequência definida entre 0 Hz (Hertz) à 200 Hz e ambas as extremidades das peças foram engastadas, restringindo todos os graus de liberdade – translação eixo X, Y e Z, e Rotação eixo X, Y e Z. Condição também usada na análise harmônica.

Essa faixa de varredura, com até 20 modos, foi definida simulando a excitação da bomba Schneider ME32250 Multi-Stage 25 HP, com 1.750 rpm e 6 pás (Tabela de seleção de bombas e motobombas, 2022).

Ao transformar o giro do motor de  $\Omega$  rpm (rotação por minuto) para Hz (rotação por segundo) e multiplicá-lo pelo número de pás ( $N$ ), com na Equação 2, acharemos a frequência de excitação real (dado como múltiplo do número de pás), no caso o valor é de 175 Hz, assim definindo a faixa de frequência que seria estudada.

$$f_{real} = \left( \frac{\Omega \text{ rpm}}{60 \text{ s}} \right) * N \quad (2)$$

Outrossim, para reproduzir as condições operacionais reais, no regime permanente forçado, foi aplicada uma força radial interna como na Figura 12, correspondente à força exercida pela bomba hidráulica utilizada no sistema que é projetada para pressões de operação de até 1 Mpa (Tabela de seleção de bombas e motobombas, 2022).

A força aplicada foi de 336 kN, foi necessário converter essa pressão em uma força equivalente que atua radialmente na parede interna da estrutura, de acordo com a Equação 3. Sabendo que a área é 5,6 m<sup>2</sup>, como na Equação 4.

$$F = p \cdot A \quad (3)$$

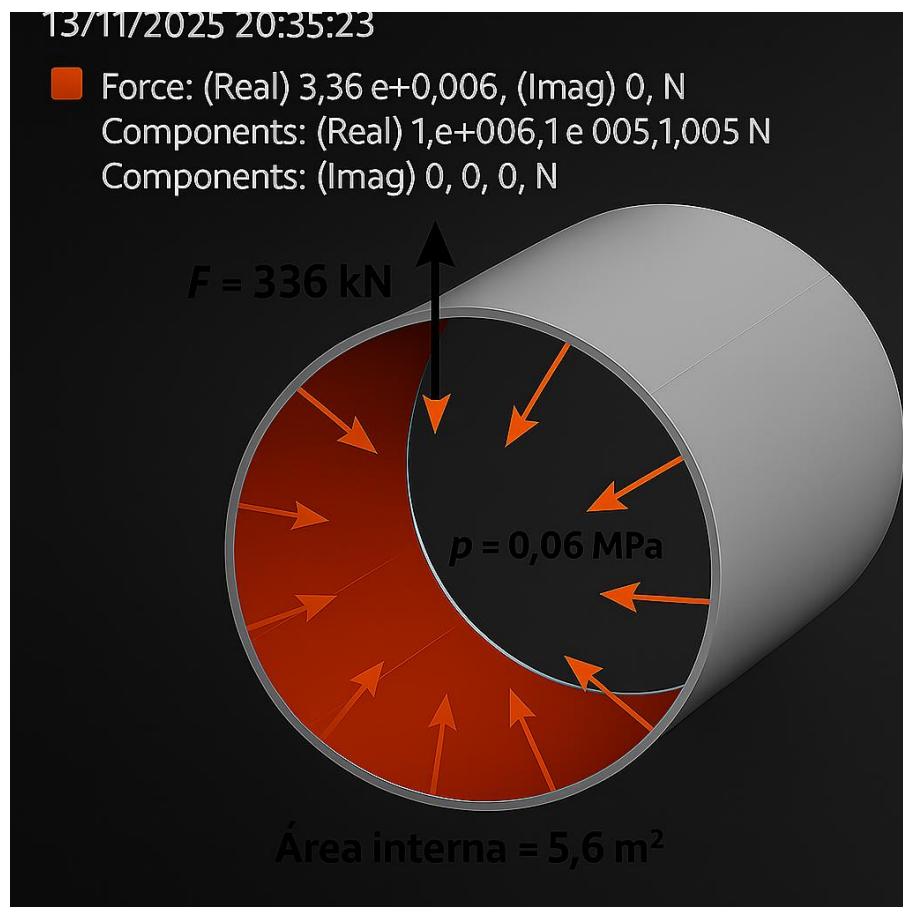
- [F] Força;
- [p] pressão;
- [A] área.

$$A = 2r \pi L \quad (3)$$

- [A] área;
- [r] raio;
- [L] comprimento ou altura do filtro.

Sistemas reais não operam em limite por isso, a pressão diferencial adotada para o filtro foi de 0,6 bar, seguindo Jang (2020).

Figura 12 – Região de aplicação da força na superfície interna do filtro.

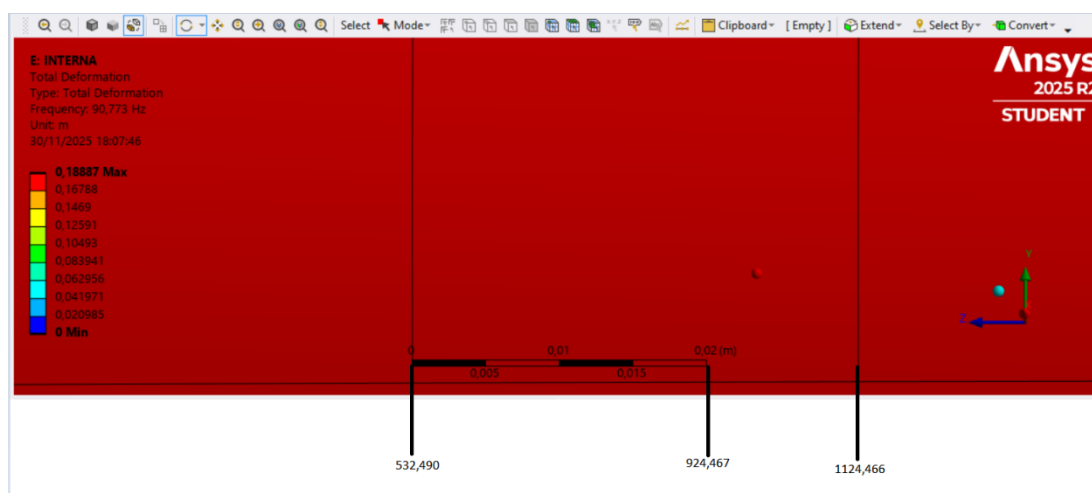


Fonte: Autoral (2025).

### 3.4. PROCEDIMENTO DO CÁLCULO DA TAXA DE DEFLEXÃO

A taxa de deflexão foi obtida por meio de um procedimento simples, porém suficiente para os propósitos deste estudo. Inicialmente, posicionou-se uma régua virtual sobre um dos elementos gerados pela malha da peça no ANSYS, registrando-se uma captura de tela da configuração. Em seguida, essa imagem foi analisada no software Paint, onde foram identificadas as coordenadas inicial e final da régua em relação à peça, como na Figura 13.

Figura 13 - Método de cálculo da taxa de deflexão



Fonte: Autoral (2025)

Determinou-se a coordenada inicial, o tamanho da régua e a coordenada final do elemento em número de pixel no programa Paint, aplicando-se uma regra de três para converter as medidas observadas na imagem para as dimensões reais correspondentes, conforme a escala da régua.

Para a Camada 1, foi feito a Tabela 2 e estudado diretamente a deflexão ocorrida na abertura pré-existente de 3 m.

Tabela 2 – Deflexão Camada 1 pós vibrações

Horizontal	Pixel	Régua m	Vertical	Pixel	Régua m
<b>x</b>	516,635	0	<b>x</b>	516,634	0
<b>x1</b>	944,633	0,04	<b>x1</b>	944,634	0,04
<b>x2</b>	1329,617	0,03598	<b>x2</b>	1158,618	0,059999

Fonte: Autoral (2025)

Com essas informações, adotamos o valor médio de 107 pixel como referência à 0,01 m, a partir disso, obteve-se uma deflexão média de 0,03 m na direção vertical e -0,006 m na horizontal, resultando em uma variação total equivalente a 59,97% da abertura original.

Para a Camada 3, calculou-se a deformação elástica local do elemento que mais sofreu expansão pós influências vibracionais, adiante, estimou a porcentagem de variação da abertura horizontal e vertical com referência ao diâmetro original de 0,01mm, como na Tabela 3.

Tabela 3 - Deflexão Camada 3

<b>Horizontal</b>	<b>Pixel</b>	<b>Régua m</b>	<b>Vertical</b>	<b>Pixel</b>	<b>Régua m</b>
<b>Pré - x</b>	19,569	0	<b>Pré - x</b>	38,592	0
<b>Pré - x1</b>	388,57	0,02	<b>Pré - x1</b>	436,593	0,02
<b>Pré - x2</b>	552,562	0,02697	<b>Pré - x2</b>	632,594	0,030057
<b>Pós- x</b>	36,686	0	<b>Pós- x</b>	24,416	0
<b>Pós - x1</b>	474,685	0,02	<b>Pós - x1</b>	400,418	0,02
<b>Pós - x2</b>	570,667	0,02702	<b>Pós - x2</b>	592,42	0,028741

Fonte: Autoral (2025)

Assim, com o valor médio de 197,6 pixel na referência à 0,01 m, análogo a uma proporção entre o elemento e a abertura do poro, tem-se uma taxa de deflexão em 75,95%.

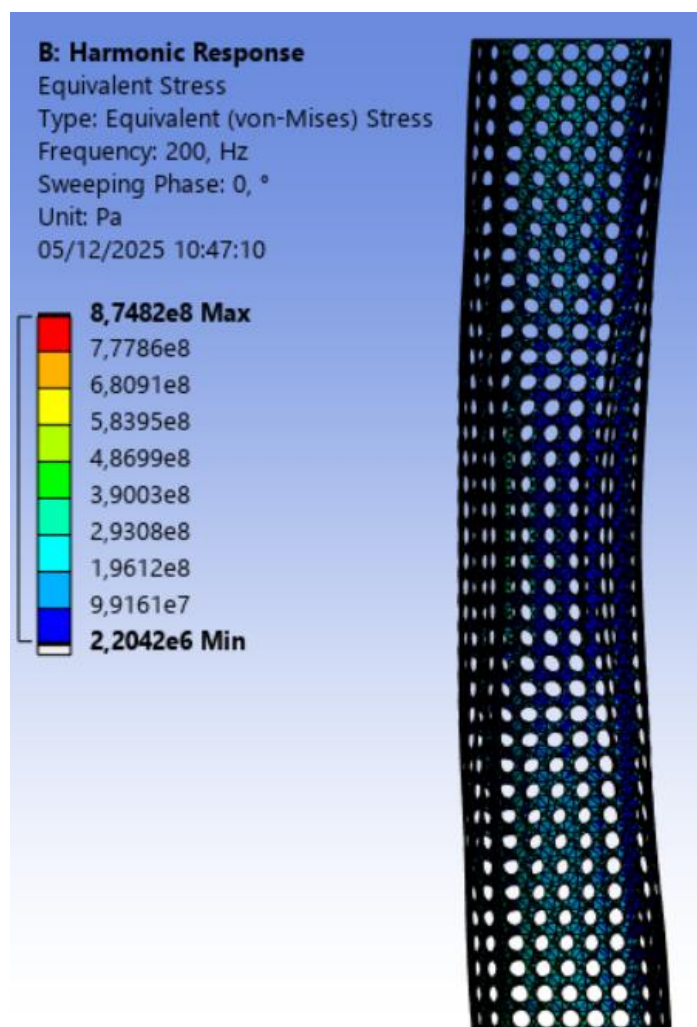
### 3.4.1. Von Mises

A tensão de von Mises é um critério usado na engenharia para verificar se um material está trabalhando de forma segura ou se está começando a entrar na região plástica, ou seja, quando ele deixa de voltar ao formato original depois que a carga é retirada. Esse critério reúne todas as tensões que atuam ao mesmo tempo na peça e transforma em um valor único, que depois é comparado com o limite de escoamento do material. Se a tensão de von Mises ficar abaixo desse limite, a deformação é elástica; se ultrapassar, o material começa a deformar permanentemente.

No caso deste trabalho, é necessário calcular a tensão de von Mises para verificar se a expansão dos furos da Camada 1 e dos poros da Camada 3, que ocorre durante a vibração, ainda está dentro do regime elástico.

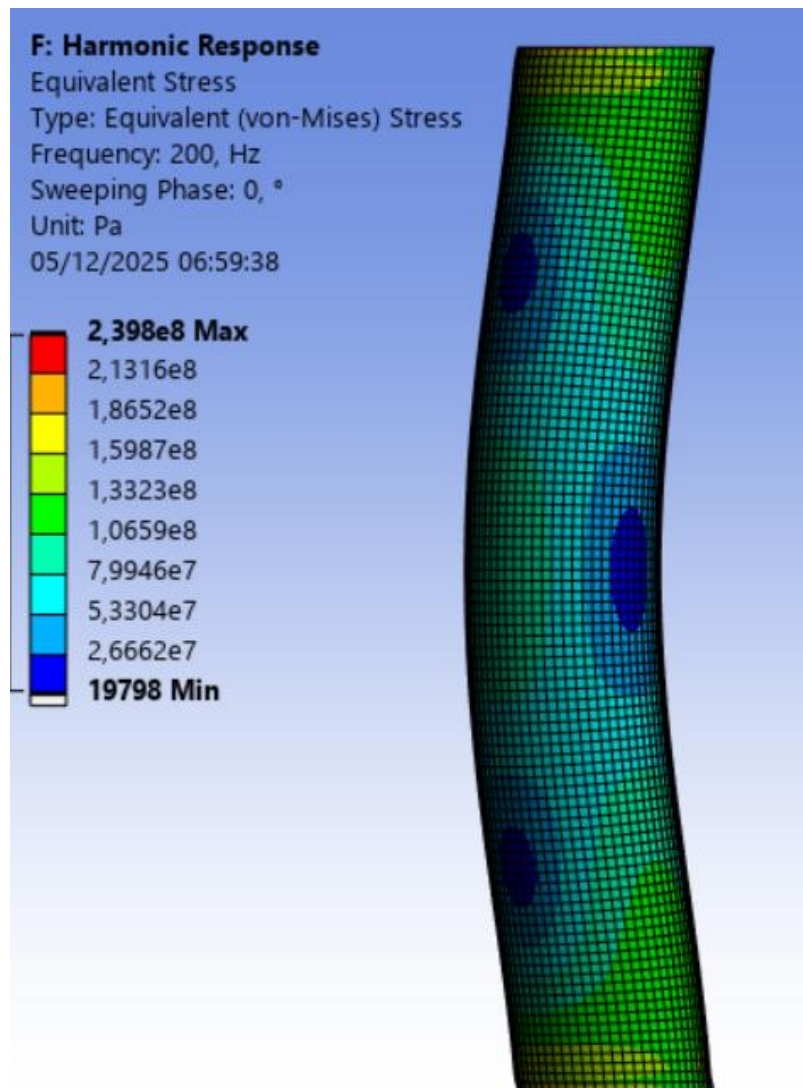
A Figura 14 e a Figura 15 representam a análise de Von Mises da Camada 1 e 3 respectivamente, e ambas indicando que o modelo numérico está representando adequadamente a resposta estrutural do filtro sob excitação dinâmica, tendo em vista que o limite de escoamento do aço inox 254 SMO é 300 Mpa.

Figura 14 - Von Mises Camada 1



Fonte: Autoral (2025)

Figura 15 - Von Mises Camada 3



Fonte: Autoral (2025)

Na Camada 1, a conformidade com o regime elástico é verificada pela própria distribuição espacial das tensões, que não apresenta regiões significativas excedendo o limite de escoamento. Já na Camada 3, onde ocorre maior concentração localizada, a validação se dá pelo valor máximo reportado, o qual permanece inferior a 300 MPa, garantindo que a camada também opera de forma elástica.

## 4. RESULTADOS

Nesta seção, é apresentado o filtro final, ademais os resultados da análise modal e resposta regime permanente forçado aplicada de acordo com a parametrizações pré-definidas na metodologia.

### 4.1. MODELAGEM DO FILTRO

A modelagem final do filtro é apresentada pela Figura 16, ela é feita pela ferramenta de montagem do Solidworks.

Figura 16 - Visão frontal filtro completo

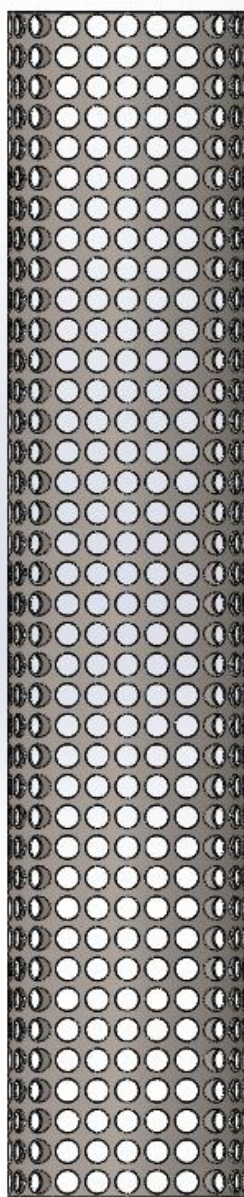


Fonte: Autoral (2025)

Abaixo estão a Camada 1, Figura 17, onde ocorre o contato inicial com a água de lastro, possui um raio de 300 mm e orifício com 3 mm de diâmetro (Single Screen Series, 2023). É a Camada externa, que serve para proteger o filtro contra o impacto da pressão de grande quantidade de água de lastro que é sugada.

Para sua modelagem, criou-se um retângulo com aberturas uniformemente distribuídas, em seguida foi moldado o corpo de modo a adquirir a forma cilíndrica.

Figura 17 - Camada 1



Fonte: Autoral (2025)

A Figura 18 representando a Camada 2, que é similar à camada 4, porém seus raios são de 295 mm e 280 mm, respectivamente (Single Screen Series, 2023). Ambos, dão estrutura para o filtro realizar seu trabalho mecânico, e seus orifícios são losangos com 3 mm de abertura. São estruturas muito mais complexas de desenvolver e realizar o estudo sobre elas.

Figura 18 - Camada 2



Fonte: Autoral (2025)

Por último, a Figura 19 representa a Camada 3, sendo a separação final e mais rigorosa entre água e poluentes, com um raio de 290 mm e poros com capacidade de filtrar até 10  $\mu\text{m}$ . É um cilindro maciço de Aço inox 254 SMO.

Figura 19 – Camada 3



Fonte: Autoral (2025)

Após a criação do filtro, viabilizou-se a importação das estruturas para o Ansys, permitindo a realização das análises necessárias para alcançar os objetivos estabelecidos ao longo do trabalho.

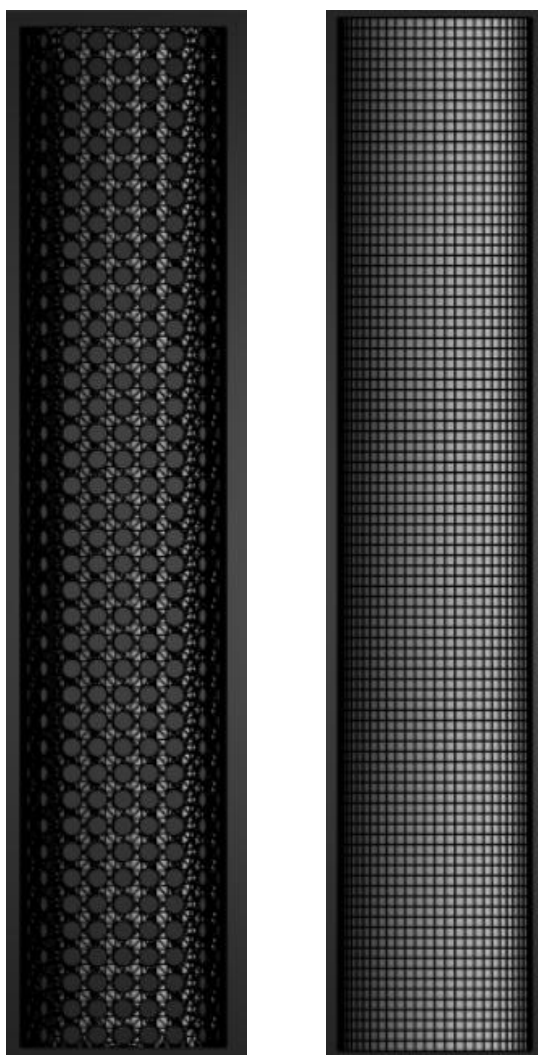
## 4.2. APLICAÇÃO DA FERRAMENTA ANSYS

O objetivo foi caracterizar e analisar o comportamento do filtro sob as condições de operação, permitindo avaliar seu desempenho e identificar possíveis regiões críticas que falhariam na filtragem dos contaminantes da água de lastro.

### 4.2.1. Representação gráfica da malha

A Figura 20 representa a malha no refino de 0,03 m. Essa definição foi adotada, também, porque valores abaixo de 0,03 m não tiveram convergência de malha e os outros resultados pesquisados, mostravam-se estáveis, de modo que qualquer um poderia ser utilizado.

Figura 20 - Malhas



Fonte: Autoral (2025)

O estudo feito da discretização das malhas no tópico da metodologia, cuja função foi examinar a primeira frequência natural obtida de cada modo, confirma a convergência dos resultados, assegurando que o refinamento adotado é adequado.

Outro fator considerado foi o tempo de geração das malhas e o custo computacional, que se mostraram muito semelhantes entre todos os estudos, como apresentado nas Tabela 4 e a Tabela 5.

Tabela 4 – Tempo de processamento na Camada 1.

<b>Malha [m]</b>	<b>nós</b>	<b>Elementos</b>	<b>t. malha [s]</b>	<b>t. modal[s]</b>	<b>t. forçado[s]</b>
<b>0,03</b>	102.012	39.937	00:36,54	00:44,56	06:50,51
<b>0,04</b>	95.824	36.436	00:40,70	00:38,67	01:14,74
<b>0,05</b>	101.994	39.925	00:36,00	01:28,13	06:03,45
<b>0,06</b>	100.187	37.886	00:51,31	05:57,89	06:02,57
<b>0,07</b>	100.207	38.038	01:05,49	04:19,11	06:39,18

Fonte: Autoral (2025)

Todas as malhas foram geradas em menos de 10 minutos, evidenciando um tempo de baixo custo e com pouca variação entre si, tanto na Camada 1 como na 3.

Tabela 5 - Tempo de processamento na Camada 3.

<b>Malha [m]</b>	<b>nós</b>	<b>Elementos</b>	<b>t. malha [s]</b>	<b>t. modal[s]</b>	<b>t. forçado [s]</b>
<b>0,03</b>	1.020.123	39.937	00:11,73	02:20,93	03:57,83
<b>0,04</b>	46.037	22.789	00:18,37	03:04,36	06:23,00
<b>0,05</b>	29.318	14.535	00:38,71	01:14,81	02:57,62
<b>0,06</b>	10.650	1.500	00:12,18	00:43,96	01:02,08
<b>0,07</b>	7.956	1.118	00:10,83	00:23,94	00:56,10

Fonte: Autoral (2025)

Logo, com essas averiguações, não haveria justificativa para deixar a malha mais grosseira, haja vista que, uma malha mais refinada proporcionaria uma descrição geométrica e campos de tensão mais detalhados, auxiliando na leitura da deflexão local do filtro.

### 4.2.1. Análise modal

Esse processo foi realizado no Ansys Workbench, na Tabela 6 estão os 8 primeiros modos da Camada 1, que contemplam a faixa de trabalho de até 200Hz, engate fixo superior e inferior e não possuem nenhuma forma de amortecimento adicionado.

#### Camada 1

- **Modo 1 com 75,613 Hz**

A estrutura apresenta uma vibração simples, que ocorre em baixa frequência, parecendo ocorrer uma compressão em seguida de um cessar de pressão, no centro da peça. Toda a camada oscila como um bloco parado, com o deslocamento de maior amplitude concentrado na região central, as extremidades não se deformam.

- **Modo 2 com 77,341 Hz**

É parecido com o primeiro. A região central ainda é onde ponto foco. Esse comportamento é comum nos modos iniciais, pois ainda não existe regiões vibratórias separadas no corpo.

- **Modo 3 com 80,675 Hz**

A estrutura passa a vibrar de forma diferente. O centro continua sendo o ponto de maior deflexão, porém aparente está sofrendo um tipo de tração.

- **Modo 4 com 80,901 Hz**

Similar ao modo 3, porém sobre uma tração muito maior levando a mais deflexão no sistema.

- **Modo 5 com 120,900 Hz**

Apresenta uma geometria vibracional mais complexa, onde têm-se dois trechos distintos vibrando e o centro da peça fica mais rígido, separando essas duas regiões. Esse comportamento gera dois “balões” vibratórios.

- **Modo 6 com 121,680 Hz**

Aparenta um comportamento mais assimétrico, e com compressão e tração antagônicos, tanto vertical quanto horizontalmente no decorrer da estrutura.

- **Modo 7 com 124,66 Hz**

A peça da visualiza novamente um deslocamento maior no centro, e caracteriza uma compressão da camada em um todo.

- **Modo 8 com 125,37 Hz**

Continua com a região central tendo mais deflexão, porém aparenta o oposto do modo 7. Demonstra estar ocorrendo uma tração ao longo da superfície da peça, com se passasse uma ondulação por ela.

Vale ressaltar que durante a operação real, a estrutura não vibra de acordo com um único modo isolado. Como a bomba gera diversas frequências ao mesmo tempo, vários desses modos acabam sendo excitados simultaneamente. Isso faz com que o filtro apresente uma combinação dos padrões mostrados, resultando em uma vibração mais complexa do que a observada individualmente em cada modo.

Tabela 6 - 8 Modos de vibração Camada 1.

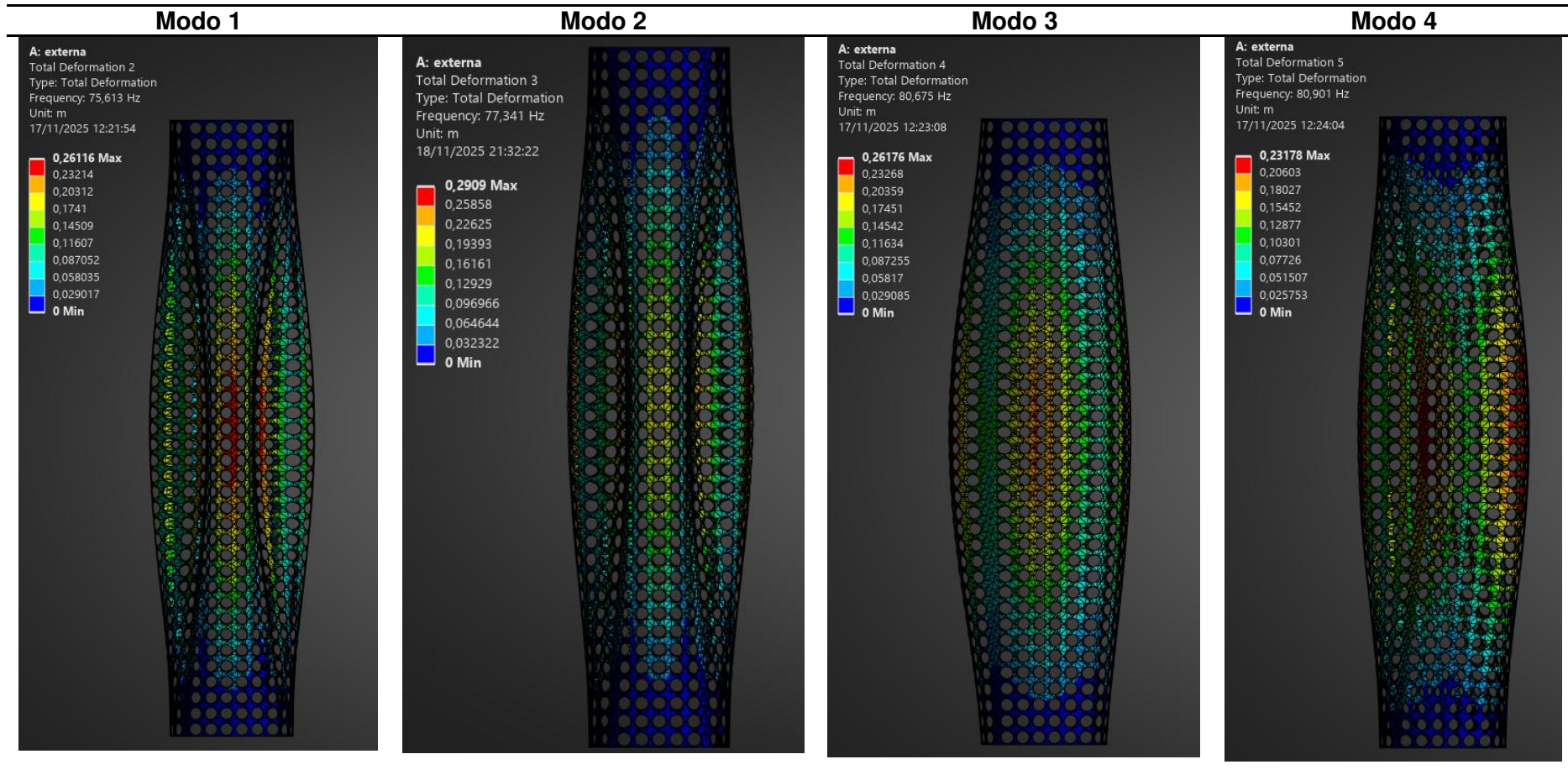
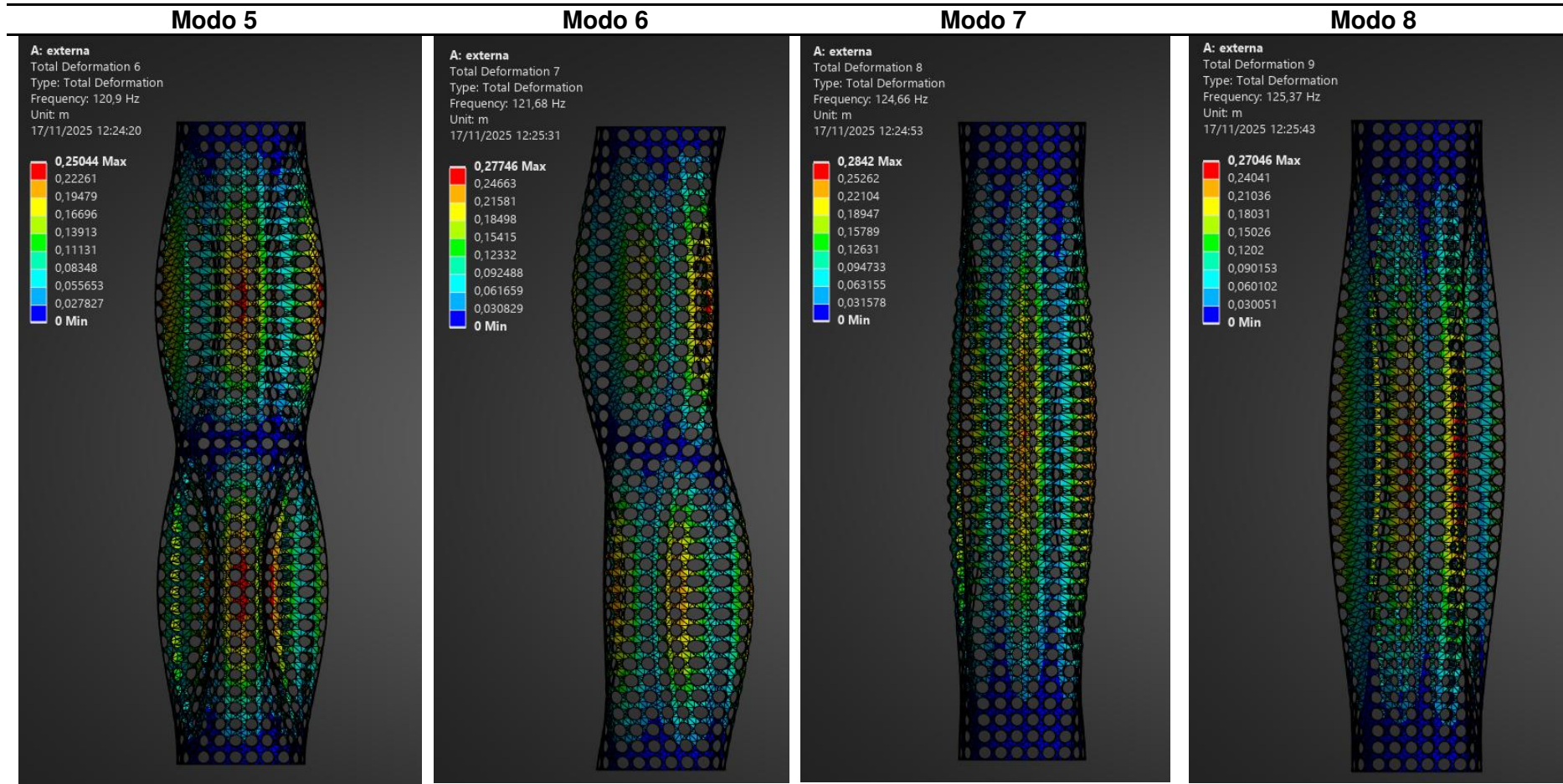


Tabela 4 - 8 Modos de vibração Camada 1 (continuação).



Fonte: Autoral (2025)

Fizemos então o mesmo estudo com a Camada 3, mostrado na Tabela 7.

### Camada 3

- **Modo 1 com 90,773 Hz**

A estrutura está sob influência de uma compressão em seguida de um cessar de pressão, no centro da peça, com maior amplitude concentrado na região central, as extremidades não se deformam. Assim como ocorreu no primeiro modo da Camada 1.

- **Modo 2 com 90,773 Hz**

O segundo modo também ocorre em 90,773 Hz, mas o formato vibratório muda. Essa repetição de frequência ocorre porque a estrutura apresenta simetria geométrica, ou seja, dois modos diferentes que possuem o mesmo valor de frequência, mas com formatos distintos, que neste caso é a vibração em diferentes direções.

- **Modo 3 com 113,8 Hz**

No modo seguinte, a 113,8 Hz, a vibração se concentra novamente na parte central do filtro, mas agora em uma região mais claramente realizando uma compressão especificamente do ponto central da peça. A peça fica mais estreita no meio, e essa faixa possui o maior deslocamento. As extremidades continuam rígidas, reforçando que esse modo ainda possui um padrão simples, porém mais definido do que os dois anteriores.

- **Modo 4 com 113,8 Hz**

Este modo também aparece com 113,8 Hz, mas com um formato completamente diferente. Aqui, temos uma tração saindo da região central da peça. Assim como antes, a repetição da frequência resulta da geometria.

- **Modo 5 com 140,59 Hz**

Surgem várias faixas verticais de vibração ao longo da região central, as quais ocorrem tração na estrutura. Em vez de apenas uma área de deslocamento, aparecem múltiplas bandas vermelhas, mostrando um padrão mais complexo com vários trechos vibrando ao mesmo tempo.

- **Modo 6 com 140,59 Hz**

A forma muda novamente. A vibração forte permanece concentrada na região central, mais uma vez, isso acontece porque diferentes modos podem ter a mesma frequência natural, mas posições diferentes de deslocamento máximo.

- **Modo 7 com 162,77 Hz**

O filtro passa a vibrar em duas regiões principais: uma na parte superior e outra na parte inferior. O centro fica mais rígido, sem deslocamento, separando esses dois trechos.

- **Modo 8 com 162,77 Hz**

Comportamento completamente assimétrico. As áreas de maior deslocamento aparecem deslocadas para lados opostos da estrutura.

Percebemos que algumas frequências aparecem repetidas ou muito próximas em ambas as camadas. Isso acontece porque, em geometrias cilíndricas como a deste filtro, é comum que existam modos degenerados, que compartilham a mesma frequência natural, mas apresentam formatos de vibração diferentes. Ou seja, mesmo com o mesmo valor de frequência, cada modo movimentava a estrutura de um jeito próprio.

Tabela 7 - 8 Modos de vibração Camada 3.

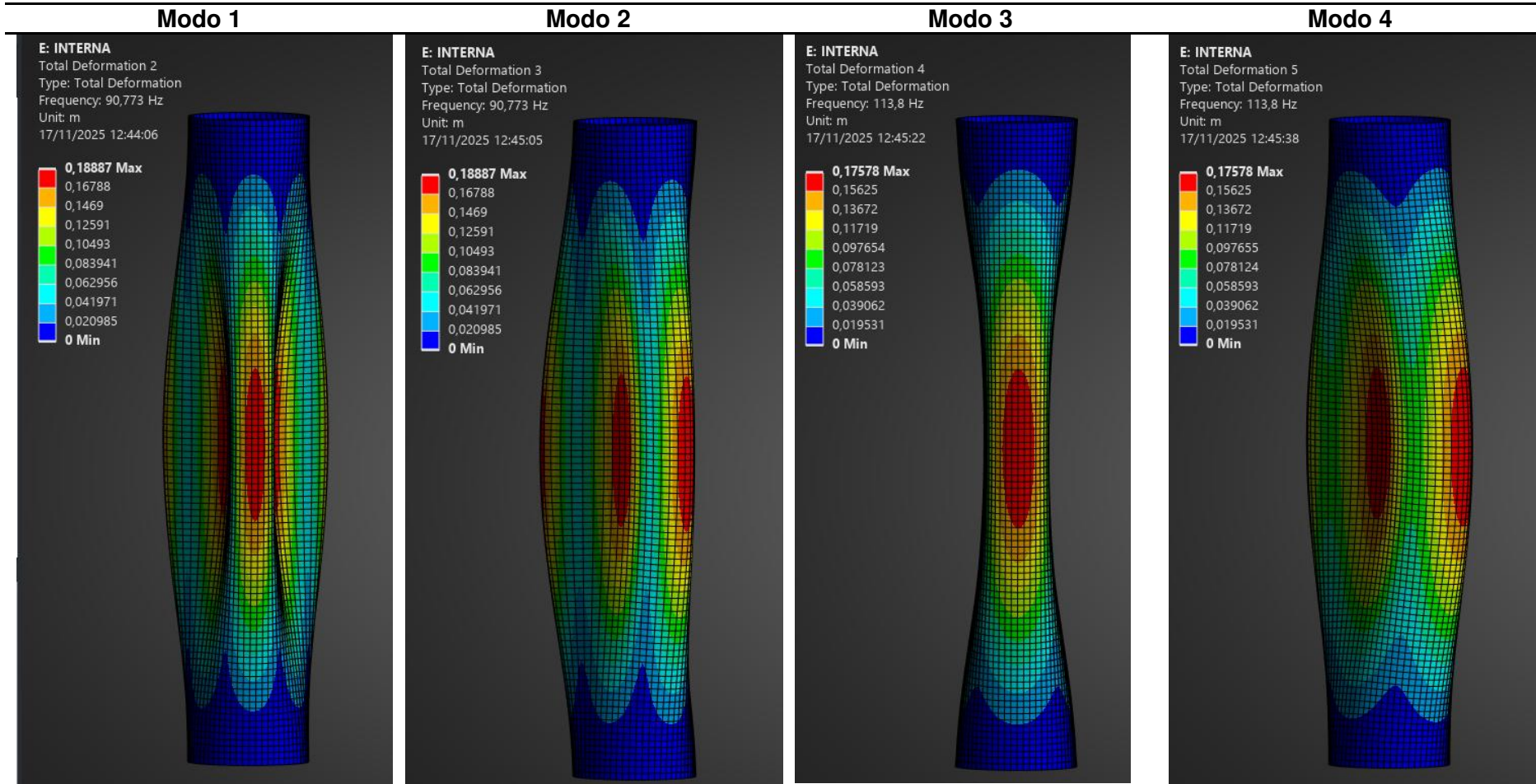
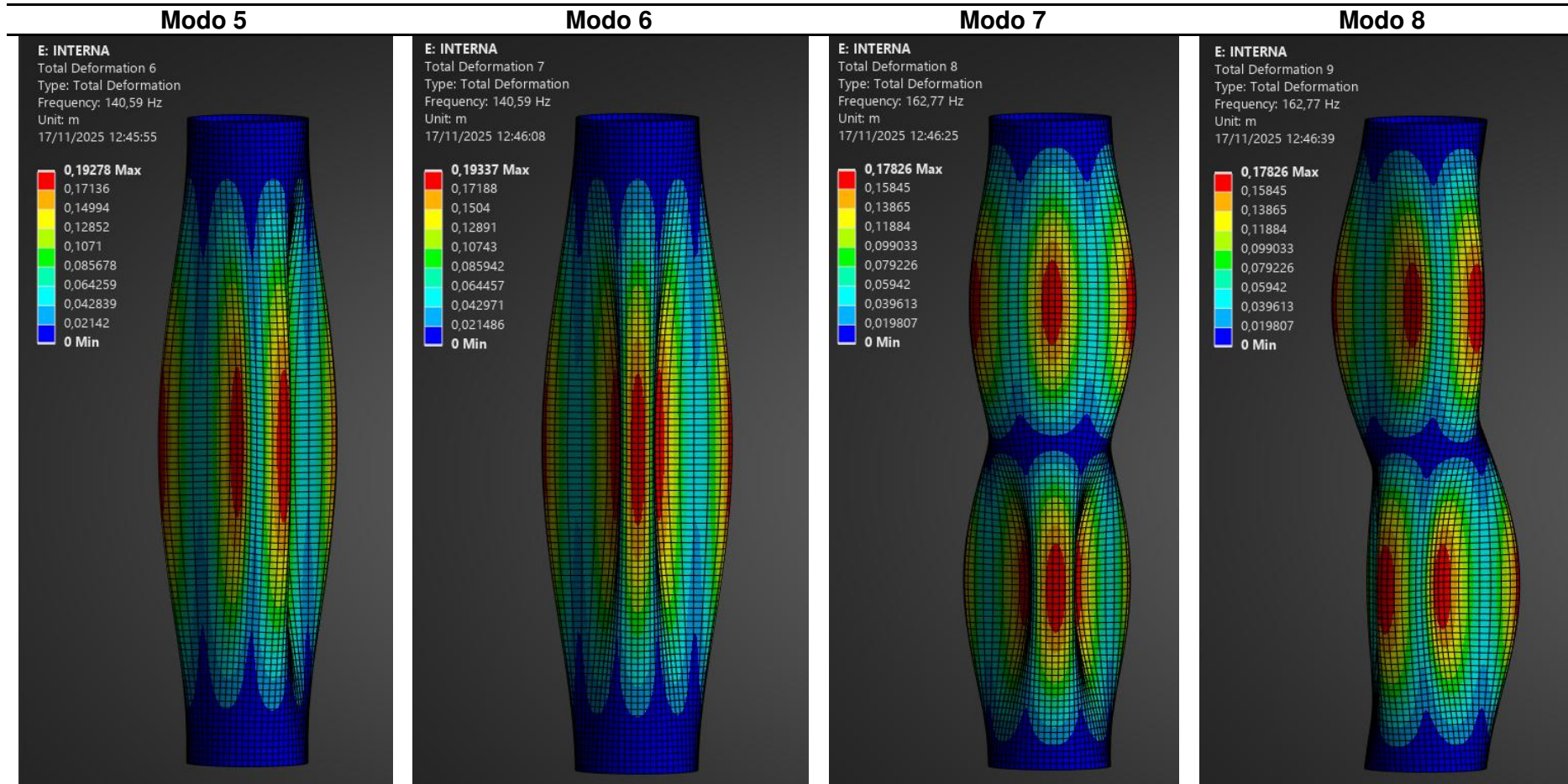


Tabela 5 - 8 Modos de vibração Camada 3 (continuação).



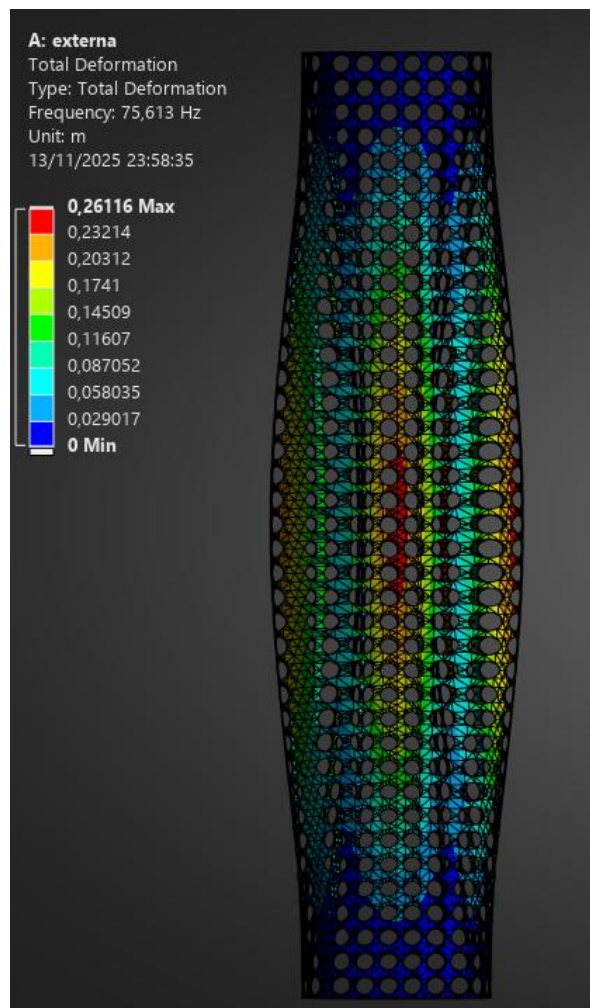
Fonte: Autoral (2025)

#### 4.2.2. Amplitude da forma modal

A Figura 21 é o resultado da análise modal para a Camada 1 mostrando uma frequência natural não amortecida de 75,613 Hz e uma deflexão global relativa total que varia entre 0,00 mm e 261,16 mm.

A figura também, possibilita observar qual é o formato de vibração do modo em análise, e confirmar que sua deflexão se concentrando majoritariamente na região central da estrutura, característico de cilindros finos e compridos, submetidos a engastes fixo em ambas as extremidades.

Figura 21 – Análise modal Camada 1



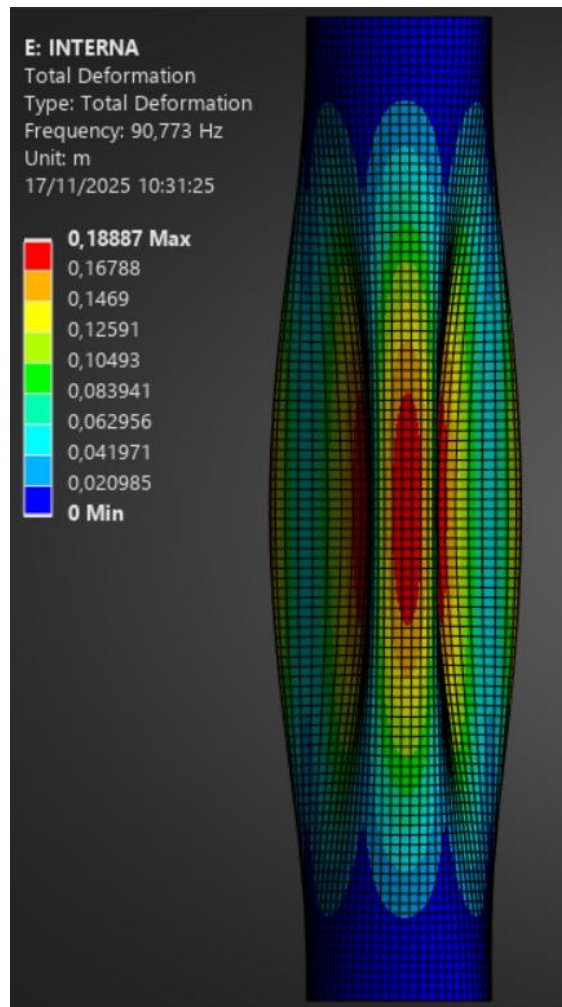
Fonte: Autoral (2025)

A Figura 22 é o resultado da análise modal para a Camada 3, mostrando uma frequência natural não amortecida de 90,77 Hz, e uma deflexão global relativa máxima de 188,87 mm, concentrando-se também na região central.

Por ser uma camada inteiriça, com poros de 0,01 mm em vez de furos, sua deflexão total é inferior à da Camada 1. Isso ocorre porque a ausência aberturas trás maior rigidez estrutural, evitando a concentração de tensões que se formam ao redor de furos e os deixam suscetíveis à deflexão.

No entanto, ao relacionar a deflexão obtida com o tamanho real dos poros, observa-se que a variação percentual se torna significativamente maior, pois mesmo pequenos deslocamentos representaram um aumento elevado ao diâmetro original

Figura 22 - Análise modal Camada 3



Fonte: Autoral (2025)

Nas figuras do primeiro modo, observam-se que na região central, área de maior deslocamento, alguns elementos locais se projetam para fora do perfil, enquanto outras se projetam para dentro, formando um padrão ondulatório ao longo da estrutura. A distribuição de cores reforça esse comportamento, indicando em vermelho as zonas de maior deslocamento e, em azul, as áreas entendíveis como estáveis, destacando as extremidades, as quais permanecem praticamente sem movimento.

É importante ressaltar que: mesmo esses valores de deslocamento obtidos pelo programa são ilustrativos da relação de amplitude entre os graus de liberdade e não representa fisicamente um deslocamento real, essa informação identifica a região mais suscetível ao aumento temporário dos poros durante vibração, além de, quando comparada as frequências naturais obtidas e a frequência de excitação da bomba tem uma faixa semelhante, nos modos superiores, demonstrando que o sistema opera em uma faixa de frequência suscetível a deformações.

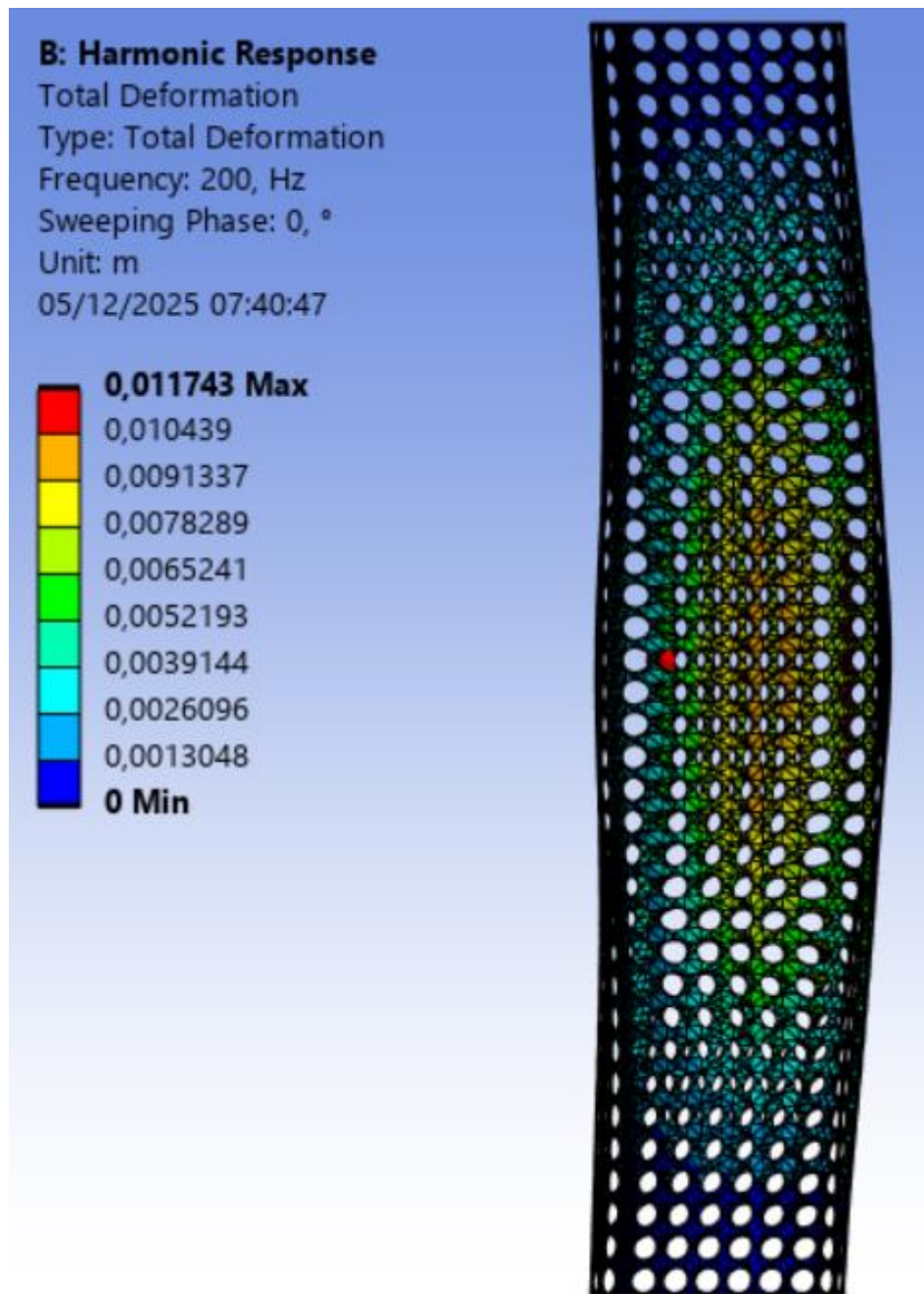
#### **4.2.3. Resposta Regime Permanente Forçado**

Diferentemente da análise modal, que apresenta apenas deslocamentos relativos, a resposta forçada indica o deslocamento obtido corresponde a valores físicos que ocorrem durante a operação e para maior veracidade, adotou-se uma perda de energia no sistema, ou seja, inseriu-se um amortecimento representando o meio da água. Assim, utilizou-se uma  $\zeta$  (razão de amortecimento) de 0,3.

A Figura 23 apresenta o resultado da análise regime permanente forçado para a mesma camada, considerando a frequência de excitação até 200 Hz e máxima amplitude de trabalho da bomba 0,06 Mpa de operação, ou seja 336 kN. Nessa condição, a deflexão máxima obtida é de 11,743 mm na região central, mais distante da posição de engaste do filtro.

Entende-se que esse deslocamento permite a passagem de partículas muito maiores do que originalmente previsto para a peça, e vale ressaltar que esse efeito é concentrado na região central do filtro, onde a vibração é mais intensa, contribuindo para a passagem de um número maior de impurezas durante a operação.

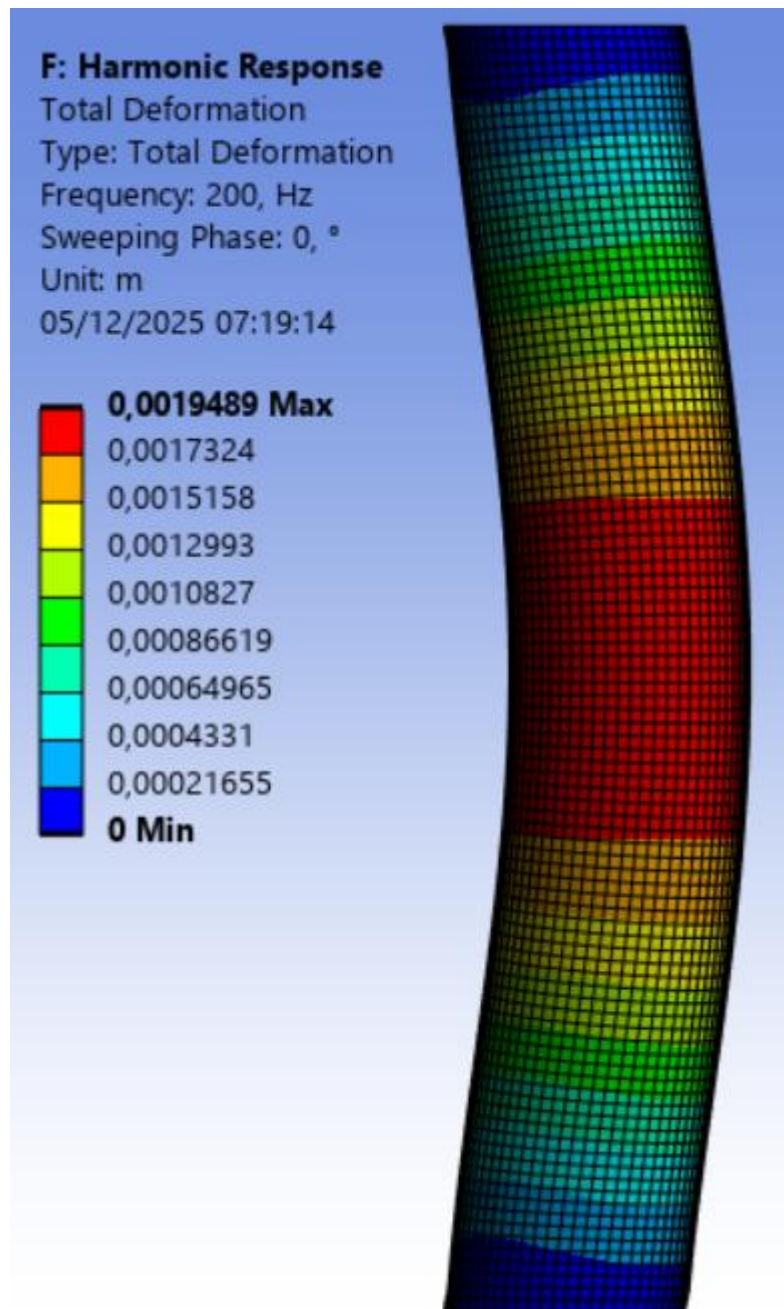
Figura 23 – Análise regime permanente forçado Camada 1



Fonte: Autoral (2025)

A Figura 24 apresenta o resultado da análise regime permanente forçado para a Camada 3, com uma deflexão máxima obtida 19,489 mm. A peça também se encontra nas mesmas condições que a Camada 1: frequência de excitação até 200 Hz e máxima amplitude de trabalho da bomba em 0,06 bar, ou seja 336 kN de força aplicada, engate fixo nas extremidades, ademais, uma razão de amortecimento de 0,3.

Figura 24 - Análise regime permanente forçado Camada 3



Fonte: Autoral (2025)

As análises evidenciam que o filtro sofre deformações significativas na região central, assim como nos demais parâmetros avaliados, esse comportamento repetido indica que essa área realmente é a mais sensível da estrutura e a que mais sofre influência das vibrações aplicadas, reforçando assim, que, durante a operação, o filtro tende a concentrar suas maiores deflexões justamente no ponto onde há menor rigidez.

#### 4.2.4. Von Mises

Na Camada 1 temos um valor máximo de 874,8 Mpa, todavia observa-se que a superfície da peça está praticamente uniforme com um sutil azul esverdeado, dando a entender que as tensões equivalentes de von Mises obtidas, em praticamente toda a extensão do modelo estão abaixo desse valor máximo, estão por volta de 293 Mpa.

Dessa forma, deduz-se que eventuais tensões superiores a 300 MPa estejam confinadas a regiões extremamente localizadas, com número restrito de nós da malha, não refletindo, portanto, o comportamento mecânico global da estrutura. Vale ressaltar ainda que, as tensões elevadas observadas decorrem diretamente da pressão de referência adotada na simulação, a qual representa uma condição de carregamento conservadora. Em operação real, os valores efetivos de pressão tendem a ser inferiores devido às perdas de carga distribuídas ao longo do sistema e às particularidades geométricas do elemento filtrante. Assim, é esperado que o estado de tensões no componente, seja menos crítico do que no modelo numérico. Logo, para fins de avaliação da integridade estrutural considera-se que o componente da Camada 1 está em regime elástico com um fator de segurança de 1,02.

Na Camada 3, a distribuição de tensões de von Mises apresenta menor uniformidade, atingindo um valor máximo de aproximadamente 239,8 MPa. Esse nível de tensão permanece dentro do limite elástico do material, resultando em um fator de segurança estimado de 1,25, o que indica condições operacionais estruturalmente aceitáveis para o carregamento analisado.

Assim, considerando os valores obtidos e a distribuição espacial das tensões, conclui-se que ambas as camadas operam dentro do limite de escoamento do aço inox 254 SMO, ou seja, abaixo de 300 MPa, mantendo o comportamento estrutural elástico mesmo sob a excitação harmônica analisada.

#### 4.3. TAXA DE DEFLEXÃO

Nessa seção apresentaremos os valores finais da taxa de deflexão, que foi determinada a partir da comparação, vertical e horizontal, entre o comprimento inicial, pré vibração, e o comprimento final, pós vibração, do elemento mais impactado por essas influências externas, como na Tabela 8.

Tabela 8 - Dados Comparativos

	<b>Horizontal</b>	<b>Vertical</b>
<b>Camada 1</b>	0,03598	0,059999
<b>Camada 1</b>	0,03	0,03
<b>Camada 3</b>	0,02697	0,030057
<b>Camada 3</b>	0,02702	0,028741

Fonte: Autoral (2025)

Abaixo temos a Tabela 9 e a Tabela 10, que evidenciam o comportamento das deflexões verticais e horizontais para as camadas avaliadas, permitindo identificar a intensidade relativa das deformações frente à vibração.

Tabela 9 - Taxa deflexão Camada 1

<b>Camada 1</b>	<b>%</b>	<b>Desvio Padrão mm</b>
<b>Deflexão média V</b>	20	0,02121225
<b>Deflexão média H</b>	100	0,00422843
<b>Taxa de aumento proporcional à 3 mm</b>	59,964	0,0120094

Fonte: Autoral (2025)

Camada 1, tem uma deflexão horizontal maior alcançando 100% quando comparada ao comprimento inicial. A deflexão vertical, é menor 20%, ainda representa variação significativa. O aumento proporcional tomando como referência os furos de 3 mm evidencia um acréscimo aproximado de 60%, refletindo uma grande deflexão local sob vibrações.

Tabela 10 - Taxa deflexão Camada 3

<b>Camada 3</b>	<b>%</b>	<b>Desvio Padrão mm</b>
<b>Deflexão média V</b>	146%	0,00093021
<b>Deflexão média H</b>	5,56%	3,5351E-05
<b>Taxa de aumento proporcional à 0,001 mm</b>	75,947%	0,0006328

Fonte: Autoral (2025)

Camada 3, a resposta vertical é a mais expressiva, atingindo 146% enquanto a deflexão horizontal permanece relativamente pequena 5,56%. Considerando o diâmetro dos poros de 0,001 mm, a taxa de aumento proporcional é de

aproximadamente 76%, evidenciando que, mesmo com dimensões reduzidas, a camada é significativamente impactada pela vibração no regime harmônico.

De modo geral, a análise das taxas de deflexão demonstra que ambas as camadas apresentam variações geométricas relevantes sob excitação dinâmica, ainda que em intensidades distintas.

## 5. IMPACTO DA VIBRAÇÃO NO FILTRO

Nessa parte do trabalho foram analisados os resultados de deflexão máxima obtidos em cada camada, análogo à sua condição inicial e avaliando o impacto dessas modificações sobre o desempenho estrutural.

A Tabela 11 mostra os dados obtidos ao longo do projeto, com os valores antes e durante a aplicação da excitação externa no filtro. Dessa forma, é possível comparar se houve alguma mudança no comportamento e na eficiência do filtro durante o próprio processo.

Tabela 11 - Dados Camada 1 e 3.

<b>Parâmetro</b>	<b>Camada 1</b>	<b>Camada 3</b>
<b>Abertura furo/poro [mm]</b>	3,00	0,001
<b>Deflexão máxima média [mm]</b>	1,79892	0,000759
<b>Diâmetro médio novo furo/poro [mm]</b>	4,798927	0,00176
<b>Deflexão média diâmetro [%]</b>	59,964	75,947

Fonte: Autoral (2025)

Os dados mostram que a vibração causada pelo próprio fluxo de água pode diminuir a eficiência do filtro. Isso acontece porque, quando o filtro deforma durante a operação, os vãos e poros aumentam de tamanho, permitindo a passagem de impurezas maiores do que o previsto.

Para a Camada 1, a deflexão atingiu 4,798927mm, sendo um aumento de 59,964% e na Camada 3, cujo inicial é de apenas 0,001 mm, a deflexão é maior chegando a 75,947%.

Esse comportamento evidencia que a estrutura opera em uma condição dinâmica na qual as vibrações são suficientemente altas para deformar a geometria filtrante de forma relevante, especialmente na região central, de menor rigidez.

A coerência entre os resultados das análises e as taxas de deflexão, reforça a hipótese de que excitações externas tem potencial para comprometer a integridade funcional do filtro. Todavia, ainda há poucos estudos sobre essa problemática para confirmações precisas, mas os resultados obtidos neste trabalho indicam que a hipótese é válida e merece atenção em pesquisas futuras.

## 6. CONCLUSÃO

Podemos observar que, sem a utilização da água de lastro, as embarcações perderiam sua capacidade de manter o equilíbrio e acabariam por tombar. O processo de lastragem é essencial para o funcionamento seguro dos navios, sendo a água de lastro a solução de melhor custo-benefício, pois a própria embarcação é projetada com compartimentos específicos para ajustar o volume de água conforme as condições de carga.

Todavia, esse mesmo mecanismo apresenta importantes impactos ambientais. Casos de bioinvasão relacionados ao transporte de organismos na água de lastro são comuns, e alguns famosos, uma vez que espécies exóticas introduzidas em uma nova biota conseguem dominar novos ecossistemas por predação ou reprodução acelerada.

Mesmo diante dessas evidências, o despejo da água de lastro permaneceu por muito tempo sem fiscalização adequada. Com isso, o IMO surgiu com regulamentações para normatizar o processo. O principal instrumento de regras para a fiscalização, instalação, uso e manutenção dos sistemas de tratamento de água de lastro é a NORMAM-20, que padroniza os tratamentos utilizados, orientando sobre a eliminação da biota presente na água lastrada sem comprometê-la de outro modo.

A partir dessas exigências, as embarcações passaram a enfrentar o desafio de atender às regulamentações sem elevar excessivamente seus custos operacionais. Assim, foram desenvolvidos sistemas capazes de atuar individualmente ou de forma integrada para remover impurezas captadas durante o processo de lastragem.

Entre as soluções utilizadas, destaca-se a filtração, aplicada tanto durante a entrada quanto durante o descarte da água. Contudo, apesar de ser um método eficaz para remover partículas maiores, sua eficiência sozinha é limitada, em torno de 70% da limpeza geral, e, por isso, costuma ser combinada a outros mecanismos de tratamento.

Os resultados do projeto, indicam que essa eficiência teórica pode estar sendo reduzida, pela influência vibracional que expandem temporariamente as aberturas do filtro.

Para entendimento desse trabalho, um filtro foi modelado no Solidworks, aplicado MEF no Ansys e por fim avaliando suas respostas modais e forçada sob condições pré-existentes: extremidades engastadas e aplicação de uma força radial interna compatível com a bomba de sucção.

No Ansys a malha foi discretizada, apenas da Camada 1 e 3, a estrutural e a principal filtrante respectivamente que são as mais importantes para o funcionamento do filtro e estudo do projeto, foram estudadas, pois a 2 e 4 eram complexas demais ao Ansys Student. A convergência foi verificada analisando diferentes tamanhos de elemento, entre 0,03 m e 0,07 m. Nesse intervalo, as primeiras frequências naturais da Camada 1 permaneceram entre 73 e 76 Hz, com uma taxa de variação de -0,03%, enquanto as da Camada 3 ficaram próximas de 90 Hz e 5%, confirmando a estabilidade numérica da malha adotada para as análises dinâmicas.

Em seguida as análises modais realizadas mostraram que as frequências naturais das Camadas 1 e 3 se situam, respectivamente, na faixa de aproximadamente 75 a 118 Hz e 90 a 162 Hz, valores próximos da frequência de excitação de 175 Hz da bomba, evidenciando uma condição propícia à ocorrência de ressonância e ao aumento expressivo das amplitudes de vibração

Essa quase ressonância, foi comprovada nas simulações em regime permanente forçado: na Camada 1, com furos originalmente de 3,00 mm, foi obtida uma deflexão máxima de 1,8 mm, resultando em um diâmetro efetivo de aproximadamente 4,8 mm, o que representa um aumento de cerca de 60% na abertura; e na Camada 3, responsável pela microfiltração, os poros de 0,001 mm passaram a um valor efetivo da ordem de 0,0008 mm, associado a uma deflexão global máxima de 0,0018 mm, o que corresponde a um aumento de aproximadamente 76% no tamanho da abertura.

Esses resultados deixam claro que, nas condições analisadas, o filtro perde a capacidade de reter partículas que deveriam ser bloqueadas pelo seu dimensionamento original.

Mostra-se ainda mais sensível, uma vez que se deve considerar que o sistema de lastro não opera isolado e que as embarcações estão sujeitas a vibrações geradas por máquinas, equipamentos, ondas, ventos e efeitos hidrodinâmicos (Moliner, 2014). além disso, forças diretamente associadas ao fluxo de água: como vazão, velocidade e sucção, também contribuem para o carregamento dinâmico do filtro (LaVelle, 2014).

Ainda assim, mesmo sob a ação de apenas uma vibração externa pontual, torna-se possível que as vibrações externas influenciam negativamente a filtragem da água de lastro, porém mesmo como os resultados apresentados, ainda existe uma carência significativa de estudos dessa correlação – influência vibracional e eficiência do filtro.

Considerando que esse processo é fundamental para o controle da bioinvasão e para a redução de custos operacionais, pesquisas mais detalhadas sobre o comportamento vibratório dos filtros têm grande potencial de gerar avanços importantes para a área naval. Um entendimento mais completo, ou seja, um estudo em escala real, dessa influência pode contribuir para o desenvolvimento de sistemas mais eficientes, duráveis e econômicos, além de auxiliar na criação de novas tecnologias e regulamentações.

Isso poderia ser feito por meio da técnica de Digital Image Correlation (DIC), esse, fundamenta-se no uso de um sistema estereoscópico de câmeras previamente calibradas, através do qual é possível reconstruir, por triangulação, campos tridimensionais de deslocamento e deformação a partir da comparação entre um estado de referência e estados subsequentes. A superfície de interesse é discretizada em pequenas regiões denominadas facets, cujo padrão estocástico é rastreado com resolução subpixel ao longo das imagens capturadas, permitindo o cálculo preciso dos gradientes de deformação locais por meio do tensor de alongamento. Trata-se, portanto, de uma metodologia óptica não destrutiva, capaz de detectar variações geométricas extremamente sutis, o que a torna particularmente adequada para o estudo de deflexões micrométricas como aquelas observadas na camada responsável pela microfiltração.

A aplicação dessa técnica ao filtro estudado permitiria reproduzir experimentalmente as mesmas condições de operação impostas nas simulações, assim, seria possível verificar empiricamente se as ampliações geométricas previstas numericamente, manifestam-se também em regime operacional. A utilização do DIC permitiria, inclusive, mapear o campo de deslocamento ao longo de toda a superfície filtrante, fornecendo uma avaliação global do mecanismo.

Portanto, este tema se mostra extremamente promissor e merece maior dedicação científica, tanto pela relevância ambiental quanto pelo impacto econômico que seus resultados podem proporcionar.

## REFERÊNCIAS

ALDROVANDI, R. **Sistema de lastro de um navio**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Jaraguá do Sul, Universidade Anhanguera, Jaraguá do Sul, 2015.

ARAÚJO, T. C. **Estudo do sistema de tratamento de água de lastro: viabilidade técnica do sistema portuário**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Naval e Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

BEIRÃO, A. P. **Reflexões sobre a convenção do direito do mar**. Brasília: Fundação Alexandra de Gusmão, 2014.

BEKKER, A. Modal analysis of hyperelastic membrane for the development of a musical instrument. 2017. **ResearchGate**, may. 2017. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/317003381\\_MODAL\\_ANALYSIS\\_OF\\_A\\_HYPERELASTIC\\_MEMBRANE\\_FOR\\_THE\\_DEVELOPMENT\\_OF\\_A\\_MUSICAL\\_INSTRUMENT](https://www.researchgate.net/publication/317003381_MODAL_ANALYSIS_OF_A_HYPERELASTIC_MEMBRANE_FOR_THE_DEVELOPMENT_OF_A_MUSICAL_INSTRUMENT) Acesso em : 28 out. 2023.

BOZZO, L. R. **Análise experimental da aproximação do amortecimento viscoso de Rayleigh em uma estrutura tubular em catenária submetida a vibração**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Naval) Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, 2023.

BRASIL. Casa Civil. **Decreto. 10980**. 25 de fevereiro de 2022. Promulga a Convenção Internacional para Controle e Gerenciamento de Água de Lastro e Sedimentos de Navios. Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=DEC&numero=10980&ano=2022&ato=dfeo3ZE1kMZpWT722>. Acesso: 16 set. 2023

**FILTERSAFE**. Ballast & Marine Filters Engineered for Ballast Water Treatment (DOC-00300 – Ballast Water Treatment Brochure). Israel, 2023.  
MOSSHYDRO AS. Moss Hydro – Product Catalogue: Filters for Ballast Water Treatment. Drammen, Noruega, 2014.

**FILTERSAFE**. Industrial Product Catalog: Single Screen Filters – FS Series. Israel, 2020.

FORTE, R. C. **A gestão de lastro nas frotas dos principais armadores do mundo**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Naval) – Centro Tecnológico Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2019.

GOMES, F. S. **Fotocatálise heterogênea usando nanocompósito celulose/TIP2 para redução de impurezas e bioinvasões da água de lastro**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Naval) - Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

GÜNEY, C. B. Ballast water problem: current status and expected challenges. **Marine Science and Technology Bulletin**, [ou se coloca dados aqui, como v., n.,

intervalo de páginas – ou – se coloca Disponível e Acesso depois da data.].dez. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Ibama**. 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br>. Acesso: 16 out. 2023.

JANG, Pung-Guk; HYUN, Bonggil; SHIN, Kyoungsoon. **Ballast water treatment performance evaluation under real changing conditions**. Journal of Marine Science and Engineering, 2020.

LaVALLEE, G. **How Flow and Vibration Affect Filter Performance**. Machinery Lubrication, 2014.

LOPES, E.D.C. **Análise dinâmica não linear de pisos mistos considerando-se os efeitos da interação parcial e das ligações viga-coluna e viga-viga**. Tese de Doutorado, Departamento de engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2012

MACEDO, L V. **Estruturas mecânicas e de veículos**. Notas de aula. Disciplina de Estruturas Mecânicas e de Veículos. 6 – Análise Modal e Método de Superposição Modal. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. set. 2020. 22 Slides, color. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5716016/mod\\_resource/content/2/PME3543\\_2020\\_06\\_An%C3%A1lise%20Modal%20e%20Superposi%C3%A7%C3%A3o%20Modal.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5716016/mod_resource/content/2/PME3543_2020_06_An%C3%A1lise%20Modal%20e%20Superposi%C3%A7%C3%A3o%20Modal.pdf). Acesso em: 03 out. 2023.

MARINHA DO BRASIL. **Brasil segue diretrizes internacionais para o controle de água de lastro**. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/agenciadenoticias/brasil-segue-diretrizes-internacionais-para-o-controle-de-agua-de-lastro>. Acesso em: 13 set. 2023.

MEDEIROS, D. **Avaliação de riscos da introdução de espécies marinhas exóticas por meio de água de lastro no Terminal Portuário de Ponta Ubu (ES)**. 2004. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2004.

MOLINER, L. **Estudo do comportamento vibratório de uma embarcação em escala reduzida**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Naval) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2014.

NOGUEIRA, R. C. **Método padronizado para criação de modelo CAD 3D**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade de Taubaté, Taubaté, 2020.

**NORMAN-20**. Normas da autoridade marítima sobre poluição hídrica causada por embarcações, plataformas e suas instalações de apoio. Diário Oficial da União, 2022. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/dpc/sites/www.marinha.mil.br.dpc/files/NORMAM-20-3aREV-MOD.1-10AGO22-REVISADO---LIMPA.pdf>. Acesso em: 28 out. 2023.

NUÑER, A. Proliferação de espécies invasoras de mexilhão afeta hidrelétricas. [Entrevista concedida a] Patrícia Figueiredo. **Jornal g1**. Disponível em: <https://g1.globo.com/natureza/desafio-natureza/noticia/2019/04/26/proliferao-de-especie-invasora-de-mexilhao-afeta-hidreletricas.ghtml> Acesso em: 28 out. 2023.

PEREIRA, N. N. **Alternativas de tratamento da água de lastro em portos exportadores de minério de ferro**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

PEREIRA, N.N. **Água de lastro: gestão e controle**. São Paulo: Blucher, 2018.

**POOL SHOP PISCINAS LTDA**. Tabela de seleção de bombas e motobombas. 2011. 64 p. Apresentação disponibilizada em Slideshare. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/slideshow/tabela-de-seleo-de-bombas-emotobombas/13223162>. Acesso em: 18 nov. 2025.

PREUSS, T. S. **Apresentação do cálculo das características necessárias à seleção de uma bomba para o sistema de lastro de um navio porta-contêiner**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

RAO, S. S. **Vibrações mecânicas**. Revisor técnico: José Juliano de Lima Junior. Tradução: Arlete Simille. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2018

SANT'ANNA, R. 2007. **Análise de Acidente com Rotor: modelagem e simulação**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SUGANTHI, S. Finite element analysis of three-stage micro-sieves based microfiltration technique. 2022. **Journal of king Saud University - Science**, [faltam dados aqui, ]nov. 2022.

TAKATA, K.; TANIDA, K. Structure of shear-enhanced flow on membrane surface with horizontal vibration and its effect on filtration performance. 2018. **Chemical Engineering Research and Design**, mar. 2018.

ZANELLA, T. V. **Água de lastro e bioinvasão no Brasil: uma análise do posicionamento do Brasil frente ao risco de bioinvasão de espécies exóticas via água de lastro dos navios**. 2015. Tese (Doutorado em Ciências Jurídicas Internacionais e Europeias) – Faculdade de Direito, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015.