

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA CIVIL**

**ERLI RAQUEL ZORTEA ANDRETTA**

**ESTUDO NUMÉRICO DE PROBLEMAS ACOPLADOS**  
**ENVOLVENDO A RESPOSTA DINÂMICA DAS**  
**ESTRUTURAS**

**PATO BRANCO**

**2017**

**ERLI RAQUEL ZORTEA ANDRETTA**

**ESTUDO NUMÉRICO DE PROBLEMAS ACOPLADOS  
ENVOLVENDO A RESPOSTA DINÂMICA DAS  
ESTRUTURAS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Análise de Estruturas.

Orientador(a): Prof. Dr. Francisco Augusto Aparecido Gomes

Coorientador (a): Prof. Dr. Paulo Rogerio Novak

**PATO BRANCO**

**2017**

A555e Andretta, Eri Raquel Zortea.  
Estudo numérico de problemas acoplados envolvendo a resposta  
dinâmica das estruturas / Eri Raquel Zortea Andretta. -- 2017.  
108 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Augusto Aparecido Gomes  
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Rogério Novak  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Pato Branco, PR, 2017.  
Bibliografia: f. 93 – 95.

1. Pórtico. 2. Análise modal. 3. Interação fluido-estrutura. I. Gomes,  
Francisco Augusto Aparecido, orient. II. Novak, Paulo Rogério, coorient. III.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 22. ed. 624

Ficha Catalográfica elaborada por  
Maria Juçara Vieira da Silveira CRB-9/1359  
Biblioteca da UTFPR Campus Pato Branco



---

## TERMO DE APROVAÇÃO Nº 15

### Título da Dissertação

***"Estudo Numérico de Problemas Acoplados Envolvendo a Resposta Dinâmica em Estruturas."***

### Autora

**Erli Raquel Zortea Andreatta**

Esta dissertação foi apresentada às 8h20-mim do dia 13 de dezembro de 2017, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL- Linha de pesquisa em Materiais E Engenharia De Estruturas, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. A autora foi arguida pela Banca Examinadora abaixo assinada, a qual, após deliberação, considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Francisco Augusto Aparecido Gomes  
UTFPR/PB  
Presidente

Prof. Dr. Diego ~~Rizzotto Rozetto~~  
UTFPR/PB  
Examinador

Prof. Dr. Rogério ~~Carrazedo~~  
USP-São Carlos  
Examinador

Visto da Coordenação

**Prof. Dr. Ney Lyzandro Tabalipa**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil- PPGEC

**O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do PPGEC**

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho ao meu esposo Altair e  
ao meu filho Pedro Antônio.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por dar coragem, persistência, força e saúde para superar todas as dificuldades e desafios.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PPGEC, pela oportunidade de realização desta dissertação que é de fundamental importância para minha evolução profissional.

Agradeço ao meu professor orientador Prof. Dr. Francisco Augusto Aparecido Gomes, pelo tempo dedicado, por me ajudar, por dividir os seus conhecimentos e ter a virtude de ser um verdadeiro mediador.

Agradeço ao meu coorientador Prof. Dr. Paulo Rogerio Novak pelo auxílio nos procedimentos experimentais e demais orientações, muito obrigado.

Também agradeço as contribuições do professor Dr. Diego Rizzotto Rossetto, muito obrigado.

Aos meus pais, pela educação, pelo incentivo de sempre estudar para se tornar uma pessoa cada vez melhor, meu muito obrigado.

Ao meu marido e meu filho, por não me deixar desistir, pela compreensão, pela paciência nos momentos difíceis, minha ausência, um muito obrigado, vocês são muito importantes em minha vida.

A Justina Andretta Marsango por cuidar do meu filho com muito amor e carinho em meus momentos de ausência.

A todos os que colaboraram com o meu trabalho meus amigos: Rodrigo Camicia, Maurício Pegoraro, Maurício Benetti, Debora Simon meu muito obrigado.

O autor gostaria de agradecer a Capes e a Fundação Araucária pelo auxílio financeiro, na forma de bolsa de mestrado relacionado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, câmpus de Pato Branco.

## RESUMO

ANDRETTA, Erli Raquel Zortea. Estudo numérico de problemas acoplados envolvendo a resposta dinâmica das estruturas. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

No dimensionamento de um projeto estrutural, que é necessário quantificar a ação de vento sobre uma estrutura, muitas incertezas ainda envolvem o comportamento e desempenho das edificações, tornando-se difícil ao engenheiro calculista prever a verdadeira carga a ser utilizada. Entender este comportamento possibilita a prevenção de efeitos danosos na estrutura, bem como, aumentar sua vida útil e diminuir patologias. Neste trabalho realizou-se um estudo para confecção de um pórtico metálico soldado de quatro pavimentos, para realização de ensaios experimentais e computacionais para verificar o comportamento dinâmico da estrutura exposta a ação do escoamento do fluido. Para os ensaios experimentais da análise modal, o pórtico foi considerado engastado, onde se buscou identificar os modos de vibrar de flexão. As avaliações computacionais executadas neste trabalho empregam modelos de elementos finitos e volumes finitos. Na análise modal realizada através de simulação, foi possível identificar alguns modos de flexão, os quais foram comparados com os realizados experimentalmente, apresentando uma boa correlação, validando o modelo. Realizou-se a simulação de escoamento de fluido incidindo sobre o pórtico metálico, possibilitando verificar a resposta da estrutura quando exposta a este tipo de escoamento.

Palavras-chave: Pórtico, análise modal, interação fluido-estrutura.

## **ABSTRACT**

In the design of a structural design, which is necessary to quantify the wind action on a structure, many uncertainties still involve the behavior and performance of the buildings, making it difficult for the calculating engineer to predict the true load to be used. Understanding this behavior enables the prevention of harmful effects on the structure, as well as increasing its useful life and reducing pathologies. In this work a study was carried out to prepare a welded metallic portico of four floors, to perform experimental and computational tests to verify the dynamic behavior of the exposed structure to the action of the fluid flow. For the experimental tests of the modal analysis, the portico was considered set, where it was sought to identify the vibration modes of flexion. The computational evaluations performed in this work use models of finite elements and finite volumes. In the modal analysis performed through simulation, it was possible to identify some modes of flexion, which were compared with those performed experimentally, presenting a good correlation, validating the model. The fluid flow simulation was performed, focusing on the metallic portico, making it possible to verify the structure response when exposed to this type of flow.

**Keywords:** Portico, modal analysis, fluid-structure interaction.

## LISTA DE ABREVIATURAS

FEA	Análise dos Elementos Finitos
FRF	Função Resposta Frequência
MEF	Método de Elementos Finitos
MEC	Método de Elementos de Contorno
RFP	Ractional Fractional Polynomial
PPGEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
FSI	Interação Fluido-Estrutura (do inglês: "Fluid-Structure Interaction")

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Análise teórica de vibração.....	20
Figura 2 - Análise experimental de vibração.....	21
Figura 3 - Desastre na ponte Tacoma Narrows, vibração induzida pelo vento.....	28
Figura 4 - Modos de vibrar de uma placa à flexão.....	28
Figura 5 - Modos de vibrar de uma placa à torção.....	28
Figura 6 - Diagrama de blocos de uma FRF.....	29
Figura 7 - Sinais de excitação e suas respostas.....	31
Figura 8 - Domínio do fluido no espaço e sua fronteira.....	33
Figura 9 - O vetor normal $n$ e dois vetores ortonormais $t_1$ e $t_2$ .....	36
Figura 10 - Limites externos (entrada, saída e lado).....	37
Figura 11 - Função de aproximação por partes.....	39
Figura 12 - Representação de um domínio bidimensional por uma coleção de triângulos e quadriláteros.....	40
Figura 13 – Discretização utilizando elementos triangulares.....	41
Figura 14 - Elemento triangular.....	41
Figura 15 - Elemento tetraédrico.....	42
Figura 16- Domínio discretizado em triângulos e quadriláteros.....	42
Figura 17 - Elemento quadrilateral.....	43
Figura 18 - Elemento hexaédrico.....	43
Figura 19 - Modelo físico do edifício. (a) Vista na direção da maior inércia; (b) Vista superior.....	46
Figura 20 - Modelo físico do edifício: (a) Vista na direção menor inércia; (b) Vista na direção da maior inércia; (c) Vista superior.....	47
Figura 21 - Vista isométrica pórtico soldado.....	48
Figura 22 - Garantia esquadro da estrutura.....	49
Figura 23 - Montagem final do pórtico.....	49
Figura 24 - Massa fixa no último pavimento, incluindo acessórios.....	50
Figura 25 - Preparação do pórtico soldado.....	50
Figura 26 - Representação do teste de impacto com as ferramentas e equipamentos utilizados.....	52
Figura 27 - Representação do experimento montado para o teste de impacto no pórtico soldado.....	52

Figura 28 - Martelo de impacto utilizado no experimento. ....	53
Figura 29 - Cera para ancoragem do acelerômetro.....	54
Figura 30 - Posição do acelerômetro. ....	55
Figura 31 - Sentido da força de excitação. ....	55
Figura 32 - Analisador de sinais. ....	56
Figura 33 - Parâmetros de aferição para os canais de entrada e saída. ....	57
Figura 34 - Parâmetros pórtico. ....	59
Figura 35 - Gráfico de Frequências Naturais do pórtico soldado resultados experimentais. ....	61
Figura 36 - Malha tetraedros aresta 5,0 mm, (a) Vista isométrica, (b) Vista de topo. ....	62
Figura 37 - Malha tetraedros aresta 4,0 mm, (a) Vista isométrica, (b) Vista de topo. ....	62
Figura 38 - Malha tetraedros aresta 3,0 mm, (a) Vista isométrica, (b) Vista de topo. ....	63
Figura 39 - Identificação dos pontos. ....	64
Figura 40 - FRF experimental (Ponto 3). ....	64
Figura 41 - FRF experimental (Ponto 13). ....	65
Figura 42 - FRF experimental (Ponto 45). ....	65
Figura 43 - Centro de Massa (13,080 kg) Pórtico Soldado. ....	66
Figura 44 - Pórtico primeiro modo, malha 3,00 mm. ....	67
Figura 45 - Pórtico segundo modo, malha 3,00 mm. ....	67
Figura 46 - Pórtico terceiro modo, malha 3,00 mm.....	68
Figura 47 - Pórtico quarto modo, malha 3,00 mm. ....	68
Figura 48 - Pórtico quinto modo, malha 3,00 mm. ....	69
Figura 49- Pórtico sexto modo, malha 3,00 mm. ....	69
Figura 50 - Deslocamento em relação à posição inicial, (a) primeiro modo; (b) segundo modo. .....	70
Figura 51 - Deslocamento em relação à posição inicial, (a) terceiro modo, (b) quarto modo. ....	70
Figura 52 - Comparação entre os modos encontrados experimentalmente e os simulados. ....	71
Figura 53 - Geometria da superfície. ....	74
Figura 54 - Condições de contorno da superfície e do cilindro.....	74
Figura 55 - Malha. ....	75
Figura 56 - Parâmetros para determinação da malha. ....	75
Figura 57 - Malha gerada nas proximidades de interesse.....	76
Figura 58 - Coeficiente de arrasto x tempo. ....	76
Figura 59 - Coeficiente de Sustentação x Tempo.....	77
Figura 60 - Escoamento do fluido e contato com o cilindro com 1,0 segundo de simulação. ....	77

Figura 61 - escoamento do fluido e contato com o cilindro com 2,0 segundos de simulação.	78
Figura 62 - escoamento do fluido e contato com o cilindro com 2,5 segundos de simulação.	78
Figura 63 - Geometria tridimensional. ....	79
Figura 64 - Representação condições de contorno. ....	80
Figura 65 - Representação do escoamento Shear Stress Transport. ....	81
Figura 66 - Geometria fluido/placa. ....	82
Figura 67 - Condições de Contorno da geometria. ....	82
Figura 68 - Incidência do fluido sobre a placa 10,00 m/s. ....	83
Figura 69 - Incidência do fluido sobre a placa 80,00 m/s. ....	83
Figura 70 - Deformação total placa. ....	84
Figura 71 - Comparativo resultados experimentais e simulados. ....	86
Figura 72 - Apresentação das condições de contorno. ....	87
Figura 73- Obstáculos e fluido para simulação. ....	87
Figura 74 - Comportamento do fluido incidindo sobre obstáculos e pórtico. ....	88
Figura 75- Disposição dos vetores. ....	88
Figura 76 - Linhas para explicar o comportamento do escoamento. ....	89
Figura 77 - Deformação provocada no pórtico. ....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Posicionamento da massa de 6,50 kg nos pavimentos. ....	45
Tabela 2 - Aumento da massa para o 5º pavimento. ....	46
Tabela 3 - Propriedades do aço ASTM A36.....	47
Tabela 4 - Massa dos Pórticos. ....	48
Tabela 5- Parâmetros de ajuste do Martelo de Impacto e do Acelerômetro.....	57
Tabela 6 - Configurações para gravação do sinal.....	57
Tabela 7 - Pontos de medição definidos na função caminho do experimento. ....	58
Tabela 8 - Resultados da Análise Modal do Pórtico Soldado no software ANSYS. ....	60
Tabela 9 - Comparativo dos resultados da Análise Modal software ANSYS e Experimental. ....	61
Tabela 10 - Número de nós e elementos correspondentes para cada malha.....	63
Tabela 11 - Descrição dos modos de vibração do pórtico metálico. ....	72
Tabela 12 - Estudo de malha caso 01. ....	85
Tabela 13 - Estudo de malha caso 02. ....	85
Tabela 14 - Estudo de malha caso 03. ....	85

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS .....	18
<b>1.1.1</b>	<b>Geral</b> .....	<b>18</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Específicos</b> .....	<b>18</b>
1.2	CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO .....	18
<b>2</b>	<b>DINÂMICA DAS ESTRUTURAS</b> .....	<b>20</b>
2.1	ANÁLISE MODAL .....	20
2.2	MÉTODO DA SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DIFERENCIAL .....	22
2.3	MÉTODO RFP ( <i>RATIONAL FRACTIONAL POLYNOMIAL METHOD</i> ) .....	25
2.4	MODOS DE VIBRAR.....	27
2.5	MEDIÇÃO FRF .....	29
<b>2.5.1</b>	<b>Força de excitação</b> .....	<b>29</b>
<b>3</b>	<b>EQUAÇÕES BÁSICAS E METODOLOGIA NUMÉRICA</b> .....	<b>32</b>
3.1	EQUAÇÕES BÁSICAS DO PROBLEMA .....	32
<b>3.1.1</b>	<b>Escoamento</b> .....	<b>32</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Equações de <i>Navier-Stokes</i> para escoamentos incompressíveis</b> .....	<b>33</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Algumas condições de contorno específicas</b> .....	<b>35</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Número de Reynolds</b> .....	<b>37</b>
3.2	METODOLOGIA NUMÉRICA.....	38
<b>3.2.1</b>	<b>Método dos Elementos Finitos</b> .....	<b>39</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Método dos Volumes Finitos</b> .....	<b>43</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>44</b>
4.1	PROCEDIMENTO DO TESTE.....	45
4.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	51
4.3	FORÇA DE EXCITAÇÃO .....	51
4.4	TESTE DE IMPACTO .....	51
4.5	MARTELO DE IMPACTO .....	52
4.6	ACELERÔMETRO .....	54
4.7	ANALISADOR DE SINAIS .....	56
4.8	<i>SOFTWARE</i> DE ANÁLISE .....	56
4.9	PARÂMETROS ANÁLISE MODAL NO <i>SOFTWARE</i> ANSYS .....	59
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>60</b>

5.1	ESCOAMENTO EM TORNO DE UM CILINDRO – BIDIMENSIONAL .....	72
5.2	ESCOAMENTO EM TORNO DE UMA ESFERA .....	79
5.3	ESTUDO DE CASO – TRIDIMENSIONAL EM TORNO DE UMA PLACA .....	81
5.4	ANÁLISE PÓRTICO TRIDIMENSIONAL .....	84
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>91</b>
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	92
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>93</b>
<b>8</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>96</b>
8.1	ANEXO 1 – PROCEDIMENTO SIMULAÇÃO ANSYS ANÁLISE MODAL.....	96
8.2	ANEXO 2 – PROCEDIMENTO SIMULAÇÃO ESCOAMENTO .....	100

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente a área de Engenharia de Estruturas possui um desafio de projetar elementos para vãos cada vez maiores e expostos à ação de forças externas variáveis.

ABNT NBR 6118/2014 Projeto de Estruturas de Concreto Procedimento preconiza que as ações a considerar na análise de uma estrutura são a influência de todas as ações que venham a produzir efeitos significativos para a segurança da estrutura em averiguação, considerando os possíveis estados limites últimos e os de serviço (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 6118, 2014).

Na concepção estrutural de uma edificação devem ser consideradas as ações do vento, conforme apresenta a ABNT NBR 6123/1988 - Forças Devidas ao Vento em Edificações. A referida norma define as partes da edificação a considerar na determinação das ações, levando em conta características construtivas ou estruturais. Edificações com pouca rigidez na direção perpendicular à direção do vento apresentam pouca capacidade de redistribuição de cargas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 6123, 1988).

Muitas edificações como estruturas de fábricas, galpões possuem uma grande área de contato entre a ação do vento e sua geometria, desta forma, na ocorrência de ventos fortes, os mesmos podem provocar diversos efeitos danosos e destruição das estruturas.

Na data de 20 de abril de 2015 a cidade de Xanxerê-SC, foi atingida por um tornado, onde grande parte da cidade foi afetada. Segundo INMET – Instituto Nacional de Meteorologia os ventos que formaram o tornado podem ter variado de 100 km/h até 330 km/h. As cinco torres de energia que haviam sido dimensionadas para suportar velocidade do vento de 200 km/h, que desabaram. Comparando esta velocidade com o indicado na norma ABNT NBR 6123/1988, temos para região oeste de Santa Catarina e Sudoeste do Paraná uma velocidade de 45 m/s, sendo que na data do sinistro registrado em Xanxerê – SC a velocidade estima-se que chegou a 55,56 m/s, com efeito catastrófico (CORREIO DO ESTADO, 2015).

Na indústria onde ainda tem-se máquinas e equipamentos antigos sem qualquer tipo de amortecimento, é comum encontrarmos a presença de vibração em lajes, causando efeitos extremamente danosos aos elementos estruturais.

Em silos de armazenagem de grãos, onde se tem grande altura e sua geometria em formato de cilindro, também existe a preocupação no momento do dimensionamento da ação do vento sobre os mesmos.

Problemas de vibração estrutural seguem apresentando riscos e limitando a produção de projetos na área de Engenharia. Existem várias estruturas, como pontes suspensas, onde a

integridade estrutural é ainda uma grande preocupação, necessitando desta forma um conhecimento profundo e preciso de características dinâmicas da estrutura (EWINS, 2000).

O estudo da Interação Fluido-Estrutura (do inglês: "Fluid-Structure Interaction", FSI) impõe severas dificuldades aos métodos analíticos em função das não-linearidades e da natureza dependente do tempo presentes no problema físico. Tais problemas representam uma classe de aplicações com total mutualidade entre os mecanismos de ação do fluido e a resposta da estrutura, isto é, o comportamento do escoamento depende da forma da estrutura e irá ditar, de forma abrangente, seu movimento. A caracterização do movimento, tal como a predição de parâmetros de deslocamento dependem das forças impostas pelo fluido ao escoar pela superfície da estrutura, agindo de tal forma a possibilitar um estudo detalhado de possíveis fenômenos físicos danosos à estrutura. Esse estudo é baseado na análise dos modos de vibrar da estrutura.

As aplicações são as mais diversas e a teoria é vastíssima, podendo ser elucidada com alguns exemplos cujo a FSI caracteriza formalmente o modelo de solução: vibração de asas de aviões, deflexão de pás de turbinas eólicas, o enchimento dos airbags de automóveis, dinâmica de pára-quedas, movimento (balanço) de navios, plataformas offshore, o bombeamento de sangue pelos ventrículos do coração humano, acompanhada pela abertura e fechamento das válvulas do coração, dinâmica arteriais em aneurismas cerebrais, entre outros.

A caracterização dinâmica da estrutura pode ser realizada pelo estudo dos modos de vibrar da mesma. Esse estudo possibilita a obtenção da matriz de amortecimento, bem como, a obtenção dos modos de vibrar da estrutura. Isto possibilitará o entendimento dos fatores nocivos a determinadas estruturas, verificando se necessário tomar medidas preventivas que podem, a longo prazo, viabilizar a longevidade da estrutura, até mesmo vigorar novas técnicas de construção que possam considerar de forma abrangente a minimização dos efeitos nocivos à estrutura frente às vibrações nela imposta.

Tendo em vista que na engenharia de estruturas é fundamental conhecer as frequências naturais e identificar como elas podem atingir uma estrutura quando estas forem excitadas por forças externas, no presente trabalho foi realizada uma análise modal de um pórtico metálico tridimensional de quatro pavimentos utilizando o método *Rational Fraction Polynomial Method* (RFPM), a fim de identificar os modos de vibrar desta estrutura, bem como, as frequências naturais dos primeiros modos.

A análise de frequências naturais de uma estrutura está ligada a parâmetros, como: massa, rigidez e amortecimento. Foi utilizado o software ANSYS para realização de análise modal e do problema acoplado fluido-estrutura.

Os ensaios foram realizados numa geometria que consiste em um pórtico de quatro pavimentos representando um prédio. Os andares são de chapas de aço 194,00 x 154,00 x 1,20 mm, correspondente a comprimento, largura e espessura. Os pilares e as vigas que dão sustentação à estrutura possuem espessura de 3,00 mm e largura de 10,00 mm variando o comprimento de cada peça em função da posição adotada. Todo o material utilizado é aço ASTM A36 e as ligações são todas soldadas. No último pavimento da estrutura temos uma massa de 13,08 kg.

Nas últimas décadas com o grande desenvolvimento tecnológico, criação de softwares, aumento na capacidade de processamentos de dados, é possível realizarmos computacionalmente a análise modal de estruturas que conhecemos as propriedades mecânicas com precisão.

O trabalho apresenta uma análise modal de um pórtico metálico soldado de quatro pavimentos, onde foram identificados os primeiros modos de vibrar da estrutura.

As simulações envolvendo o cilindro e a esfera tem como objetivo a caracterização do perfil de escoamento no entorno das geometrias utilizadas, isto é, a determinação de um padrão de escoamento. A caracterização do perfil de escoamento visa o estudo do coeficiente de arrasto, parâmetro principal na indução do movimento em estruturas sujeitas, por exemplo, a rajadas intensas de vento.

Uma vez conhecido o padrão de escoamento no entorno de geometrias simples, iniciou-se o desenvolvimento do domínio computacional, simulando a interação fluido-estrutura envolvendo o pórtico metálico tridimensional de quatro pavimentos.

A simulação do escoamento ao redor do cilindro e da esfera foi crucial para estabelecer o posicionamento das geometrias que estão à montante do pórtico. Estas geometrias têm por objetivo induzir a liberação de vórtices sobre o pórtico, cujo arrasto proporcionará o movimento do pórtico, resposta da ação do escoamento sobre a estrutura simulada.

A inserção destas geometrias a montante da estrutura simulada no canal de escoamento, tem a intenção de simular uma situação real na qual as estruturas estão expostas.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Geral

Realizar análise modal em um pórtico metálico tridimensional, objetivando a validação de um modelo computacional. Este modelo representa o estudo do problema da interação fluido-estrutura oriundo da resposta dinâmica do pórtico imposta pelo escoamento.

### 1.1.2 Específicos

- ✓ Realizar estudos bibliográficos para construir o protótipo de estrutura metálica soldada;
- ✓ Efetuar a análise modal experimental da estrutura de aço soldada em escala reduzida através do método RFP;
- ✓ Efetuar a análise modal numérica do protótipo utilizando o software ANSYS;
- ✓ Comparar os resultados determinados na análise modal numérica com os dados experimentais;
- ✓ Simular o protótipo com incidência de escoamento de fluido para validação do modelo computacional fluido-estrutura.

## 1.2 CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO

Para melhor disposição dos assuntos abordados, essa dissertação foi dividida em capítulos, cujos conteúdos apresentam-se detalhados a seguir:

**Capítulo 1 – Introdução:** Nesta seção é apresentado o assunto da dissertação, contextualização do problema. Além de elencar os objetivos gerais e específicos do trabalho.

**Capítulo 2- Dinâmica das Estruturas:** Uma breve revisão sobre análise modal, método RFP, modos de vibrar e medições FRF e outros conceitos considerados importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

**Capítulo 3 – Método de Elementos Finitos:** Elenca uma ideia básica do método, elementos, equações governantes da mecânica dos fluidos.

**Capítulo 4 – Procedimento Experimental:** Descreve todo o procedimento realizado, desde o projeto do pórtico, materiais, propriedades, ferramentas e equipamentos utilizados,

preparação do pórtico para o ensaio, processo do ensaio e obtenção dos resultados da análise modal.

**Capítulo 5 – Resultados:** Nessa seção apresentam-se os resultados e discussões das simulações e experimento realizado. Os resultados expostos são referentes à análise modal experimental e computacional, análise do comportamento do fluido quando incide sobre formas geométricas diversas, bem como, a ação que o mesmo provoca sobre o pórtico em análise neste trabalho.

**Capítulo 6 – Conclusão:** De maneira objetiva, são descritas as diversas conclusões obtidas neste trabalho. Na sequência são expostas sugestões para novas pesquisas para futuros trabalhos.

**Referências:** Autores utilizados como base neste trabalho.

**Anexos:** Este trabalho possui dois anexos, que explicam o processo de configuração da análise modal e escoamento de fluidos no ANSYS.

Para obtenção dos resultados do presente trabalho, foram utilizados os softwares comerciais Ansys® e Matlab®.

## 2 DINÂMICA DAS ESTRUTURAS

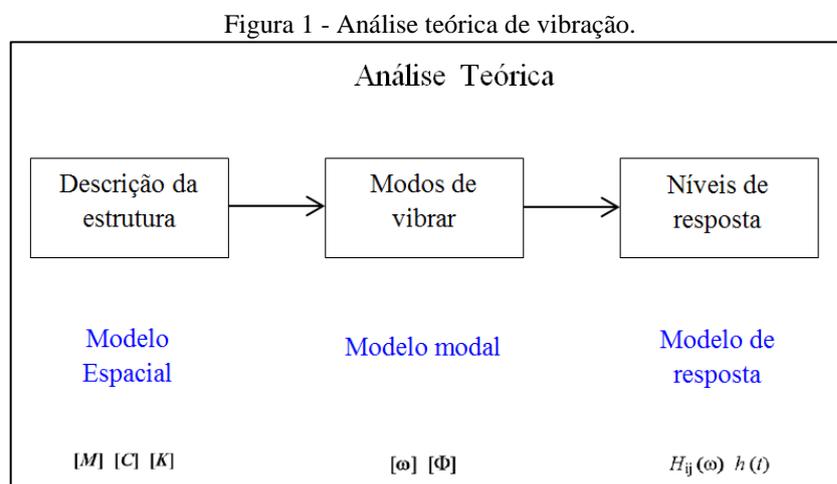
### 2.1 ANÁLISE MODAL

Para He Fu (2001), a análise modal é um procedimento para determinação das características dinâmicas essenciais de uma estrutura, frequências naturais, modos de vibração e fatores de amortecimento. A análise se baseia no fato de que a resposta de vibração de um sistema dinâmico, invariante no tempo, pode ser expressa como a combinação linear de um conjunto de movimentos harmônicos simples chamados de natural e modos de vibração. Cada modo é descrito em termos de seus parâmetros modais: frequência natural, amortecimento modal, padrão de deslocamento e características, como por exemplo: rigidez e material utilizado. Resumindo, a análise modal experimental envolve três etapas: preparação, medição de resposta de frequência e identificação de parâmetro modal.

A análise modal é um artifício composto de técnicas teóricas e experimentais para a determinação de um modelo matemático que expresse o comportamento dinâmico do objeto em estudo (estrutura), a fim de gerar os seus parâmetros modais, como frequências naturais, modos de vibração e fatores de amortecimento. Um método analítico muito utilizado para a determinação dos parâmetros anteriormente citados é o Método dos Elementos Finitos.

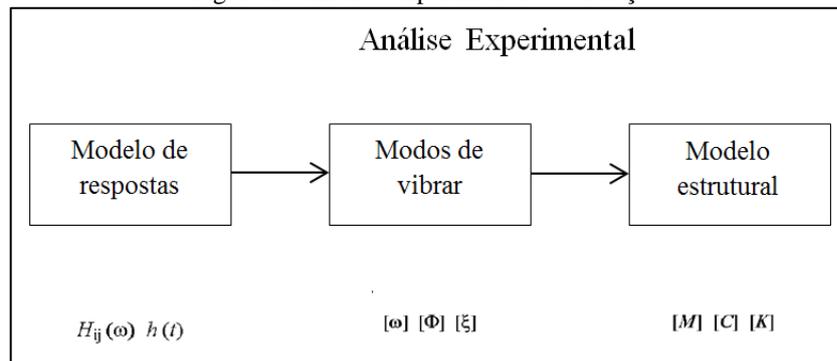
Quando não temos um modelo analítico, pode-se utilizar o Método Experimental para determinação dos parâmetros modais, ou até mesmo utilizar os dois.

Existem dois caminhos diferentes para analisar as vibrações de um sistema estrutural, o primeiro de forma teórico (Figura 1) e o segundo de forma experimental (Figura 2) (EWINS, 2000).



Fonte: Adaptado Ewins, 2000.

Figura 2 - Análise experimental de vibração.



Fonte: Adaptado Ewins, 2000.

Na análise modal teórica, como se pode analisar na Figura 1, primeiramente determina-se as propriedades físicas e geométricas do sistema a ser analisado, como a massa  $M$ , amortecimento  $C$  e a rigidez  $K$ . Na sequência defini-se o modelo modal, onde temos as frequências naturais  $\omega_k$ , modos de vibração  $\phi_k$  e os fatores de amortecimento  $\zeta$ . A partir da definição destes parâmetros modais é possível prever a resposta de um determinado sistema estrutural em função de uma excitação, que determinará um conjunto de respostas ao longo do tempo e de Funções Resposta de Frequência (FRFs) (ALMEIDA, 2010).

Na análise modal experimental é feito o contrário. Com as medidas experimentais, aplicam-se métodos para a obtenção dos parâmetros  $\omega_k$ ,  $\phi_k$ ,  $\zeta$  (ALMEIDA, 2010).

A análise modal experimental tem crescido de forma constante em popularidade desde o advento do analisador de espectro digital FFT (Transformada Rápida de Fourier) no início da década de 1970 (SCHWARZ e RICHARDSON, 1999, p. 1).

O teste de impacto foi desenvolvido durante o final de 1970, e tornou-se o teste modal muito utilizado até os dias atuais. O teste é rápido, conveniente e uma maneira econômica de encontrar os modos de vibrar nas estruturas (SCHWARZ e RICHARDSON, 1999, p. 5).

Os seguintes equipamentos são necessários para realizar um teste de impacto, segundo Schwarz e Richardson, 1999:

1. Um martelo de impacto com uma célula de carga anexada à sua cabeça para medir a força de entrada.
2. Um acelerômetro para medir a aceleração da resposta em um ponto fixo e direção.
3. Um analisador FFT de 2 ou 4 canais para calcular FRFs.
4. Software modal de pós-processamento para identificação de parâmetros e os modos de vibração.

## 2.2 MÉTODO DA SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DIFERENCIAL

A atuação de forças externas sobre uma estrutura fará que a mesma esteja sujeita a algum tipo de vibração forçada. Num sistema com  $n$  graus de liberdade, as equações de movimento que governam o comportamento do mesmo são fornecidas por um conjunto de  $n$  equações diferenciais de segunda ordem ordinárias acopladas. A solução das equações apresenta um grau mais complexo de solução quando se tem o aumento do número de graus de liberdade ou quando as forças de excitação são não determinísticas (PRAZZO, 2011, p.26).

Para problemas com estas características citadas acima, utiliza-se o método de análise modal para determinar sua solução.

No método de análise modal é utilizado o teorema de expansão e os deslocamentos das massas são expressos como uma combinação linear dos modos normais do sistema (MEIROVITCH, 2001, p. 350).

A equação de movimento para um sistema linear pode ser expresso pela equação diferencial de segunda ordem (equação do movimento), conforme (Ribeiro et al., 2005, p. 02).

$$Mx(t) + C\ddot{x}(t) + K\dot{x}(t) = f(t) \quad (1)$$

Onde temos:

$M$  = matriz de massa, de ordem  $N \times N$ ;

$C$  = matriz de amortecimento, de ordem  $N \times N$ ;

$K$  = matriz de rigidez, de ordem  $N \times N$ ;

$\ddot{x}$  = vetor das acelerações nas coordenadas generalizadas, de ordem  $N \times 1$ ;

$\dot{x}$  = vetor das velocidades nas coordenadas generalizadas, de ordem  $N \times 1$ ;

$x$  = vetor dos deslocamentos nas coordenadas generalizadas, de ordem  $N \times 1$ ;

$f$  = vetor das forças externas, de ordem  $N \times 1$ .

De acordo com Nunes. (p.16, 2006) a solução geral da equação do movimento é dada em termos da solução homogênea e da solução particular. A solução homogênea, para  $f(t)=0$  é da forma:

$$x(t) = X e^{st} \quad (2)$$

na qual,  $X$  e  $s$  são constantes. Substituindo a equação (2) na (1) e assumindo que a força externa é nula, tem-se:

$$(Ms^2 + Cs + K)Xe^{st} = 0 \quad (3)$$

A solução não trivial da equação (3) é calculada a partir das raízes da equação característica  $s_1$  e  $s_2$ .

$$s_{1,2} = -\frac{C}{2M} \pm \sqrt{\left(\frac{C}{2M}\right)^2 - \frac{K}{M}} \quad (4)$$

Ainda, conforme cita Nunes. (p.16, 2006), o valor das raízes  $s_1$  e  $s_2$  são dados em função dos parâmetros do modelo e são observadas as seguintes possibilidades:

- ✓ As forças de amortecimento governam o movimento e então o sistema é conhecido como superamortecido:  $\left(\frac{C}{2M}\right)^2 > \frac{K}{M}$ , então as duas raízes são reais e negativas;
- ✓ As forças elásticas e de inércia prevalecem, o sistema é conhecido como subamortecido:  $\left(\frac{C}{2M}\right)^2 < \frac{K}{M}$ , as duas raízes são complexas conjugadas com partes reais negativas;
- ✓ O sistema é criticamente amortecido:  $\left(\frac{C}{2M}\right)^2 = \frac{K}{M}$ , as duas raízes são iguais, reais e negativas.

Esta análise mostra que existe um parâmetro que define um limite entre o superamortecimento e o subamortecimento. Tal parâmetro é conhecido como constante de amortecimento crítico ( $C_c$ ), que é definido quando o termo dentro da raiz da equação (4) é igual a zero:

$$C_c = 2M\omega_n \quad (5)$$

Na qual:  $\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}}$  = Frequência natural não amortecida [rad/seg].

Com esta definição de amortecimento crítico, uma outra quantidade adimensional chamada de razão de amortecimento ( $\zeta$ ) é definida pela razão entre o coeficiente de amortecimento e o amortecimento crítico do correspondente sistema:

$$\zeta = \frac{C}{C_c} \quad (6)$$

Agora as raízes da equação característica podem ser escritas na forma:

$$s_{1,2} = (-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n \quad (7)$$

E o sistema pode ser classificado em função da razão de amortecimento  $\zeta$  :

- ✓ Sistema superamortecido:  $\zeta > 1$  ;
- ✓ Sistema criticamente amortecido:  $\zeta = 1$  ;
- ✓ Sistema subamortecido:  $\zeta < 1$  .

No caso particular de vibrações livres, excitadas por condições iniciais  $x(0)$  e  $\dot{x}(0)$ , a solução da equação (1) pode ser escrita no domínio do tempo em função da razão de amortecimento, da seguinte forma (Nunes, 2006):

Sistema superamortecido:

$$x(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left[ x(0)\cosh(\omega_n t\sqrt{\zeta^2 - 1}) + \frac{\dot{x}(0) + \zeta\omega_n x(0)}{\omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}} \sinh(\omega_n t\sqrt{\zeta^2 - 1}) \right] \quad (8)$$

Sistema criticamente amortecido:

$$x(t) = e^{-\omega_n t} [x(0)(1 + \omega_n t) + \dot{x}(0)t] \quad (9)$$

Sistema subamortecido:

$$x(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left[ x(0)\cos(\omega_n t\sqrt{1 - \zeta^2}) + \frac{\dot{x}(0) + \zeta\omega_n x(0)}{\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin(\omega_n t\sqrt{1 - \zeta^2}) \right] \quad (10)$$

No respectivo trabalho o sistema é o subamortecido, a excitação provoca um movimento que oscila diminuindo gradativamente sua amplitude até chegar novamente ao seu ponto de equilíbrio.

### 2.3 MÉTODO RFP (*RATIONAL FRACTIONAL POLYNOMIAL METHOD*)

Este método aplica a expressão do polinômio da fração racional diretamente para uma medida de FRF. Ele pode ser aplicado em qualquer faixa de frequência de dados, e particularmente nas proximidades de um pico de ressonância (SCHWARZ e RICHARDSON, 1999, p. 11).

As frações utilizadas neste método são as racionais e a função erro a ser atenuada é determinada de forma que o sistema de equações resultante seja linear, sem a necessidade de estimativas iniciais dos parâmetros modais (MASOTTI, 2013, p. 99).

O método RFP (*Rational Fractional Polynomial method*) é um método padrão de análise modal com domínio de frequência (EWINS, 2000, p. 335). A seguir apresenta-se a formulação deste método:

$$H(\omega) = \sum_{r=1,N} \frac{A_r}{(\omega_r^2 - \omega^2 + 2i\omega\omega_r\zeta_r)} \quad (11)$$

ou

$$H(\omega) = \frac{(b_0 + b_1(i\omega) + b_2(i\omega)^2 \dots + b_{2N-1}(i\omega)^{2N-1})}{(\alpha_0 + \alpha_1(i\omega) + \alpha_2(i\omega)^2 \dots + \alpha_{2N}(i\omega)^{2N})} = \frac{\sum_{k=0}^{2N-1} b_k(i\omega)^k}{\sum_{k=0}^{2N} \alpha_k(i\omega)^k} \quad (12)$$

Para IGLESIAS (2000, p.23), a diferença entre a FRF analítica de  $H(\omega)$  e a FRF experimental  $H_e(\omega)$  é determinada pela expressão matemática a seguir:

$$e_j = \frac{\sum_{k=0}^{2N-1} b_k(i\omega_j)^k}{\sum_{k=0}^{2N} \alpha_k(i\omega_j)^k} - H_e(\omega_j) \quad (13)$$

No entanto, a função de erro é linearizada trabalhando com as seguintes modificações do erro:

$$e'_j = e_j \sum_{k=0}^{2N-1} \alpha_k(i\omega_j)^k \quad (14)$$

Fazendo  $\alpha_{2N} = \mathbf{1}$ , levará:

$$e'_j = \sum_{k=0}^{2N-1} b_k (i\omega_j)^k - H_e(\omega_j) \left[ \sum_{k=0}^{2N-1} \alpha_k (i\omega_j)^k + (i\omega_j)^{2N} \right] \quad (15)$$

O vetor de erro é definido para todas as frequências medidas L:

$$\{E\} = \begin{Bmatrix} e'_1 \\ e'_2 \\ \vdots \\ e'_L \end{Bmatrix} \quad (16)$$

A equação (6) pode ser expressa na forma da matriz,

$$\{E\} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & (i\omega_1)^2 & (i\omega_1)^2 & \dots & (i\omega_1)^{2N-1} \\ \mathbf{1} & (i\omega_2)^2 & (i\omega_2)^2 & \dots & (i\omega_2)^{2N-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{1} & (i\omega_L) & (i\omega_L)^2 & \dots & (i\omega_L)^{2N-1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_{2N-1} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} H_e(\omega_1) & H_e(\omega_1)(i\omega_1) & \dots & H_e(\omega_1)(i\omega_1)^{2N-1} \\ H_e(\omega_2) & H_e(\omega_2)(i\omega_2) & \dots & H_e(\omega_2)(i\omega_2)^{2N-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ H_e(\omega_L) & H_e(\omega_L)(i\omega_L) & \dots & H_e(\omega_L)(i\omega_L)^{2N-1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_{2N-1} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} H_e(\omega_1)(i\omega_1)^{2N} \\ H_e(\omega_2)(i\omega_2)^{2N} \\ \vdots \\ H_e(\omega_L)(i\omega_L)^{2N} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

Desta forma, pode-se escrever um vetor erro da seguinte maneira:

$$\{E\}_{L \times 1} = [P]_{L \times 2N} \{b\}_{2N \times 1} - [T]_{L \times 2N} \{\alpha\}_{2N \times 1} - \{W\}_{L \times 1} \quad (18)$$

A referida função erro pode ser reduzida pelo método dos gradientes quadráticos, ou pelo método dos mínimos quadrados (IGLESIAS, 2000, p. 24).

## 2.4 MODOS DE VIBRAR

Modos de vibrar são características intrínsecas de uma estrutura. São determinados pelas propriedades do material, como massa, rigidez e amortecimento, e pelas condições de contorno da estrutura. Quaisquer alterações nas condições de contorno ou nas propriedades do material acarretam em mudanças no modo de vibrar (GERMANO, 2011, pg. 11).

Se as propriedades do material ou as condições de contorno de uma estrutura mudam, esses modos irão mudar. Por exemplo, se massa é adicionada a estrutura, ela irá vibrar de forma diferente, onde provavelmente, para este caso, sua frequência natural terá seu valor diminuído (GUILLAUME, 2002, pg. 03).

Toda vibração é uma combinação de força e ressonância. A vibração forçada pode ser devido a forças internamente geradas, desequilíbrios, cargas externas, excitação ambiente, entre outros. (SCHWARZ e RICHARDSON, 1999, p. 1).

Para determinação dos parâmetros modais experimentais, excita-se a estrutura e monitora-se o deslocamento dos pontos de interesse. Na sequência os dados devem ser analisados se estão dentro de parâmetros aceitáveis.

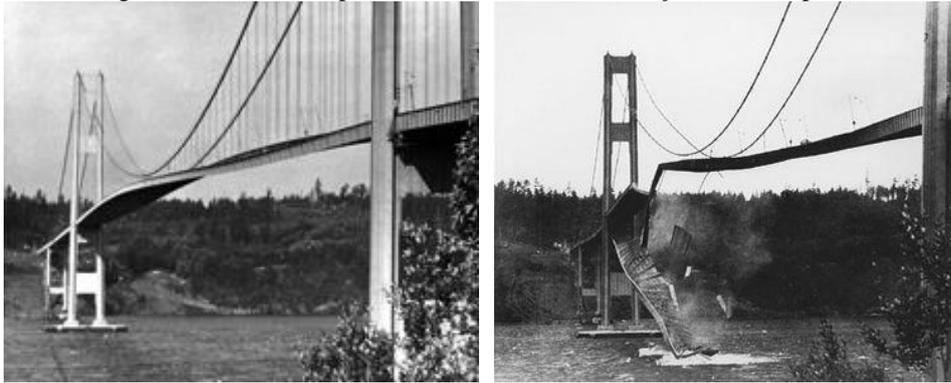
Os modos de menor frequência são os que apresentam maiores deformações. Mediante este fato, os efeitos causados por estes são os que provocam maiores consequências danosas e patologias nas estruturas.

As estruturas civis podem entrar em um fenômeno chamado de ressonância, onde pequenas forças, por exemplo, as ações do escoamento de um fluido, podem resultar em grandes deformações provocando danos e até levando ao colapso (PRAZZO, 2011, p.25).

O fenômeno da ressonância acontece quando as frequências das forças que agem no modelo de estudo se combinam com as frequências naturais do mesmo levando a grandes oscilações.

Em 07 de novembro de 1940, a ponte de Tacoma entrou em colapso devido à vibração induzida pelo vento, conforme ilustra Figura 3.

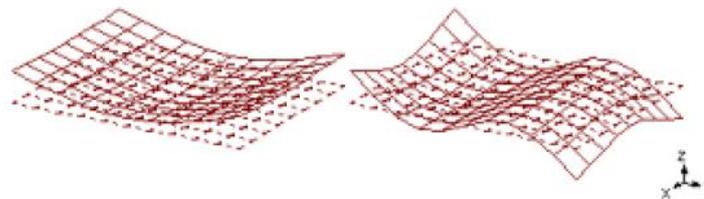
Figura 3 - Desastre na ponte Tacoma Narrows, vibração induzida pelo vento.



Fonte: Adaptado de RAO (2008).

As geometrias apresentam modos de vibrar. Na Figura 4 são ilustrados alguns modos de vibrar de flexão para um corpo flexível, uma placa.

Figura 4 - Modos de vibrar de uma placa à flexão.

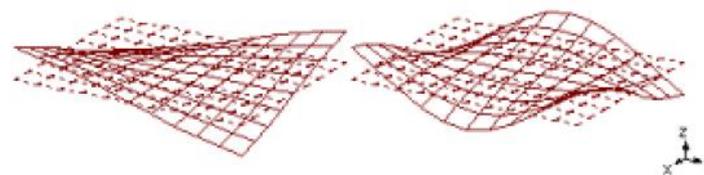


(a) Primeiro modo de flexão      (b) Segundo modo de flexão

Fonte: Adaptado Schwarz e Richardson, 1999.

Na Figura 5 são ilustrados alguns modos de vibrar de torção para um corpo flexível, uma placa.

Figura 5 - Modos de vibrar de uma placa à torção.

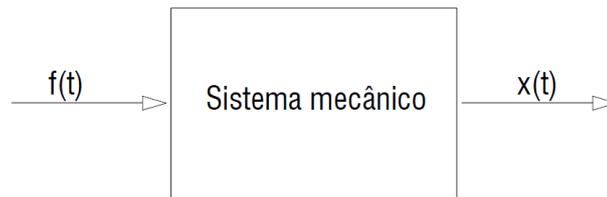


(a) Primeiro modo de torção      (b) Segundo modo de torção

Fonte: Adaptado Schwarz e Richardson, 1999.

O FRF descreve a relação entrada-saída entre dois pontos em uma estrutura em função da frequência. A Figura 6 representa um sistema com uma entrada de força  $f(t)$ , com saída de deslocamento  $x(t)$ , onde as duas estão em função do tempo (SCHWARZ e RICHARDSON, 1999, p. 2).

Figura 6 - Diagrama de blocos de uma FRF.



Fonte: Adaptado Schwarz e Richardson, 1999.

## 2.5 MEDIÇÃO FRF

Basicamente têm-se duas formas para medir vibração. O primeiro é aquele em que apenas um tipo de parâmetro é medido em níveis de resposta. O segundo são aqueles em que os parâmetros de saída, de entrada e de resposta são aferidos. Ambos os métodos de aferição, apresentam aplicações e grande parte dos equipamentos e ferramentas usadas utilizam-se destes casos (EWINS, 2000, p. 163).

O objetivo de verificar estas medidas na fase de realização de testes modais é medir os dados FRF, que são necessários para a análise modal na fase de modelagem. Este método é conhecido como SISO (*single-input, single-output*) ou SIMO (teste de entrada única, saída múltipla) (EWINS, 2000, p. 164).

A função de resposta de frequência (FRF) é uma aferição fundamental que possui as propriedades dinâmicas inerentes de uma estrutura mecânica. Parâmetros modais experimentais são obtidos a partir de um conjunto de medidas FRF (SCHWARZ e RICHARDSON, 1999, p. 2).

As medições realizadas neste trabalho se enquadram na primeira classificação, bem como nos ensaios realizados utilizou-se um ponto único de excitação de entrada.

### 2.5.1 Força de excitação

O método de excitação é importante para a realização de testes modais precisos. A precisão e a qualidade dos dados FRF dependem, entre muitos fatores, diretamente da escolha correta do método de excitação (HE e FU, 2001, p.147).

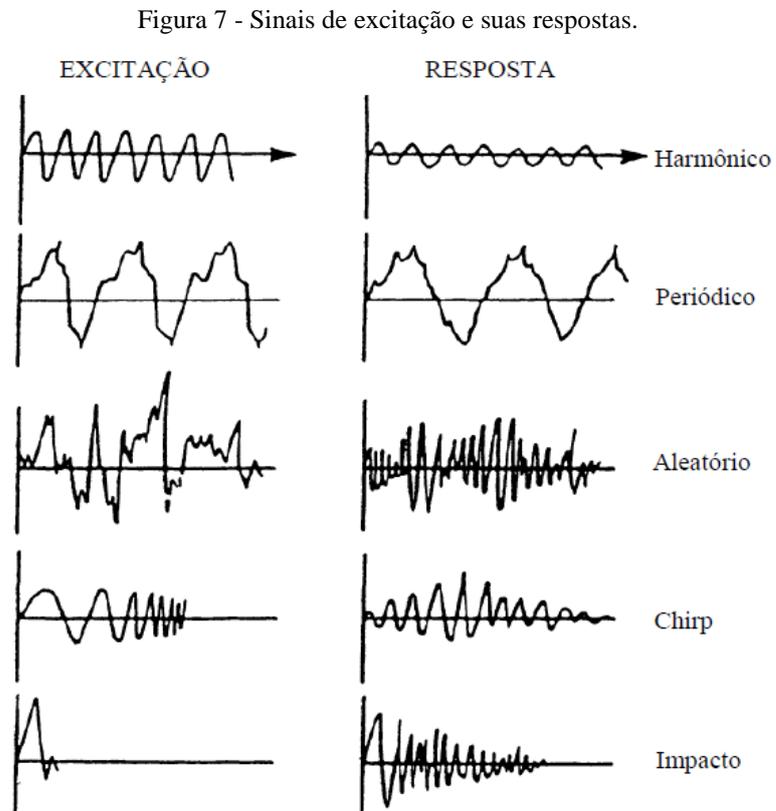
He e Fu (2001) apresentam diversos tipos de sinais de excitação que podem ser utilizados para determinação de testes modais:

O primeiro apresentado é o sinal senoidal de excitação, que é o método mais tradicional para realização de testes modais. A força contém uma única frequência por vez e a excitação varia de uma frequência para outra com um incremento determinado, permitindo que a estrutura realize uma vibração harmônica de cada vez. Essa excitação é efetiva para estruturas expostas a alto nível de vibração, para caracterizar a não-linearidade de uma estrutura, e para excitar modos de vibração normais de uma estrutura amortecida (HE e FU, 2001, p.147).

O segundo é o sinal de força por excitação aleatória, este contém todas as frequências dentro da faixa de frequência da estrutura excitada. Para uma estrutura que se comporta de forma não linear, a excitação aleatória tende a linearizar o comportamento dos dados de medição. A função de resposta de frequência derivada da medição de excitação aleatória será o FRF linearizado. Para a excitação aleatória nem o sinal de força nem a resposta são periódicos com histórico de tempo infinito dá origem a um erro chamado vazamento (HE e FU, 2001, p.148).

Na terceira forma de excitação tem-se a excitação por impacto, o tempo do sinal da força é um pulso não controlável de frequência. Em termos de sistema envolvido, a excitação do impacto é relativamente uma técnica simples de excitação em comparação com a excitação senoidal. É uma forma conveniente e muito prática para experimentos de campo e laboratório. Não tem conexão física entre a excitação e a estrutura, o teste de impacto evita o problema da interação entre eles. Isso significa que é possível medir quantidades de amortecimento precisas. As principais desvantagens da excitação de impacto são tão notáveis como suas vantagens. É difícil controlar o nível de força ou a faixa de frequência do impacto. Este pode afetar a relação sinal/ruído na medição, o que pode resultar em dados de má qualidade. O impacto geralmente não pode ser repetido de igual maneira (HE e FU, 2001, p.148).

A Figura 7 ilustra diversos tipos de excitação e suas respectivas formas de resposta.



Fonte: Ewins, 2001.

### 3 EQUAÇÕES BÁSICAS E METODOLOGIA NUMÉRICA

#### 3.1 EQUAÇÕES BÁSICAS DO PROBLEMA

##### 3.1.1 Escoamento

A parte da mecânica de fluidos que envolvem problemas acoplados fluido-estrutura é governada pelas equações de Navier-Stokes para escoamentos incompressíveis.

O estudo do movimento dos fluidos vem sendo realizado por muitos séculos, assim a mecânica dos fluidos buscou estudar o comportamento destes elementos muito antes do que a formulação matemática (FORTUNA, 2000, p. 19).

As equações que explicam o movimento de um fluido são complexas, sendo que a solução destas equações não é trivial. Assim, apesar dos vastos avanços na dinâmica de fluidos computacionais (CFD) e enormes avanços na capacidade computacional, soluções numéricas completas são limitadas (PAÏDOUSSIS, 2014, p. 25).

O estudo do movimento dos fluidos foi explicado matematicamente a partir do século XIX com as equações de Navier-Stokes. A solução analítica para meios contínuos desta equação é extremamente complexa quando sujeita a regiões arbitrárias com condições de contorno gerais, pois se tratam de equações diferenciais parciais (EDPs) não lineares. Com o surgimento do computador a partir dos anos de 1950, nasceu a ideia de buscar as soluções numéricas das equações de Navier-Stokes, utilizando técnicas computacionais, para obter variáveis como velocidade e pressão que contemplam o escoamento, surgindo desta forma a Dinâmica de Fluidos Computacional (*CFD – Computational Fluid Dynamics*), método utilizado para verificação de experimentos computacionais ou simulações numéricas de escoamentos (LIMA, p. 23, 2005).

A Dinâmica dos Fluidos Computacional é uma ferramenta muito utilizada para resolver problemas que utilizam escoamentos fundamentados em algoritmos numéricos das equações de transporte, conservação da massa e energia (VASCONCELLOS, et.al., 2014).

Na simulação computacional um grande desafio é atingir um elevado grau de precisão na discretização. Para atingir uma melhor representação do fenômeno físico é necessário o maior número possível de elementos que serão constituintes da malha. Quanto maior o número de elementos, maior será o tempo computacional exigido (CASTEJAN, 2011, p. 26).

A CFD utiliza métodos numéricos para determinar as grandezas de interesse no escoamento em pontos do domínio chamados de nós. Os principais métodos utilizados para

simulação numérica de escoamentos de fluidos são: Métodos de Diferenças Finitas (*FDM - Finite Difference Method*); Métodos de Diferenças Finitas baseado em Volumes de Controle (*CVFDM - Control Volume Finite Difference Method*); Método de Volumes Finitos (*FVM - Finite Volume Method*); Métodos de Elementos Finitos (*FEM - Finite Element Method*) e Métodos de Elementos Finitos baseado em Volumes de Controle (*CVFEM - Control Volume Finite Element Method*), (LIMA, p. 23, 2005).

### 3.1.2 Equações de *Navier-Stokes* para escoamentos incompressíveis

Para apresentar as equações de *Navier-Stokes*, considera-se o domínio  $\Omega_t \in R^n$ , onde  $n=2,3$ , como o domínio do fluido no espaço, com fronteira  $\Gamma_t$  no tempo  $t \in (0, T)$ , conforme ilustra a Figura 8. O  $t$  indica que o domínio do fluido no espaço depende do tempo. As equações de *Navier-Stokes* de escoamentos incompressíveis podem ser expressas como:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u} - \boldsymbol{\sigma}) - \rho \mathbf{f} = \mathbf{0} \quad (19)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (20)$$

em que,

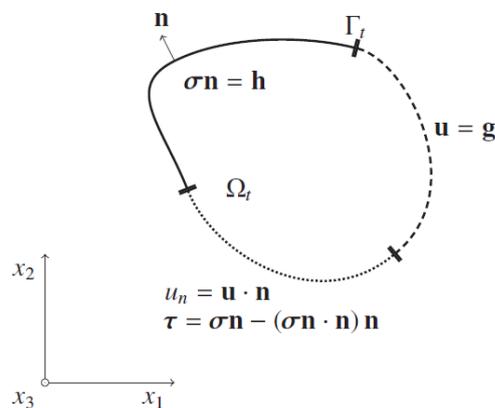
$\rho$  é a densidade do fluido;

$\mathbf{u}$  é a velocidade;

$\mathbf{f}$  é uma força externa;

$\boldsymbol{\sigma}$  é o tensor de tensão.

Figura 8 - Domínio do fluido no espaço e sua fronteira.



Fonte: Adaptado de Bazilevs, Takizawa e Tezduyar, 2013.

O tensor de tensão é definido por:

$$\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}, p) = -p\mathbf{I} + 2\mu\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}), \quad (21)$$

Onde:

$p$  é a pressão;

$\mathbf{I}$  é o tensor identidade;

$\mu$  é a viscosidade dinâmica;

$\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u})$  é o tensor taxa de deformação.

O tensor taxa de deformação é dado por:

$$\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) = \frac{1}{2}(\nabla\mathbf{u} + \nabla\mathbf{u}^T) \quad (22)$$

As equações (19) e (20) expressam o momento e o fluxo de massa. Conforme a equação (19), o balanço local de massa para escoamentos incompressíveis deve possuir campo de velocidade de divergência livre em cada ponto no espaço e no tempo, que também é conhecido como a restrição de incompressibilidade (BAZILEVS, et al. 2013).

Para escoamentos incompressíveis, podemos escrever a equação momento também como:

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) - \mathbf{f} \right) - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{0}, \quad (23)$$

Para a densidade constante e  $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$ , obtém-se:

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} - \mathbf{f} \right) - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{0}, \quad (24)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \mathbf{0}. \quad (25)$$

Neste caso, a equação do momento está escrita na chamada forma convectiva. A forma convectiva das equações de Navier-Stokes pode ainda ser simplificada usando a incompressibilidade. Assim:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}, p) = -\nabla p + \mu\Delta\mathbf{u}, \quad (26)$$

O que leva a:

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} - \mathbf{f} \right) + \nabla p - \mu\Delta\mathbf{u} = \mathbf{0}, \quad (27)$$

Assume-se uma base cartesiana fixa em  $\mathbb{R}^n$ , onde os índices  $i$  e  $j$  assumam os valores  $1, \dots, n$ . Em situações onde  $n=3$ , espaço tridimensional, denota-se  $u_i$  para o componente cartesiano  $i$  de  $u$ , e a diferenciação é expressa por vírgula. Além disso, pode-se usar a convenção de soma, onde repetição de índices resulta em um somatório.

$$u_{i,jj} = u_{i,11} + u_{i,22} + u_{i,33} = \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_3^2} \quad (28)$$

Usando a notação indicial, as equações de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis, conforme dado nas equações (19) e (20), pode ser reescrita como:

$$\rho(u_{i,t} + u_j u_{i,j} - f_i) - \sigma_{ij,j} = 0, \quad (29)$$

$$u_{i,i} = 0, \quad (30)$$

em que:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\mu\varepsilon_{ij} \quad (31)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (32)$$

em que  $\delta_{ij}$  é chamado de delta de *Kronecker* (i.e.,  $\delta_{ij} = 1$  se  $i = j$ , e  $\delta_{ij} = 0$  se  $i \neq j$ ).

Para completar a afirmação do problema da mecânica de fluidos, precisa-se especificar as condições de contorno.

$$u_i = g_i \text{ em } (\Gamma_t)_{gi}, \quad (33)$$

$$\sigma_{ij} n_j = h_i \text{ em } (\Gamma_t)_{hi}, \quad (34)$$

em que, para cada componente de velocidade  $i$ ,  $(\Gamma_t)_{gi}$  e  $(\Gamma_t)_{hi}$  são subconjuntos complementares da fronteira  $\Gamma_t$ ,  $n_i$ 's são os componentes do vetor normal da fronteira, enquanto que  $g_i$  e  $h_i$  são funções dadas.

### 3.1.3 Algumas condições de contorno específicas

A seguir são apresentadas as descrições detalhadas das condições de contorno que são mais utilizadas em simulações de mecânica de fluidos.

Em uma superfície sólida é conveniente dividir o vetor de velocidade em seus componentes normais e tangenciais. Para isso, juntamente com o vetor normal  $\mathbf{n}$ , definimos no espaço cartesiano tridimensional dois vetores tangenciais ortonormais  $\mathbf{t}_1$  e  $\mathbf{t}_2$ . Nesta nova base, as velocidades componentes do vetor tornam-se, conforme Figura 9:

$$u_n = \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}, \quad (35)$$

$$u_{t_1} = \mathbf{u} \cdot \mathbf{t}_1, \quad (36)$$

$$u_{t_2} = \mathbf{u} \cdot \mathbf{t}_2, \quad (37)$$

Para a condição de contorno de parede viscosa, tem-se:

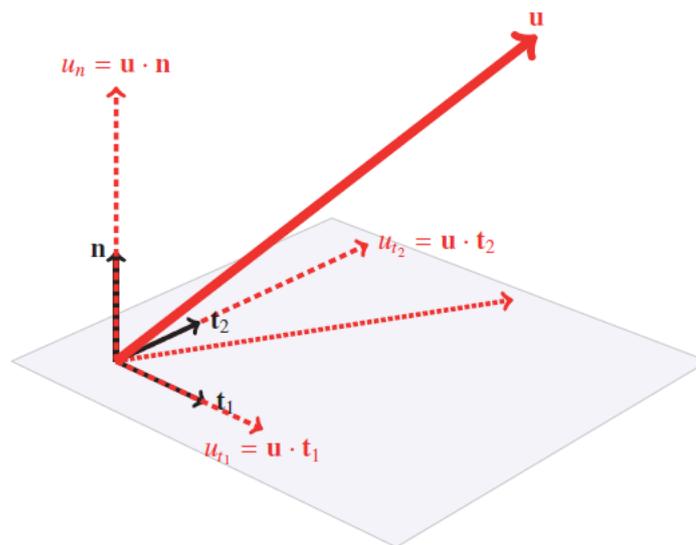
$$u_{t_1} = g_{t_1}, \quad (38)$$

$$u_{t_2} = g_{t_2}, \quad (39)$$

em que

$g_t$  são as velocidades tangenciais da superfície sólida. Isso resulta no chamado "anti-deslizamento" como condição de contorno.

Figura 9 - O vetor normal  $\mathbf{n}$  e dois vetores ortonormais  $\mathbf{t}_1$  e  $\mathbf{t}_2$ .



Fonte: Bazilevs, Takizawa e Tezduyar, 2013.

Outro caso de interesse são as condições de contorno em uma superfície fluida, a qual é livre para se deformar, ou seja, superfície livre. Nesse caso,

$$\boldsymbol{\sigma n} = -p_{atm} \mathbf{n}, \quad (40)$$

em que  $p_{atm}$  é a pressão atmosférica.

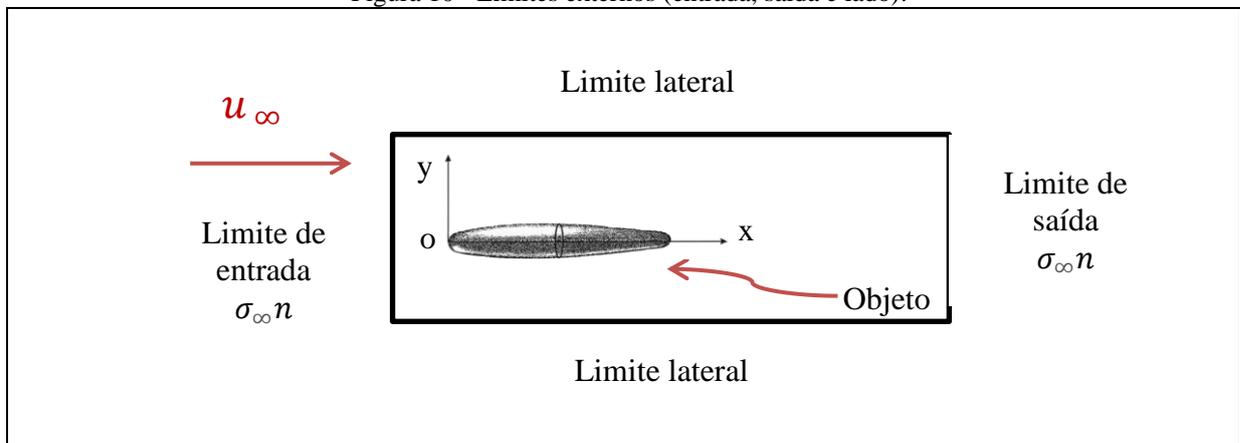
Esta situação apresenta a configuração mais comum na dinâmica de fluidos, em que o interesse está em calcular o fluxo sobre um objeto colocado em um fluxo livre. O domínio de solução ou domínio discretizado finito contém limites bem definidos. As condições de contorno definem esses limites. Normalmente, os limites externos contêm entrada, saída e limites laterais (Figura 10).

Os limites externos são dispostos suficientemente longe do objeto para aproximar-se da condição de fluxo livre. As condições de fluxo livre são:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_{\infty}, \quad (41)$$

$$\boldsymbol{\sigma n} = \boldsymbol{\sigma}_{\infty} \mathbf{n}, \quad (42)$$

Figura 10 - Limites externos (entrada, saída e lado).



Fonte: Bazilevs, Takizawa e Tezduyar, 2013.

### 3.1.4 Número de Reynolds

O número de Reynolds é um valor adimensional usado em mecânica dos fluidos para o cálculo do regime de escoamento de determinado fluido confinado no interior de um túnel ou tubulação ou ao redor de superfícies, conforme cita Campregher et al. (2009). Ele pode ser obtido para escoamento interno pela seguinte equação.

$$Re = \frac{\rho V_{\infty} D}{\mu} \quad (43)$$

Em que  $\rho$  e  $\mu$  são a densidade e viscosidade do fluido, respectivamente.

$\rho$  = massa específica do fluido;

$\mu$  = viscosidade dinâmica do fluido;

$V$  = velocidade do escoamento;

$D$  = diâmetro da tubulação.

Para as simulações realizadas considera-se o número de Reynolds obtido a partir das seguintes características: o diâmetro do cilindro é de 1,0 m, a velocidade do escoamento na entrada é de 80,0 m/s, a massa específica do fluido 1,29 kg/m<sup>3</sup> e a viscosidade dinâmica do fluido de 17,4 x 10<sup>-6</sup> Pa.s.

### 3.2 METODOLOGIA NUMÉRICA

Muitos autores referenciam que a publicação mais antiga do Método de Elementos Finitos é o artigo designado “elemento finito” que data de 1960 e possui como autor Ray Clough. As maiores evoluções do Método de Elementos Finitos aconteceram nas décadas de 60 e início de 70. No início os elementos utilizados mais comuns eram os triangulares e os tetraédricos, e com a evolução a formulação do método contemplou os quadriláteros e os hexaedros (AZEVEDO, p.5, 2003).

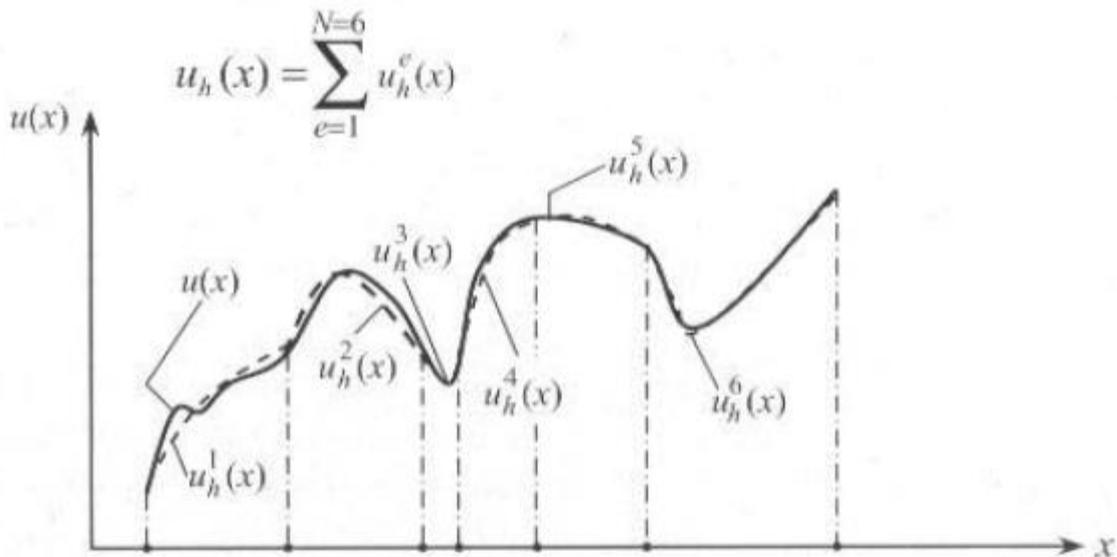
O método de elementos finitos é uma ferramenta numérica computacional utilizada para avaliar e dimensionar o comportamento de forças, ações e carregamentos variáveis para a definição do melhor arranjo estrutural de projetos estruturais de engenharia.

O método de elementos finitos consiste em uma discretização do domínio de integração, com um número finito de geometrias, conhecidas como elementos finitos. Estes elementos formam conectividades entre si, onde cada elemento tem seu grau de liberdade (RIBEIRO et al., 2005, p. 5).

### 3.2.1 Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos é um método numérico como o método de diferenças finitas, todavia é mais genérico quanto sua aplicação em problemas que envolvem geometrias complexas. No método dos elementos finitos, um dado domínio é visto como uma coleção de subdomínios, sobre cada subdomínio a equação apropriada é aproximada utilizando-se a formulação variacional. A principal razão da procura de uma solução aproximada numa coleção de subdomínios é o fato de que é mais fácil representar uma função não-trivial como uma coleção de polinomiais simples (Figura 11). Cada segmento individual da solução deve se ajustar aos vizinhos no sentido que a função e possíveis derivadas, até uma dada ordem, sejam contínuas nos pontos de conexão (REDDY, 2006).

Figura 11 - Função de aproximação por partes

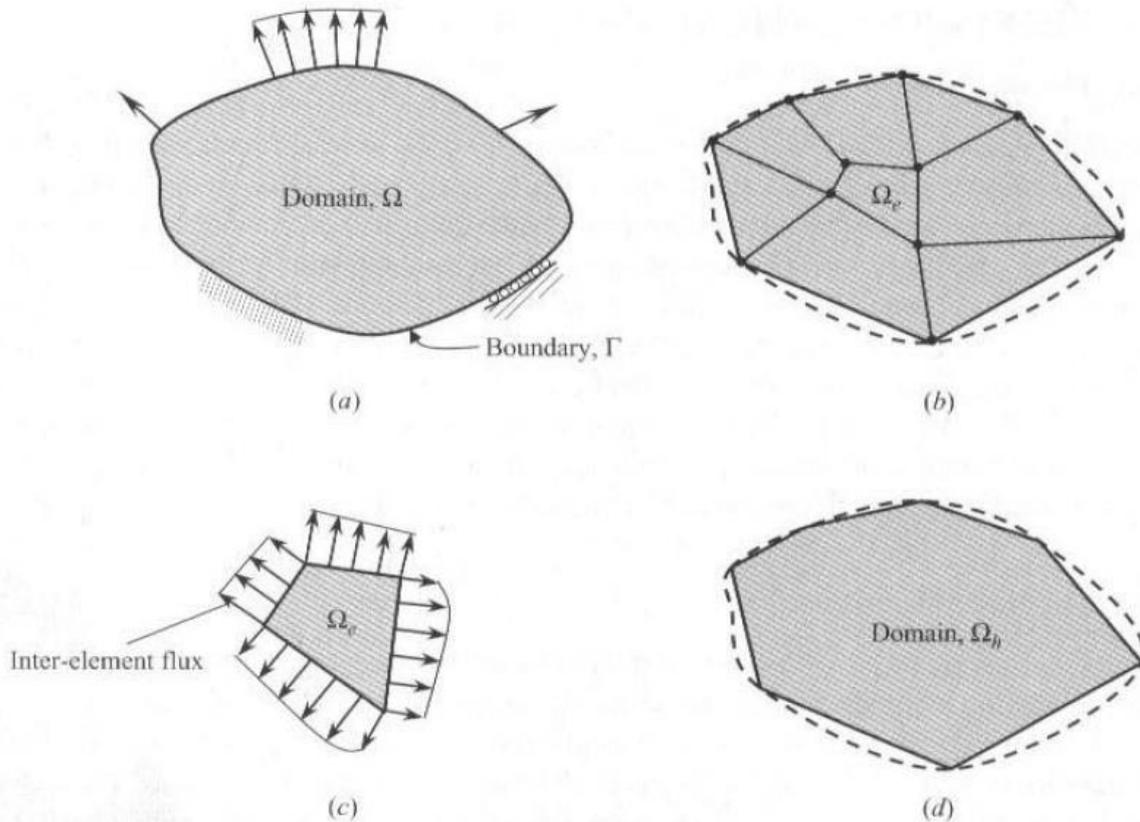


Fonte: Reddy, 2006.

O método possui três características distintas que explicam sua superioridade sobre outros métodos. Primeiro, um domínio geometricamente complexo  $\Omega$  do problema (Figura 12 |a|), é representado como uma coleção de subdomínios geometricamente simples, chamados elementos finitos (Figura 12 |b|). Cada elemento finito  $\Omega$  (Figura 12 |c|) é visto como um domínio independente por si só. Aqui a palavra “domínio” refere-se à região geométrica sobre a qual as equações são resolvidas. Segundo, sobre cada elemento finito, equações algébricas entre as quantidades de interesse são desenvolvidas utilizando as equações apropriadas do problema. Terceiro, as relações de todos os elementos são agrupados

mediante condições de continuidade (Galerkin Continuo) ou descontinuidade entre elementos (Galerkin Descontínuo), (Figura 12 |d|) (REDDY, 2006).

Figura 12 - Representação de um domínio bidimensional por uma coleção de triângulos e quadriláteros.

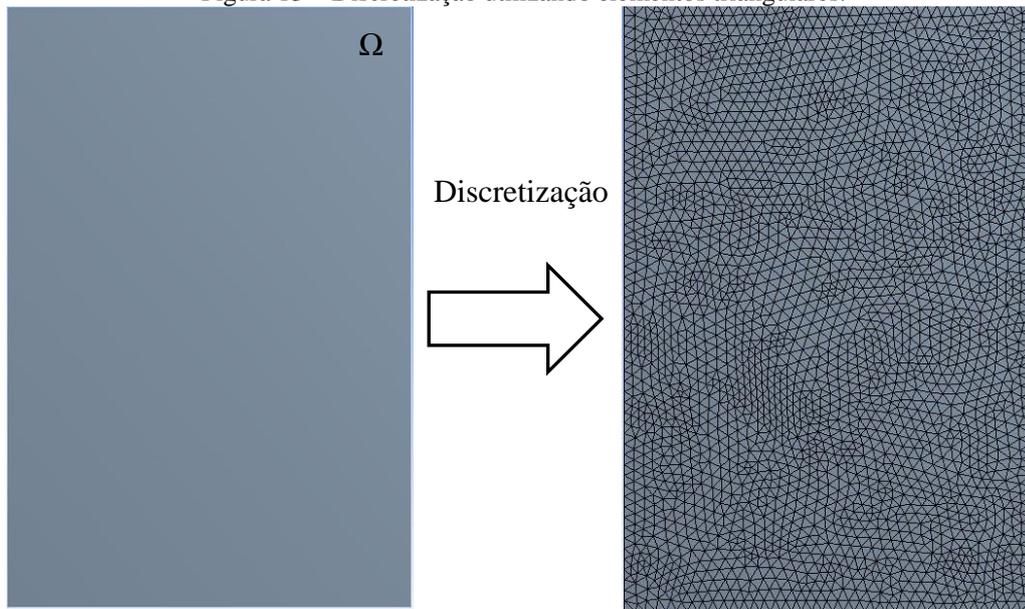


Fonte: Reddy, 2006.

O Método de Elementos Finitos é empregado para obter a solução de estrutura complexas. Neste método, a estrutura é dividida em pequenos subdomínios, ou seja, é discretizada em elementos finitos, que podem ter diferentes formatos. Usualmente em 2D são utilizados triângulos e quadriláteros, em 3D são os hexaedros e tetraedros.

No trabalho foram utilizados elementos triangulares para discretizar a região  $\Omega$  (Figura 13), devido à flexibilidade deste tipo de elemento se adequar aos mais diversos contornos.

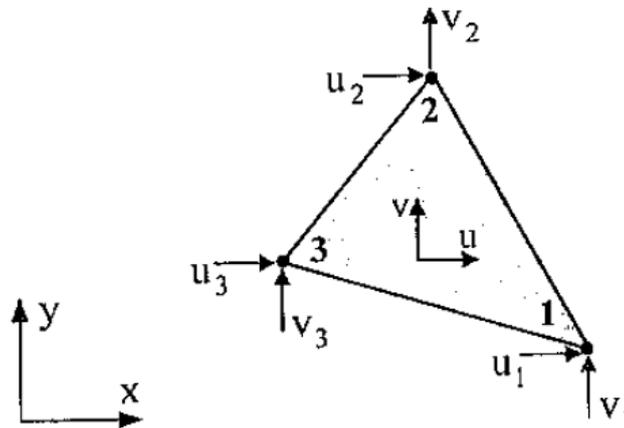
Figura 13 – Discretização utilizando elementos triangulares.



Fonte: O autor, 2017.

No elemento finito triangular de aproximação linear têm-se três pontos nodais (Figura 14). Para uma análise mais acurada da malha é indispensável o seu refinamento, seja no número de elementos, seja na ordem de aproximação (SORIANO, 2009, p. 169).

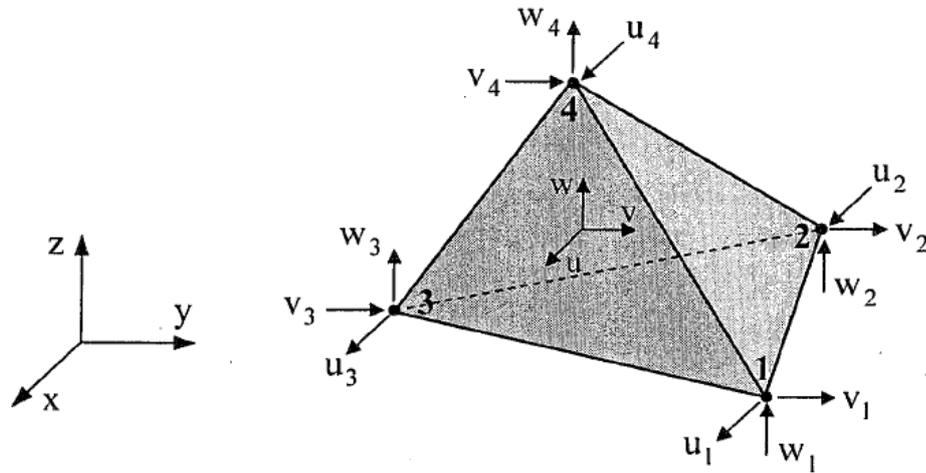
Figura 14 - Elemento triangular.



Fonte: Soriano, 2009, p. 169.

Para o caso de domínios 3D, a Figura 15, ilustra um elemento tetraédrico de aproximação linear.

Figura 15 - Elemento tetraédrico.

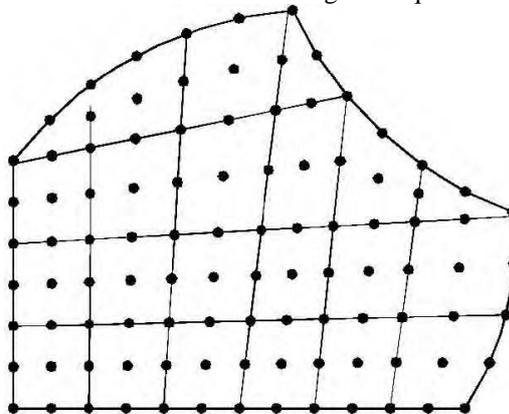


Fonte: Soriano, 2009, p. 175.

Segundo Lima (2005, p. 50 apud Baker & Pepper, 1991), os elementos mais utilizados para discretização de domínios bidimensionais pelo método de elementos finitos são os triângulos. Para os elementos disponíveis para geometrias bidimensionais, os triangulares são os mais simples e se adaptam bem a contornos irregulares.

Segundo Lima (2005, p. 50 apud Zienkiewicz & Morgan, 1993), pode-se considerar que os elementos quadrilaterais, quando utilizado para geometrias irregulares, também podem simular de forma satisfatória contornos aleatórios, no entanto em alguns casos pode ser adequado uma combinação dos dois tipos de elementos, quadrilaterais e triangulares, conforme ilustra Figura 16.

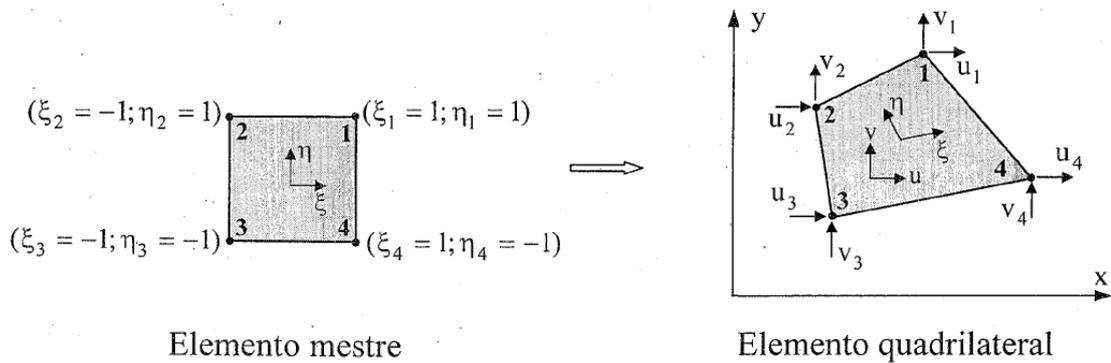
Figura 16- Domínio discretizado em triângulos e quadriláteros.



Fonte: Lima, 2005, p. 51.

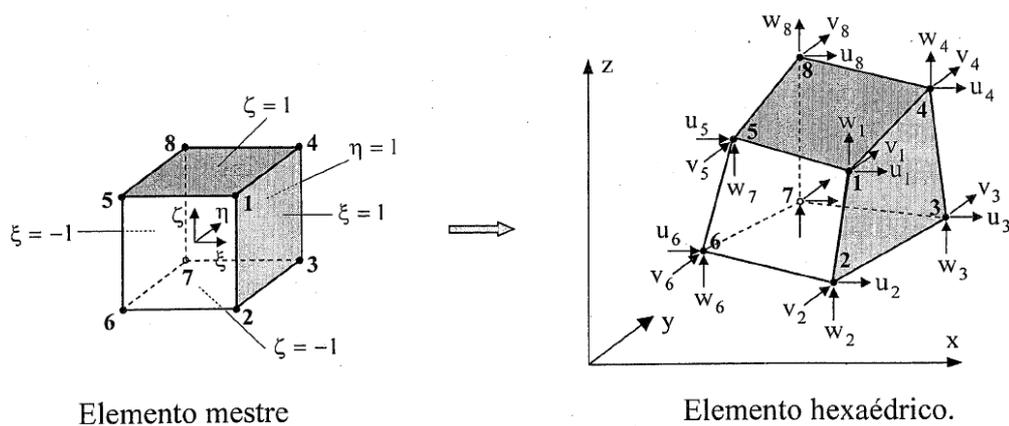
Nas figuras a seguir são apresentadas as representações de elementos quadrilateral e hexaédrico de aproximação linear.

Figura 17 - Elemento quadrilateral.



Fonte: Soriano, 2009, p. 175.

Figura 18 - Elemento hexaédrico.



Fonte: Soriano, 2009, p. 175.

### 3.2.2 Método dos Volumes Finitos

O Método de Volumes Finitos (MVF) pode ser aplicado a qualquer tipo de malha, desta forma, adequa-se a qualquer geometria. A malha define apenas as fronteiras do volume de controle e não precisa estar relacionada com um sistema de coordenadas (GONÇALVES, 2007, p.16).

O método dos volumes finitos é um grupo do método de diferenças finitas. O domínio de solução é subdividido em um número finito de volumes de controle, adjacentes entre si onde as equações de conservação são aplicadas. Outra característica do método dos volumes

finitos é que este pode acomodar qualquer tipo de malha, portanto, é aplicável para geometrias complexas.

Para a obtenção dos resultados na simulação da análise modal da estrutura, foi utilizado o método dos elementos finitos. Utilizaram-se elementos tetraédricos para geração das malhas do pórtico para realização da análise modal, obtendo os modos de vibrar da estrutura e a frequência natural correspondente. Optou-se por este tipo de elemento em função de se adaptarem melhor a geometria proposta.

Para a simulação do problema principal, escoamento do fluido incidindo na estrutura empregou-se o método dos volumes finitos.

#### **4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

Para obtenção dos resultados utilizou-se um modelo experimental, iniciando-se pelo projeto do pórtico metálico e da análise da bancada de fixação do mesmo. A bancada encontra-se instalada no Laboratório de Vibrações do Departamento de Engenharia Mecânica da UTFPR, campus de Pato Branco. Executou-se o ensaio de Análise Modal Experimental para identificar os modos de vibrar e as frequências naturais de cada modo os quais foram utilizados para validar o modelo computacional.

Nos experimentos, os valores de interesse são as frequências naturais e os modos de vibrar do pórtico. De posse dos valores medidos experimentalmente, iniciar-se-á a etapa numérica objetivando-se analisar o comportamento dinâmico do pórtico tendo como reação a ação imposta pelo escoamento.

#### 4.1 PROCEDIMENTO DO TESTE

Antes da realização da análise ocorreu uma fase de estudo e planejamento das estruturas. Várias simulações computacionais foram realizadas para obtenção da menor frequência natural para os primeiros modos de vibrar. Para isso, variou-se o posicionamento da massa entre os pavimentos da estrutura, bem como as espessuras e dimensões dos elementos estruturais (vigas, pilares), até se chegar à geometria desejada.

Na Tabela 1 são apresentados os resultados obtidos com o software ANSYS para especificar o posicionamento da massa, buscando a menor frequência natural para os primeiros modos de vibrar. Nesta primeira tabela a massa utilizada foi de 6,50 kg.

Tabela 1 - Posicionamento da massa de 6,50 kg nos pavimentos.

Massa 6,50 kg						
	3 e 4 Pavimentos, malha tetraedro, aresta 3,0 mm	2 e 3 Pavimentos, malha tetraedro, aresta 3,0 mm	2 e 4 Pavimentos, malha tetraedro, aresta 3,0 mm	2 e 5 Pavimentos, malha tetraedro, aresta 3,0 mm	2, 3 e 4 Pavimentos, malha automática, aresta 3,0 mm	5 Pavimentos, malha automática, aresta 3,0 mm
Modos	Frequência (Hz)	Frequência (Hz)				
1	5,0156	7,0549	5,9099	5,2753	5,318	5,0763
2	13,122	19,267	14,954	13,253	15,178	11,542
3	15,548	22,397	16,311	16,101	16,787	14,354

Fonte: A autora.

Na Tabela 2, com a evolução dos testes percebeu-se que a massa deveria estar posicionada na última laje, evoluindo até a massa de 13,08 kg.

Tabela 2 - Aumento da massa para o 5º pavimento.

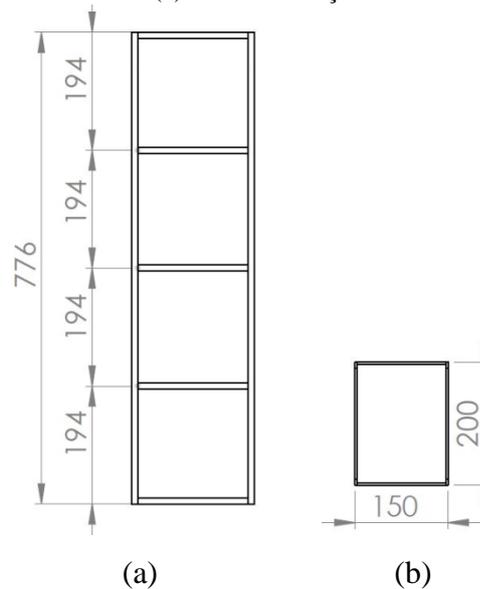
Massa 9,50 kg	
5 Pavimento, malha tetraedro, aresta 3,0 mm	
Modos	Frequência (Hz)
1	4,356
2	9,8719
3	12,46

Fonte: A autora.

Massa 13,08 kg	
5 Pavimento, malha tetraedro, aresta 3,0 mm	
Modos	Frequência (Hz)
1	3,6484
2	8,0844
3	28,72

A concepção inicial da estrutura foi baseada no modelo desenvolvido por CANO (2013), que consiste em um pórtico de quatro andares representando um prédio. Para este trabalho alterou-se características como tipo do material, dimensões dos elementos estruturais e massa. Na Figura 19 é apresentado o modelo do edifício. As dimensões apresentadas são em mm.

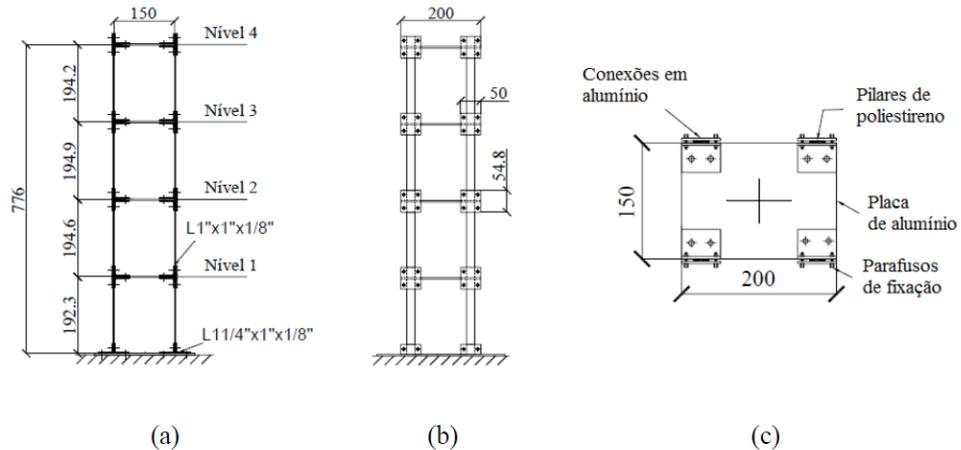
Figura 19 - Modelo físico do edifício. (a) Vista na direção da maior inércia; (b) Vista superior.



Fonte: Adaptada de Cano, 2013.

Do trabalho de PEREIRA et al. (2016) foram seguidas algumas medidas, conforme ilustra Figura 20.

Figura 20 - Modelo físico do edifício: (a) Vista na direção menor inércia; (b) Vista na direção da maior inércia; (c) Vista superior.



Fonte: Pereira et al. (2016).

Do trabalho supracitado, foram seguidas as seguintes dimensões: a altura total, dimensões da base e distância entre eixos dos pavimentos. Diferente do apresentado na referência buscou-se uniformizar a distância entre os eixos dos pavimentos.

Foi confeccionado um pórtico, sendo a estrutura toda composta de aço ASTM A36, conforme mostra a Figura 23.

As características do aço ASTM A36, foram extraídas em MATWEB (2017), conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades do aço ASTM A36.

Propriedades físicas	(g/m <sup>3</sup> )
Densidade	7,85
Propriedades Mecânicas	(Mpa)
Limite de Resistência à Tração	400-500
Tensão de escoamento	250
Modulo de elasticidade	200000

Fonte: Adaptado de Matweb, 2017.

Os andares são compostos de chapas com espessura de 1,20 mm, enquanto os pilares e as vigas possuem seção transversal de 10,00 x 3,00 mm. O pé-direito é de 194,00 mm e a ligação entre os elementos no pórtico soldado é com soldagem Mig/Mag com o gás dióxido de carbono, com eletrodo de 1,0 mm de aço cobreado. A massa total do pórtico soldado é de 2,8098 kg. No pórtico utilizou-se fixado no último pavimento uma massa de 13,080 kg, composta de anilhas, parafusos, porcas e arruelas. Na Tabela 4 é apresentado um resumo dos pesos e a massa final total do pórtico. Na Figura 21 é apresentado uma vista isométrica do pórtico a ser analisado.

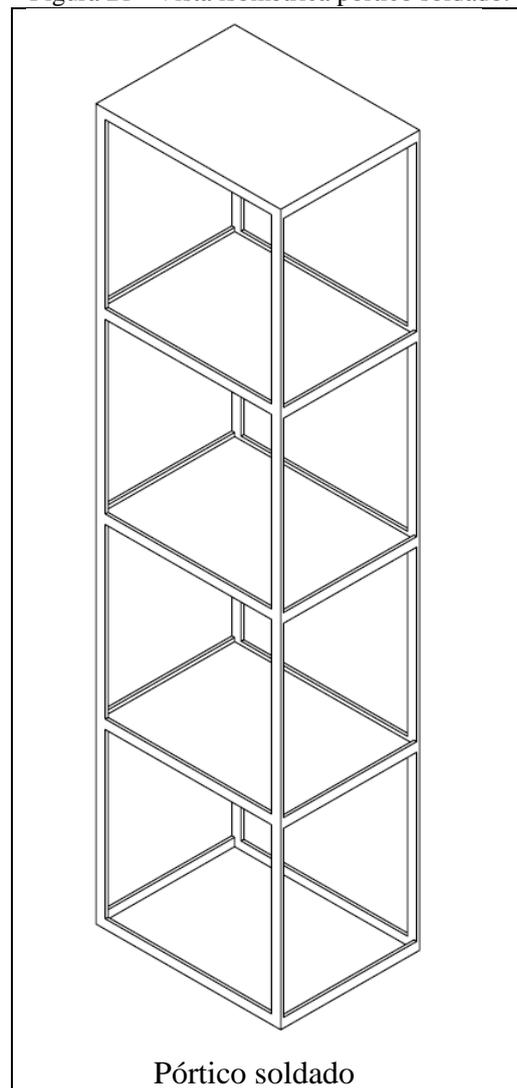
Para modelagem da geometria foi utilizado o software SOLIDWORKS.

Tabela 4 - Massa dos Pórticos.

Descrição	Massa estrutura (kg)	Massa amortecimento (kg)	Massa total (kg)
Pórtico Soldado	2,8098	13,080	15,8898

Fonte: A autora.

Figura 21 - Vista isométrica pórtico soldado.



Fonte: A autora.

A confecção do pórtico foi realizada junto o Laboratório do Curso de Engenharia Mecânica da UTFPR, câmpus de Pato Branco.

Além das medidas, outro ponto que foi levado em consideração foi o esquadro da estrutura, alinhamento e soldagem uniforme, conforme ilustram as Figura 22 e Figura 23.

Figura 22 - Garantia esquadro da estrutura.



Fonte: A autora.

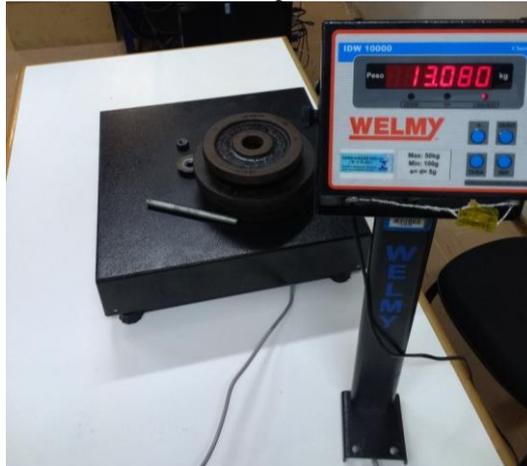
Figura 23 - Montagem final do pórtico.



Fonte: A autora.

Na Figura 24 estão dispostos os acessórios utilizados para compor a massa fixada no último pavimento.

Figura 24 - Massa fixa no último pavimento, incluindo acessórios.



Fonte: A autora.

Nos ensaios realizados dos pórticos para fixar os mesmos foi utilizado uma chapa metálica fixada a uma estrutura estática com quatro parafusos, evitando desta forma, deslocamentos que pudessem prejudicar o ensaio.

O pórtico apresenta seus pontos de aferição nos pilares, sendo 16 pontos por pilar, totalizando 64 pontos no total. Na Figura 25 será apresentada a fixação do pórtico, bem como a preparação do mesmo para os ensaios.

Figura 25 - Preparação do pórtico soldado.



Fonte: A autora.

## 4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As informações foram obtidas utilizando um analisador dinâmico de vibrações. A frequência empregada de amostragem foi fixada em 200 Hz. Os sinais de entrada e saída foram filtrados por uma janela de força e uma janela de decaimento exponencial concomitantemente. A cada excitação apresentada na tela era verificada a qualidade dos modos e minimização dos resíduos, caso o resultado não fosse satisfatório a excitação era desprezada repetindo-se o ensaio.

A qualidade do sinal é fundamental. A primeira preocupação é a aquisição de sinais de livres de barulhos excessivos. Outra circunstância que pode levar a erros de medição são rotulagem incorreta, problemas de conexão, cabos e sinais. Outro problema que pode surgir é em relação aos sinais obtidos que não representa verdadeiramente a quantidade que pode ser medida. Este problema ocorre pela sensibilidade transversal exibida pela maioria dos acelerômetros (EWINS, 2000, p. 166).

## 4.3 FORÇA DE EXCITAÇÃO

Neste trabalho a forma de excitação utilizada foi impacto de um martelo diretamente contra a estrutura. A determinação da utilização deste método está atrelada ao fato da disponibilidade deste equipamento para análises de teste modais experimentais.

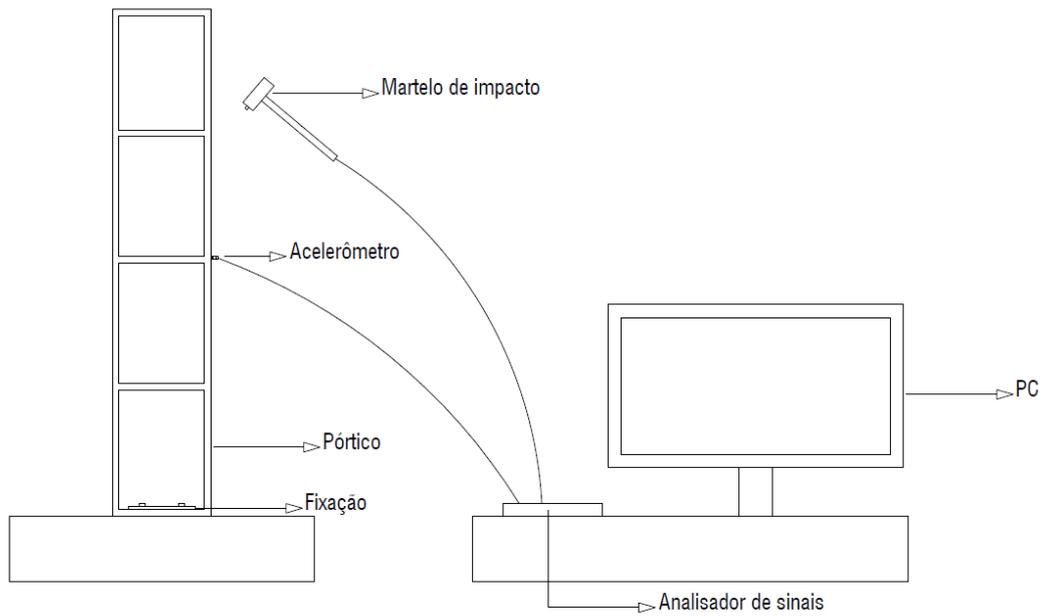
## 4.4 TESTE DE IMPACTO

Este teste é utilizado para obtenção das FRFs, o mesmo pode ser separado em três etapas distintas:

- ✓ Acertos e aferições dos equipamentos utilizados;
- ✓ Execução do impacto com o martelo;
- ✓ Obtenção de dados para processamento.

A Figura 26 e Figura 27 representam todo o experimento montado para execução do teste de impacto com o pórtico.

Figura 26 - Representação do teste de impacto com as ferramentas e equipamentos utilizados.



Fonte: A autora.

Figura 27 - Representação do experimento montado para o teste de impacto no pórtico soldado.



Fonte: A autora.

#### 4.5 MARTELO DE IMPACTO

Segundo RAO (2008, p. 357), o martelo de impacto é uma ferramenta equipada com um transdutor de força embutido em seu cabeçote. Ele é utilizado para atingir ou causar um impacto à estrutura que está sendo testada para excitar ampla faixa de frequências sem causar o problema de carregamento de massa. A força de impacto provocada aproxima-se

proporcionalmente à massa do cabeçote e à velocidade de impacto, pode ser definida pelo transdutor de força introduzido junto ao cabeçote do martelo. A resposta ao impacto da estrutura a um impulso é composta por excitações em cada uma das frequências naturais da estrutura.

A estrutura foi excitada com um martelo de impacto (Figura 28) no nó 14, impulsionando-o para o sentido negativo da direção do eixo x. O martelo possui uma célula de carga com uma sensibilidade de 2.27 mV/N para detectar a magnitude da força de excitação.

Figura 28 - Martelo de impacto utilizado no experimento.



Fonte: A autora.

O martelo de impacto empregado é do modelo 2303-10, possuindo como fabricante ENDEVCO. O referido martelo possui diferentes ponteiros, com diferentes materiais de composição. As ponteiros apresentam distintos materiais em função de beneficiar determinada banda de frequência. A ponteira de aço é indicada para altas frequências, já a banda de borracha é utilizada para baixas frequências.

Para os testes de excitação por impacto no pórtico metálico fez-se uso da ponteira de borracha, para provocar baixos níveis de frequência, previamente analisados em testes computacionais.

#### 4.6 ACELERÔMETRO

Acelerômetro é um dispositivo que mede a vibração ou a aceleração do movimento de uma estrutura. A força causada por uma vibração ou alteração do movimento (aceleração) faz com que a massa pressione o material piezoelétrico, produzindo uma carga elétrica proporcional à força exercida sobre ele. Como a carga é proporcional à força e a massa é uma constante, a carga também é proporcional à aceleração (OMEGA, 2017).

Para medição da vibração do pórtico utilizou-se um acelerômetro da ENDEVCO, modelo S/N13657. Para realização da ancoragem do acelerômetro aos pórticos utilizou-se de cera WAX 32279, conforme Figura 29.

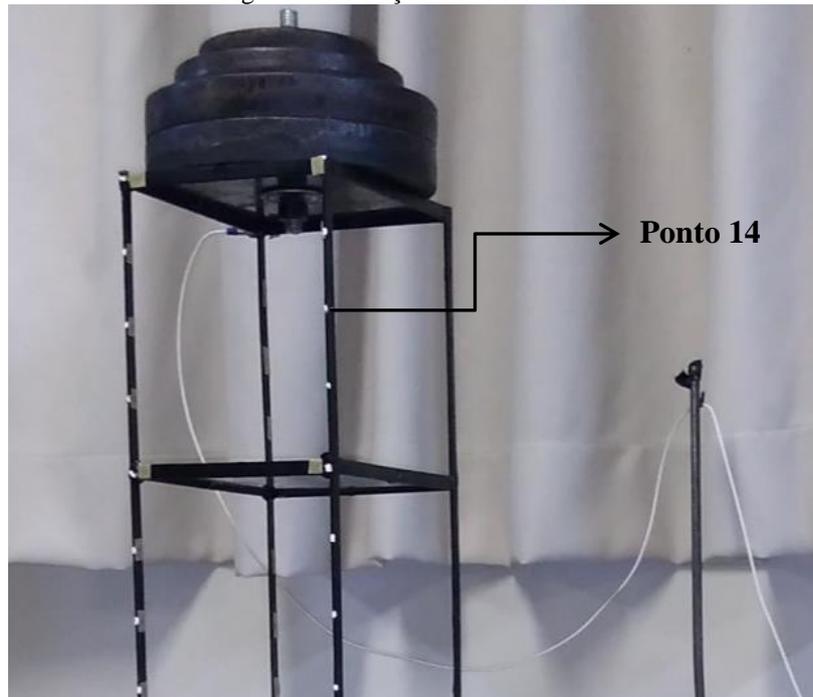
Figura 29 - Cera para ancoragem do acelerômetro.



Fonte: A autora.

A resposta de vibração foi avaliada em todos os 64 pontos. A Figura 30 ilustra o posicionamento do acelerômetro na estrutura do pórtico.

Figura 30 - Posição do acelerômetro.

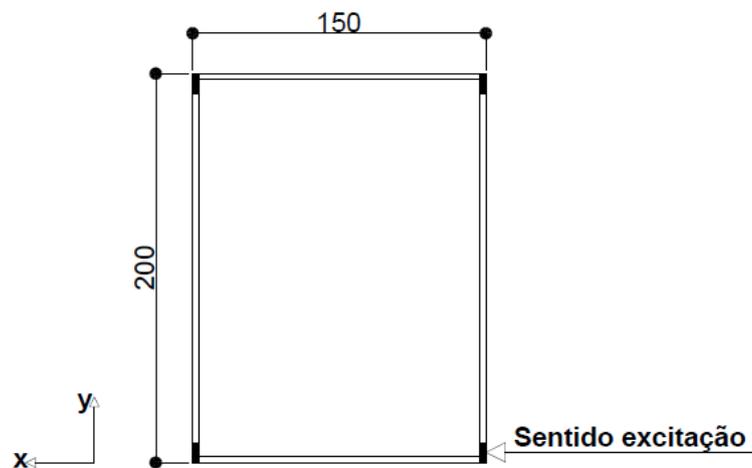


Fonte: o autor.

O impacto foi realizado no ponto 14, como indica a Figura 30. Desta forma, experimentalmente foram obtidos os modos de vibrar à flexão da estrutura os demais modos, como o de torção, não foram identificados no ensaio.

Na Figura 31 é ilustrado um corte transversal na estrutura com o sentido determinado para o impacto.

Figura 31 - Sentido da força de excitação.



Fonte: A autora.

#### 4.7 ANALISADOR DE SINAIS

Para RAO (2008, p.358) um analisador muito utilizado é chamado de analisador de transformada rápida de Fourier (FFT). Este recebe sinais analógicos de tensão que expressam deslocamento, velocidade, aceleração e deformação de um amplificador, filtro e digitalizador condicionador de sinal, para realizar cálculos. Ele calcula os espectros de frequência discreta de sinais individuais, bem como espectros cruzados entre a entrada e os diferentes sinais de saída. Os sinais são utilizados para calcular frequências naturais, os fatores de amortecimento e as formas modais em forma numérica ou gráfica.

O analisador utilizado para este teste é o 01 dB-Metravib do fabricante AREVA, conforme ilustra a Figura 32.

Figura 32 - Analisador de sinais.



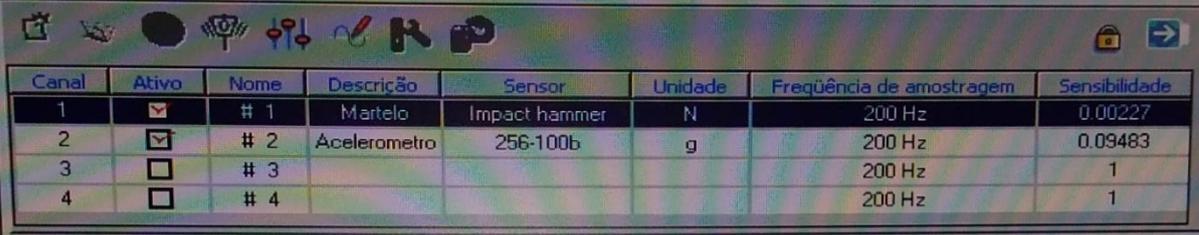
Fonte: A autora.

#### 4.8 SOFTWARE DE ANÁLISE

Para a realização dos ensaios é necessário à utilização de um software. Neste caso, empregou-se o software analisador 01 dB-Metraviv é o DBFA Suite 4.9. Antes de iniciar o ensaio é possível verificar algumas funções como frequência de amostragem, janelamento, função resposta em frequência, ajuste do trigger, coerência e saída de dados. Estes fatores podem influenciar diretamente na qualidade dos dados obtidos.

Na sequência é importante aferir se os equipamentos estão conectados ao analisador de sinais. No caso dos ensaios realizados, se o Martelo de Impacto estava no Canal 1 e o Acelerômetro no Canal 2, conforme Figura 33 e Tabela 5.

Figura 33 - Parâmetros de aferição para os canais de entrada e saída.



Canal	Ativo	Nome	Descrição	Sensor	Unidade	Freqüência de amostragem	Sensibilidade
1	<input checked="" type="checkbox"/>	# 1	Martelo	Impact hammer	N	200 Hz	0.00227
2	<input checked="" type="checkbox"/>	# 2	Acelerometro	256-100b	g	200 Hz	0.09483
3	<input type="checkbox"/>	# 3				200 Hz	1
4	<input type="checkbox"/>	# 4				200 Hz	1

Fonte: A autora.

Tabela 5- Parâmetros de ajuste do Martelo de Impacto e do Acelerômetro.

Equipamento	Canal	Banda de Amostragem (Hz)	Sensibilidade	Unidade de Medida
Martelo de Impacto	1	200	0,00227	N
Acelerômetro	2	200	0,09483	g

Fonte: A autora.

Na Tabela 6 é apresentada a configuração para leitura dos impactos. Este modo determina características que são encontradas a cada ciclo final de medição.

Tabela 6 - Configurações para gravação do sinal.

Parâmetro	Valor
Nome	FFT
Canais usados	1-2
Tipo de janela	user
Resol. FFT	512
Delta F	0.390625
Zoom	<input type="checkbox"/>
Tamanho da banda	78 Hz
Canal de ref.	1
Tipo de média	Lin
Número de impactos	3

Fonte: A autora.

Na determinação da função resposta de frequência (FRF), utilizou-se como critério a média entre as respostas dos impactos executados.

Outro parâmetro ajustado foi o trigger que é sensível para o software realizar as medições, assim pré-determina-se a força pelo executante do teste e se esta não for atendida o software não realiza as medições.

Na janela de configuração do caminho das medições, são especificados os pontos de medição e o ponto de impacto, onde o ponto de medição varia de 1 até 64 e o ponto de impacto é fixo, ponto 14.

Na Tabela 7 são apresentados os pontos de medição, onde se percebe que no ponto 14 é necessário inverter o sinal por ser o ponto de impacto de excitação.

Tabela 7 - Pontos de medição definidos na função caminho do experimento.

Medidas	Excitar 1	Canal 2	Medidas	Excitar 1	Canal 2
M1	14+X	1+X	M33	14+X	33+X
M2	14+X	2+X	M34	14+X	34+X
M3	14+X	3+X	M35	14+X	35+X
M4	14+X	4+X	M36	14+X	36+X
M5	14+X	5+X	M37	14+X	37+X
M6	14+X	6+X	M38	14+X	38+X
M7	14+X	7+X	M39	14+X	39+X
M8	14+X	8+X	M40	14+X	40+X
M9	14+X	9+X	M41	14+X	41+X
M10	14+X	10+X	M42	14+X	42+X
M11	14+X	11+X	M43	14+X	43+X
M12	14+X	12+X	M44	14+X	44+X
M13	14+X	13+X	M45	14+X	45+X
<b>M14</b>	<b>14-X</b>	<b>14+X</b>	M46	14+X	46+X
M15	14+X	15+X	M47	14+X	47+X
M16	14+X	16+X	M48	14+X	48+X
M17	14+X	17+X	M49	14+X	49+X
M18	14+X	18+X	M50	14+X	50+X
M19	14+X	19+X	M51	14+X	51+X
M20	14+X	20+X	M52	14+X	52+X
M21	14+X	21+X	M53	14+X	53+X
M22	14+X	22+X	M54	14+X	54+X
M23	14+X	23+X	M55	14+X	55+X
M24	14+X	24+X	M56	14+X	56+X
M25	14+X	25+X	M57	14+X	57+X
M26	14+X	26+X	M58	14+X	58+X
M27	14+X	27+X	M59	14+X	59+X
M28	14+X	28+X	M60	14+X	60+X
M29	14+X	29+X	M61	14+X	61+X
M30	14+X	30+X	M62	14+X	62+X
M31	14+X	31+X	M63	14+X	63+X
M32	14+X	32+X	M64	14+X	64+X

Fonte: A autora.

Para o ensaio realizado, utilizou-se o trigger 5. Os dados obtidos no ensaio foram exportados do software no formato “uff”. Com o formato “uff” é possível realizar a leitura no software Matlab.

O método RFP foi implementado e inserido dentro do toolbox para matlab EasyMod (Kouroussis et. al, 2012). Utilizando esta ferramenta obtiveram-se os parâmetros modais experimentais.

#### 4.9 PARÂMETROS ANÁLISE MODAL NO *SOFTWARE* ANSYS

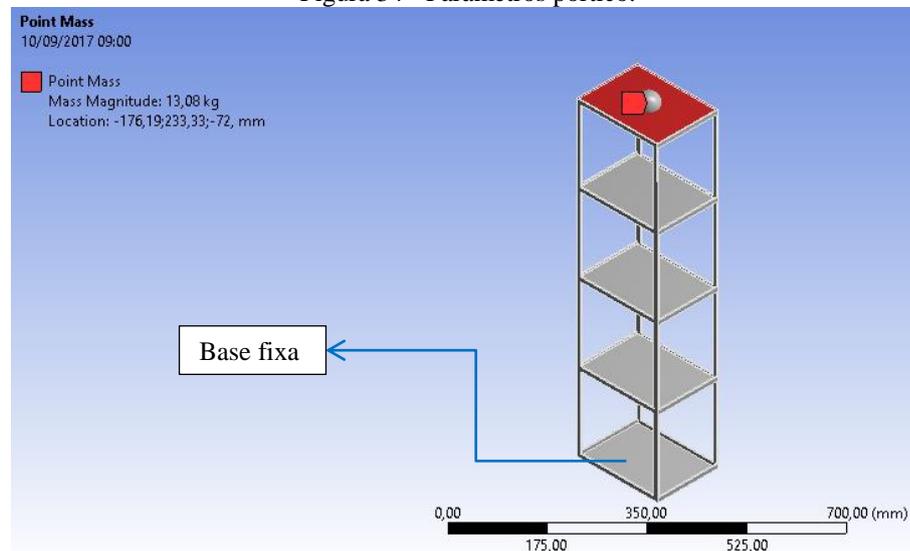
O ANSYS é um software de elementos finitos muito utilizado para resolução de problemas de engenharia nas mais diversas áreas.

Na análise da estrutura, primeiramente importou-se a geometria confeccionada em outro software na extensão *.x\_t*. Na sequência realizou-se a definição do tipo de elemento utilizado, bem como gerou-se a malha dos elementos tetraédricos.

Após, ocorreu a inserção de uma massa distribuída no último pavimento de 13,080 kg e por fim, foi realizada a fixação da base do pórtico, ou seja, engastou-se.

Na Figura 34 estão apresentadas as condições iniciais, com a massa localizada no último pavimento e a base do pórtico fixada. Foi esta a geometria utilizada nas simulações para diferentes malhas para análise modal e de escoamento.

Figura 34 - Parâmetros pórtico.



Fonte: A autora.

## 5 RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os dados experimentais obtidos na Análise Modal do Pórtico, a Análise Modal e Experimental, bem como, a simulação do escoamento em torno do pórtico.

Nos resultados são expostos as frequências naturais do pórtico obtidos através da simulação computacional e o ensaio experimental.

Na Tabela 8 estão apresentados os resultados da Análise Modal realizados no software ANSYS com a estrutura do pórtico soldado, onde estão ilustradas as frequências naturais até o terceiro modo de vibração. Além disso, são apresentados os resultados experimentais, utilizando o método RFP.

Tabela 8 - Resultados da Análise Modal do Pórtico Soldado no software ANSYS.

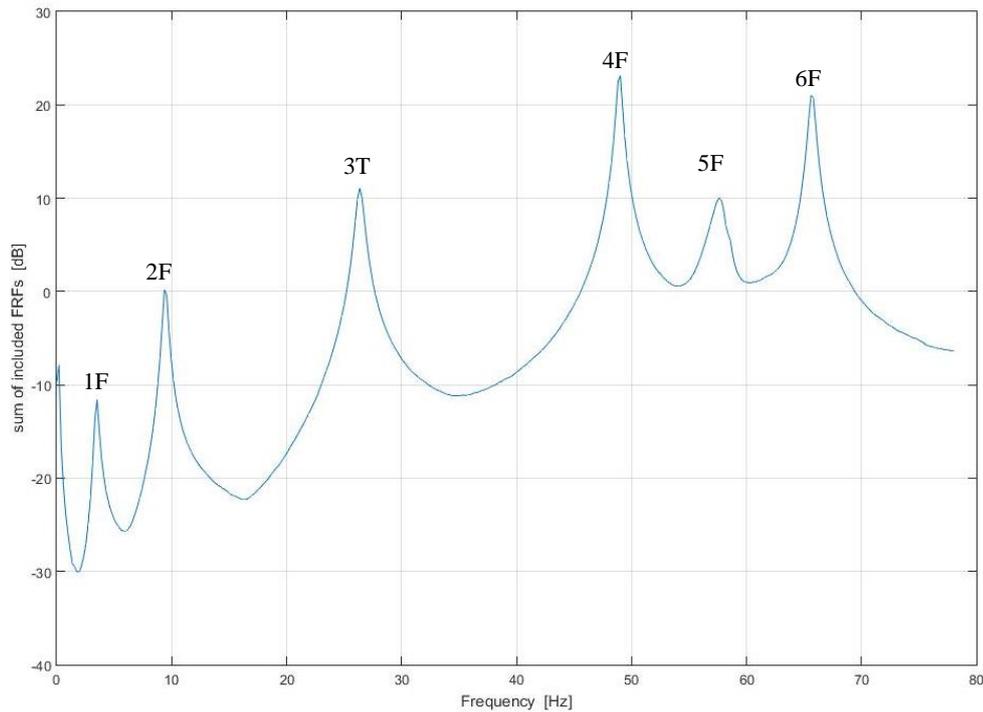
Análise Modal Pórtico Soldado				
Frequência em Hz				
Modos	Método RFP			
	Experimental	Malha 5,0 mm	Malha 4,0 mm	Malha 3,0 mm
1°	3,5240	3,6733	3,6605	3,6484
2°	9,2906	8,1125	8,0995	8,0844
3°	26,4073	28,919	28,818	28,72

Fonte: o autora.

Percebe-se uma diminuição do valor da frequência natural com o refinamento da malha, porém convergindo a um valor associado.

Na Figura 35 está disposto o gráfico de frequências naturais e o respectivo modo de vibrar é 1F é o primeiro modo de flexão, 2F é o segundo modo de flexão, 3T é o terceiro modo torção, 4F é o quarto modo de flexão, 5F é o quinto modo de flexão e o 6F é o sexto modo de flexão.

Figura 35 - Gráfico de Frequências Naturais do pórtico soldado resultados experimentais.



Fonte: a autora.

As frequências naturais medidas experimentalmente, onde apenas os modos no plano x - y foram aferidos, tem-se uma diferença de 3,4%, -14,92% e 8,05%, entre o primeiro, segundo e terceiro modo do método de Elementos Finitos e RFP. Os resultados estão representados na Tabela 9.

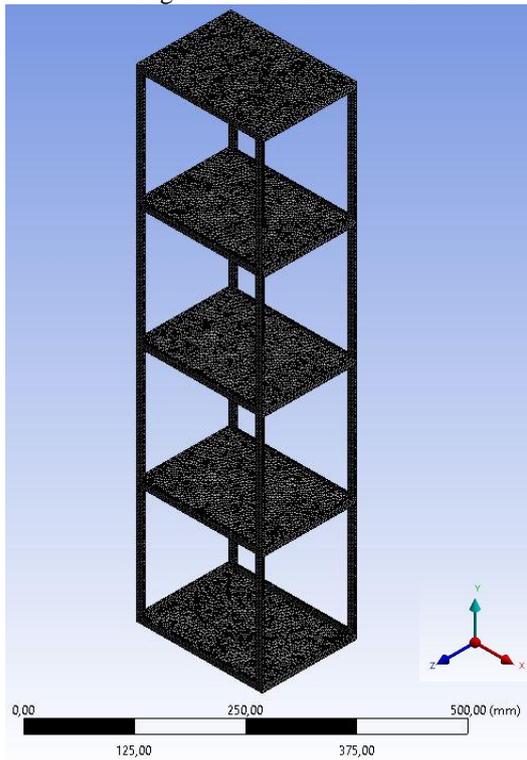
Tabela 9 - Comparativo dos resultados da Análise Modal software ANSYS e Experimental.

Modos	Análise computacional (Hz)	Método RFP (Hz)
1º	3,6484	3,5240
2º	8,0844	9,2906
3º	28,72	26,4073

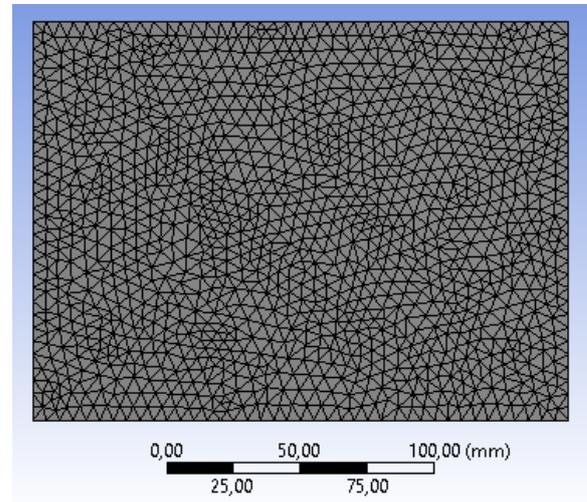
Fonte: o autor.

Foi utilizado para a malha elemento tetraédrico, com diferentes tamanhos de arestas (5,00 mm, 4,0 mm e 3,0 mm). As figuras a seguir ilustram as malhas geradas no ANSYS do pórtico de uma maneira geral (isométrica) e uma vista de topo de uma das lajes.

Figura 36 - Malha tetraedros aresta 5,0 mm, (a) Vista isométrica, (b) Vista de topo.



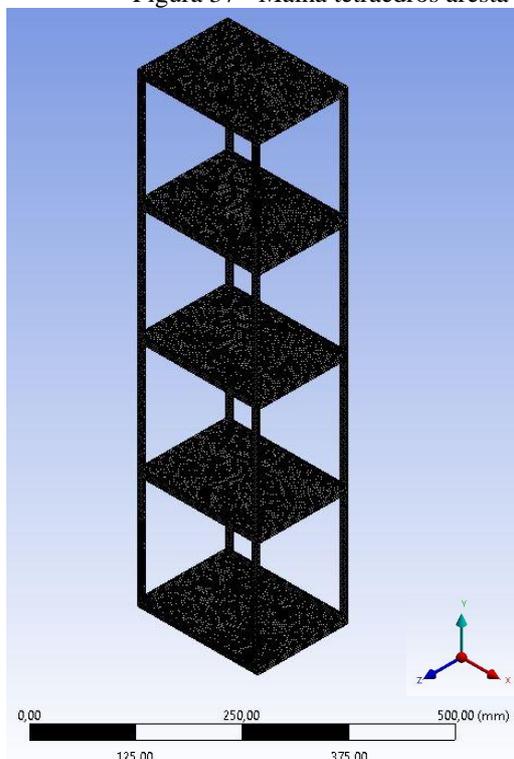
(a) Vista isométrica



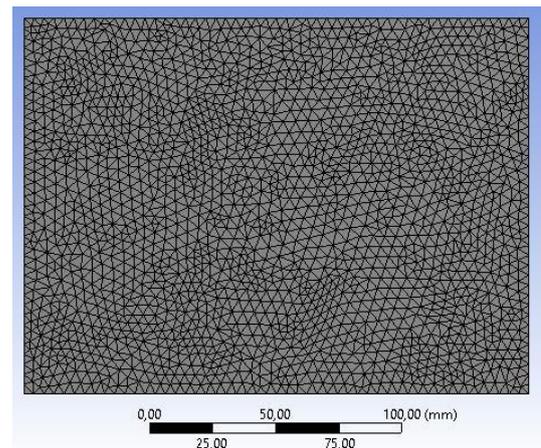
(b) Vista de topo

Fonte: a autora.

Figura 37 - Malha tetraedros aresta 4,0 mm, (a) Vista isométrica, (b) Vista de topo.



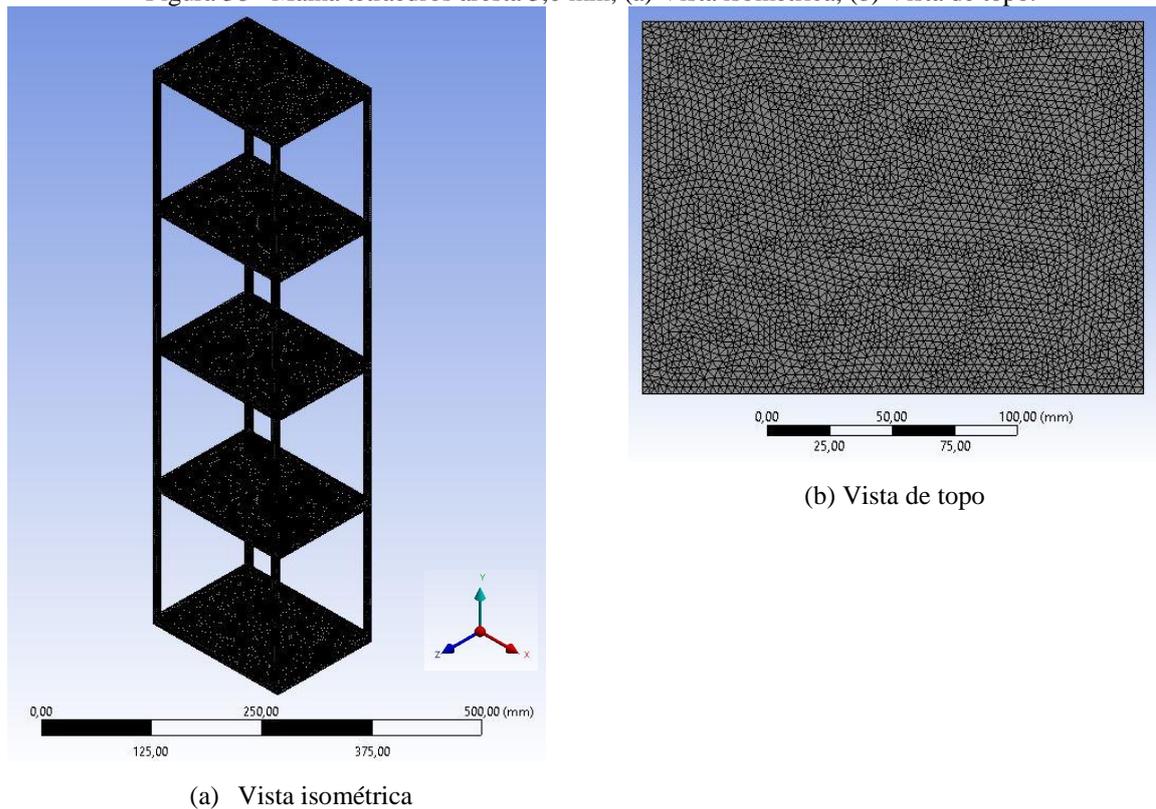
(a) Vista isométrica



(b) Vista de topo

Fonte: a autora.

Figura 38 - Malha tetraedros aresta 3,0 mm, (a) Vista isométrica, (b) Vista de topo.



Fonte: a autora.

Para as três malhas apresentadas anteriormente, obtiveram-se os seguintes números de elementos e nós, conforme Tabela 10.

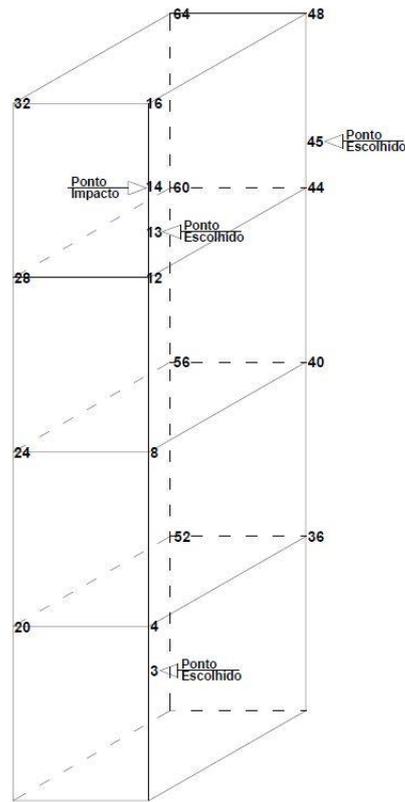
Tabela 10 - Número de nós e elementos correspondentes para cada malha.

Descrição	Malha 5,0 mm	Malha 4,0 mm	Malha 3,0 mm
Nós	110.833	180.340	327.597
Elementos	53.319	89.369	166 803

Fonte: a autora.

Na Figura 39, ilustra-se uma vista isométrica do pórtico com a identificação dos pontos utilizados para apresentar a Função Resposta em Frequência (FRF) do procedimento experimental. Além disso, encontra-se locado o ponto de impacto. Não se utilizou critério para a escolha dos pontos, foram aleatórios, porque o objetivo era apresentar algumas das funções encontradas.

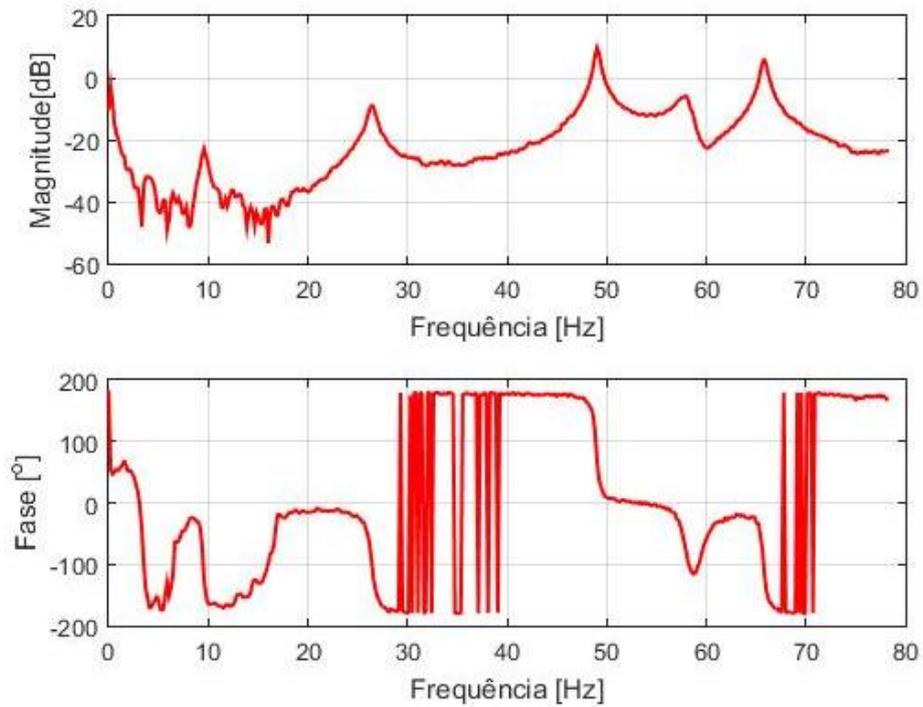
Figura 39 - Identificação dos pontos.



Fonte: a autora.

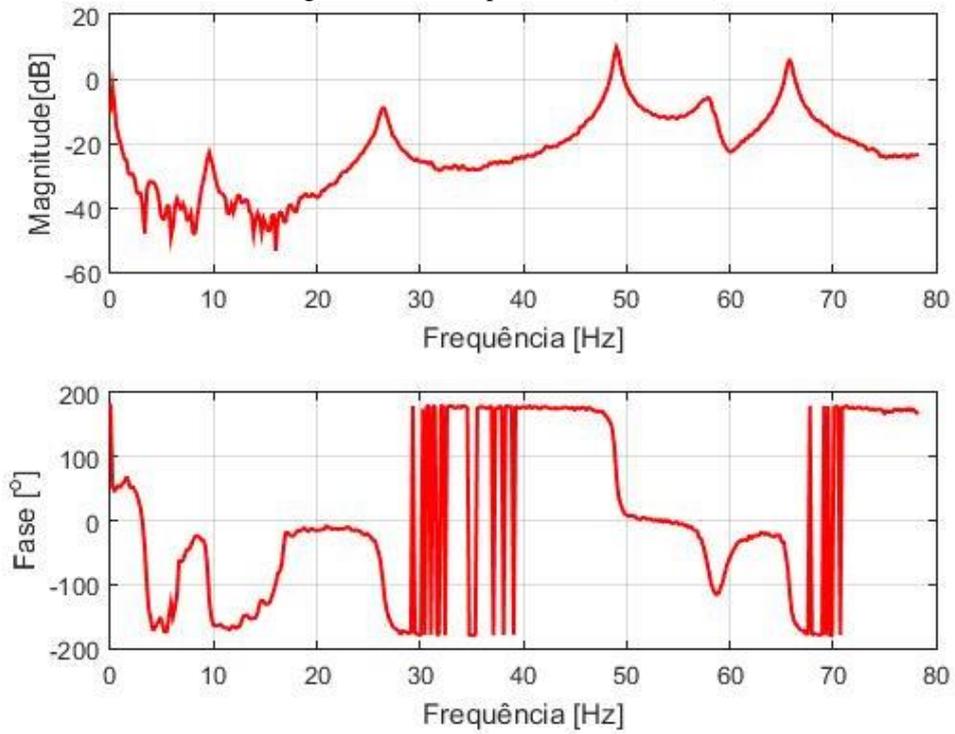
Nas figuras a seguir tem-se a Função Resposta em Frequência (FRF) do ponto 3, 13 e 45.

Figura 40 - FRF experimental (Ponto 3).



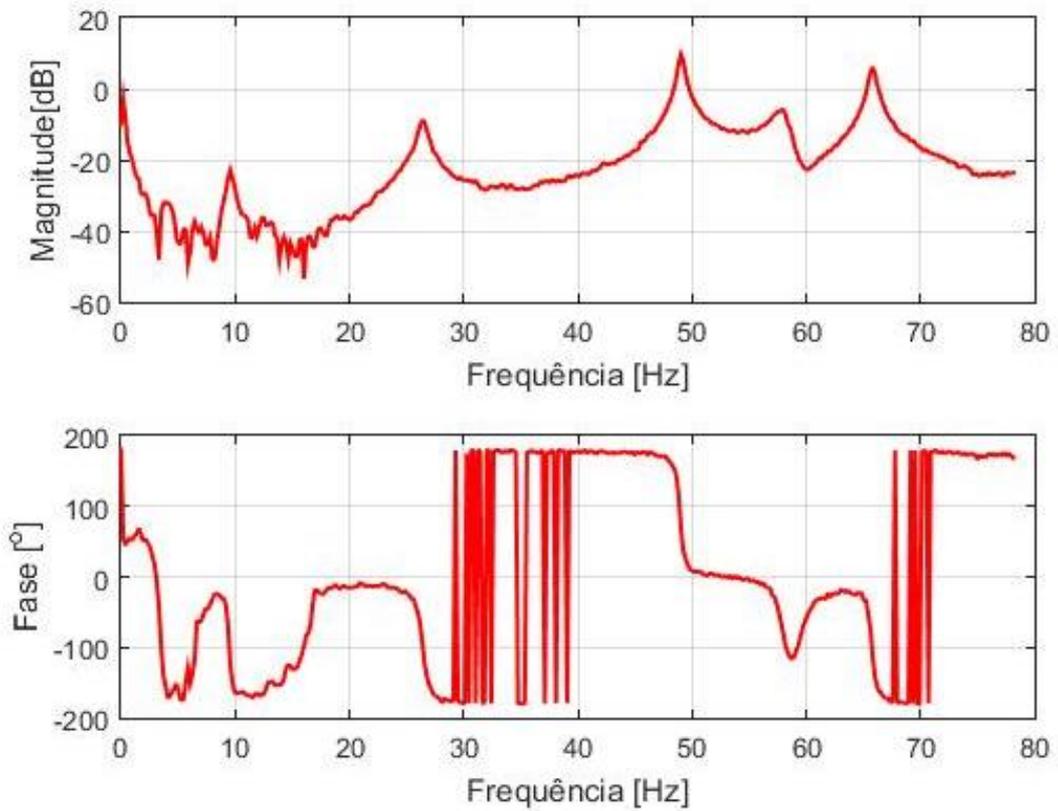
Fonte: a autora.

Figura 41 - FRF experimental (Ponto 13).



Fonte: a autora.

Figura 42 - FRF experimental (Ponto 45).



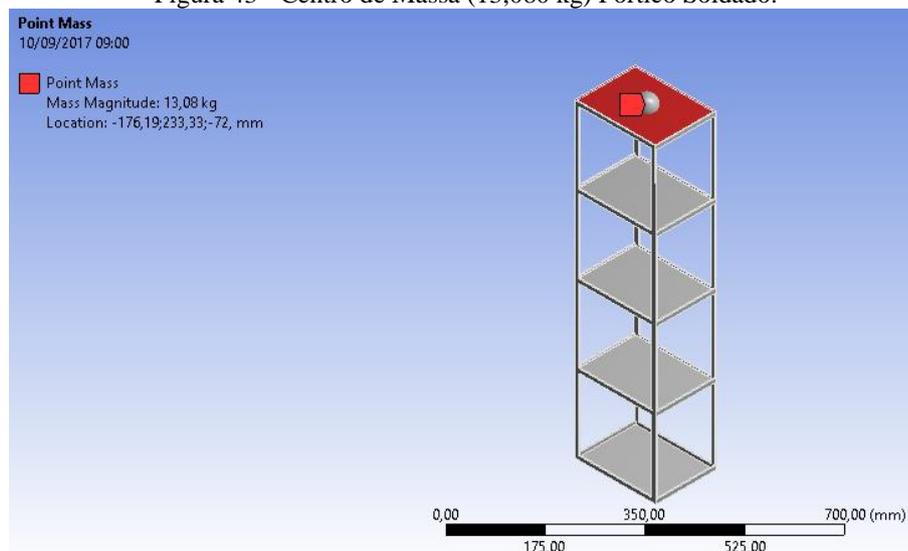
Fonte: a autora.

Para a realização do ensaio de análise modal, no último pavimento foi inserido um conjunto metálico com massa de 13,080 kg. Destaca-se que nas simulações a carga final foi de 13,0 kg. No entanto, como foi utilizado um modelo experimental, alguns acessórios para fixação foram utilizados, logo o valor corresponde ao peso destes foram considerados. Assim, utilizou-se para as simulações também o mesmo valor.

A massa que formou os 13,08 kg era composta de placas metálicas no formato circular e demais acessórios de fixação.

A Figura 43 ilustra a aplicação desta massa como uma carga localizada no arranjo inicial (“input”) da simulação no ANSYS.

Figura 43 - Centro de Massa (13,080 kg) Pórtico Soldado.

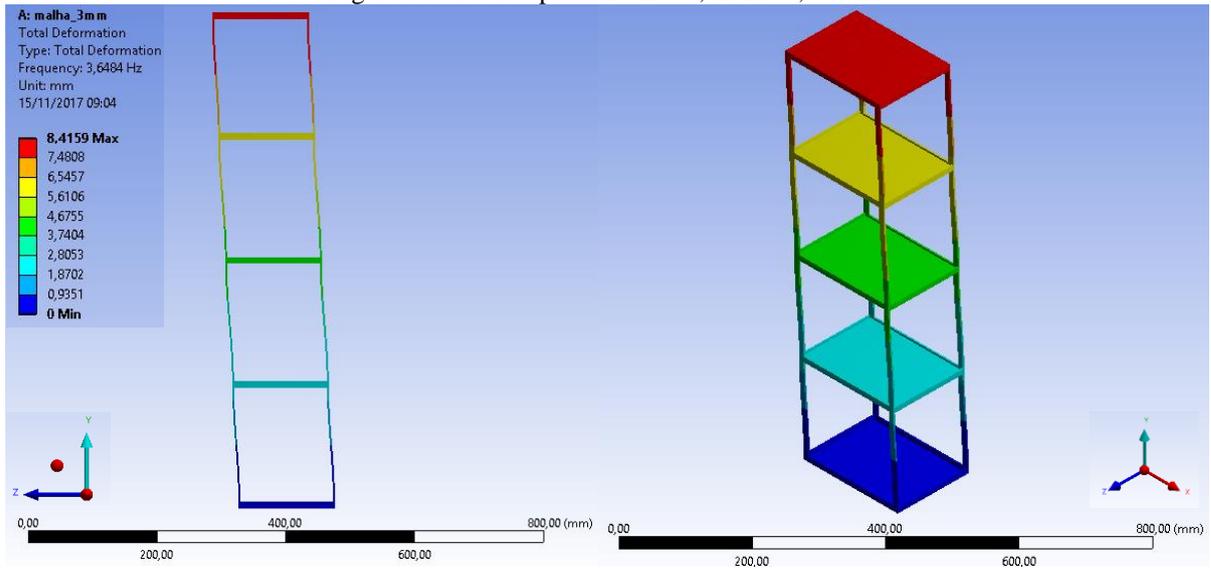


Fonte: a autora.

As figuras a seguir ilustram alguns modos de vibrar das estruturas.

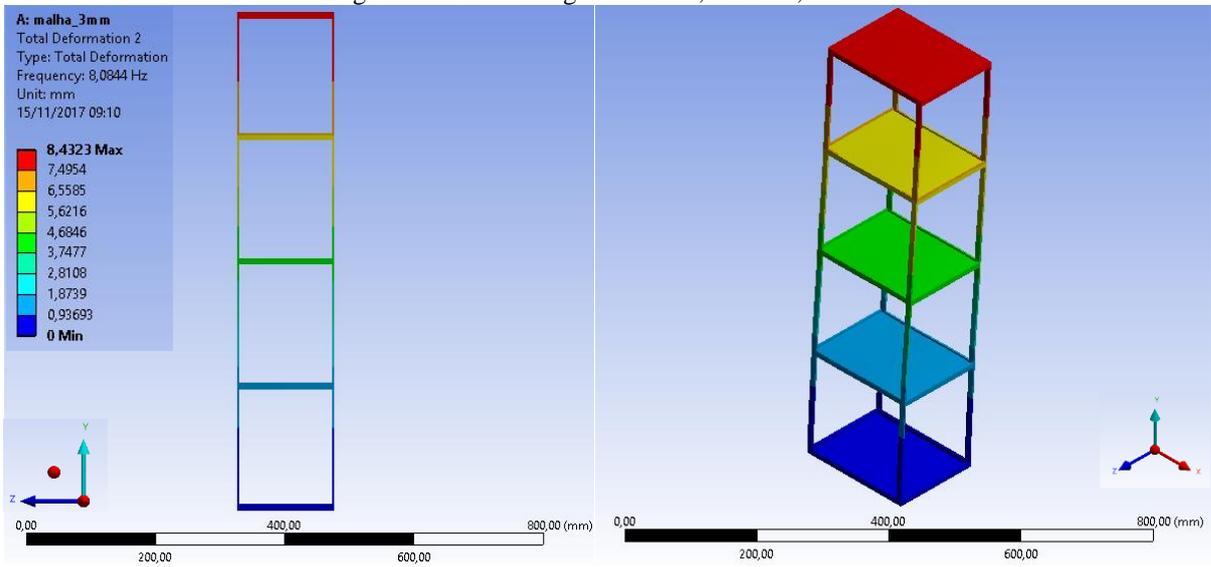
Para ilustrar os modos de vibração, nas figuras está exposta uma vista na menor dimensão do pórtico que é de 150,00 mm e uma vista isométrica.

Figura 44 - Pórtico primeiro modo, malha 3,00 mm.



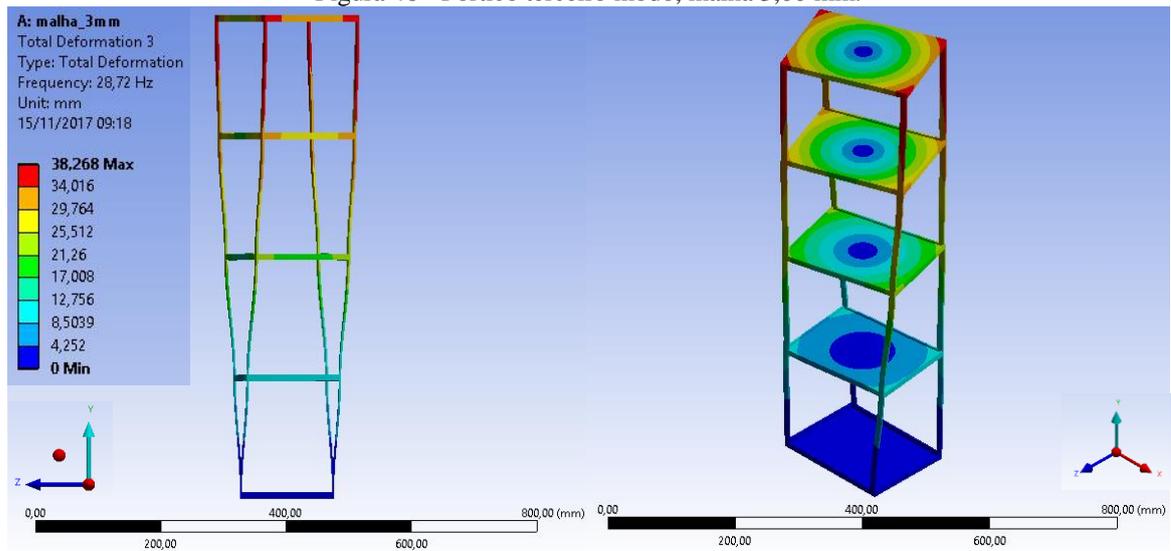
Fonte: a autora.

Figura 45 - Pórtico segundo modo, malha 3,00 mm.



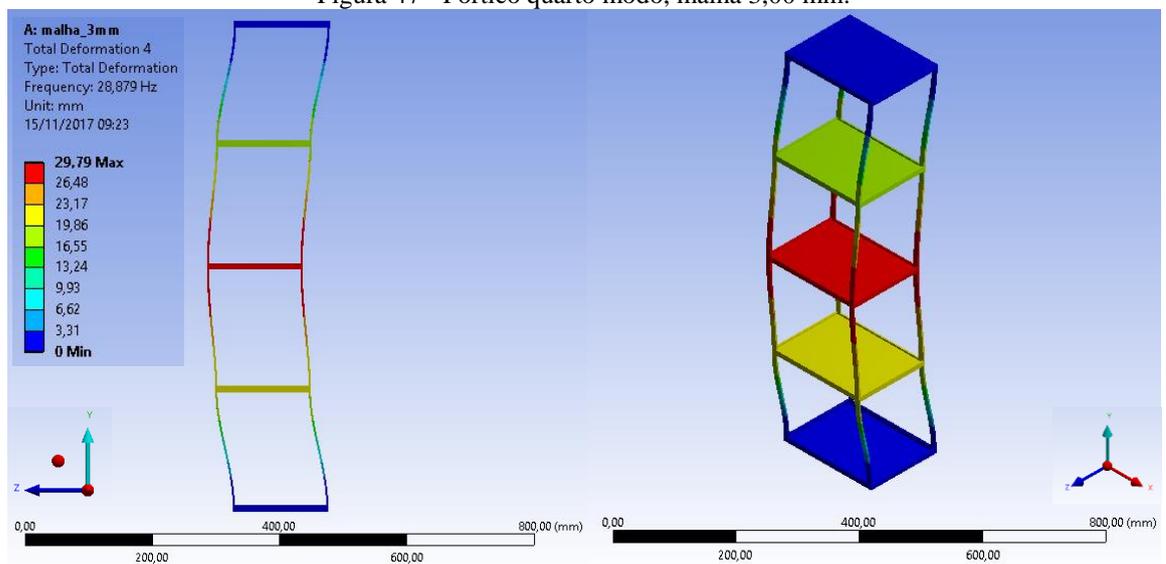
Fonte: a autora.

Figura 46 - Pórtico terceiro modo, malha 3,00 mm.



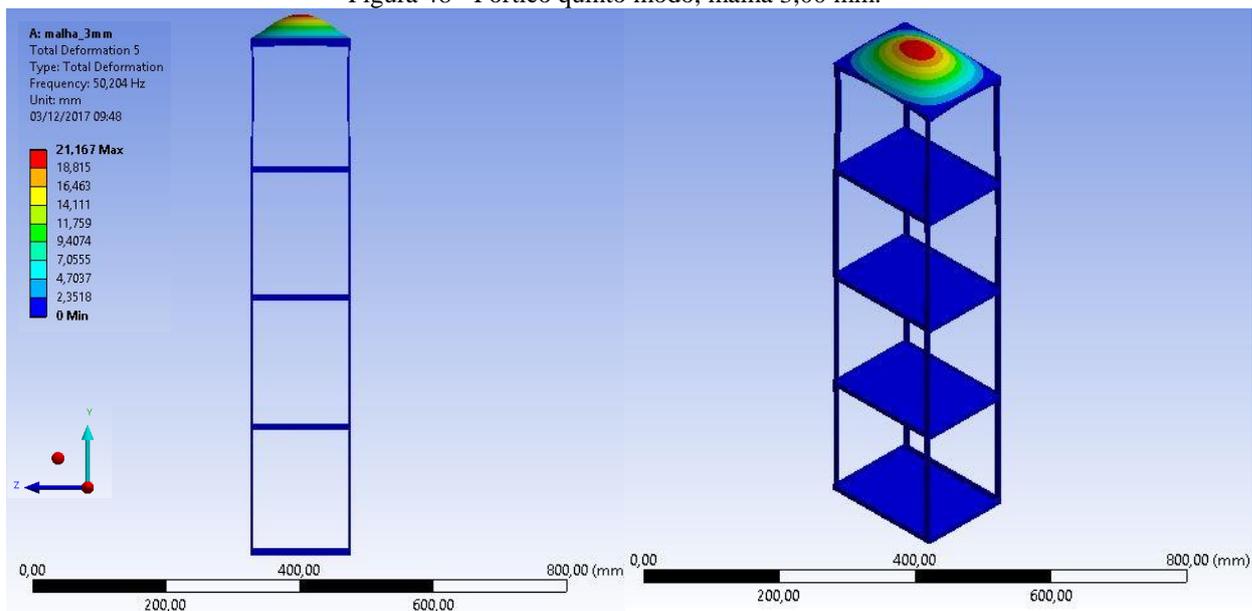
Fonte: a autora.

Figura 47 - Pórtico quarto modo, malha 3,00 mm.



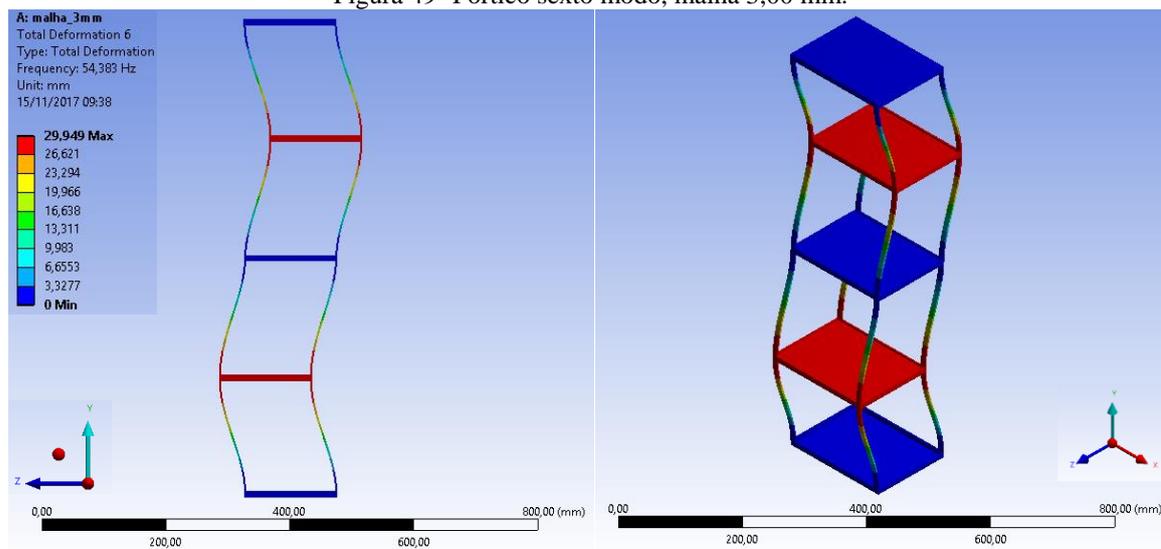
Fonte: a autora.

Figura 48 - Pórtico quinto modo, malha 3,00 mm.



Fonte: a autora.

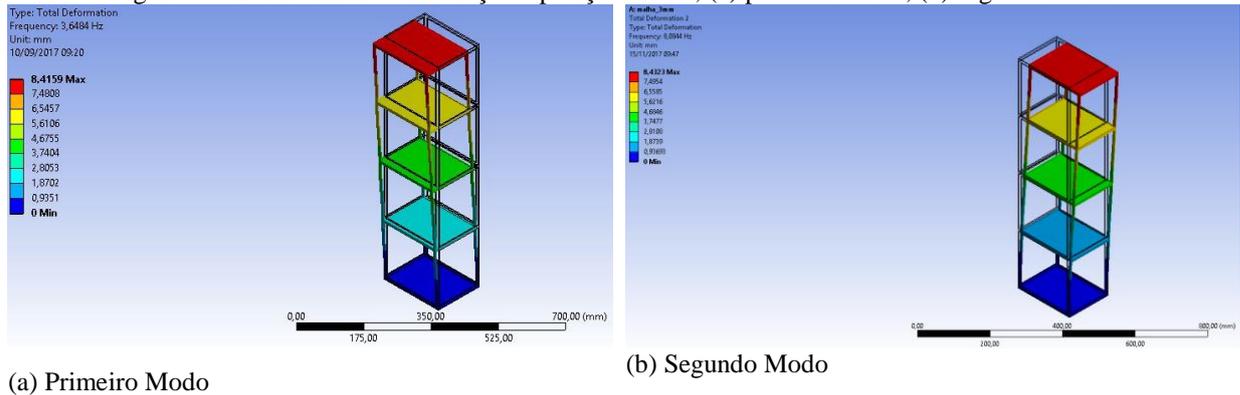
Figura 49- Pórtico sexto modo, malha 3,00 mm.



Fonte: a autora.

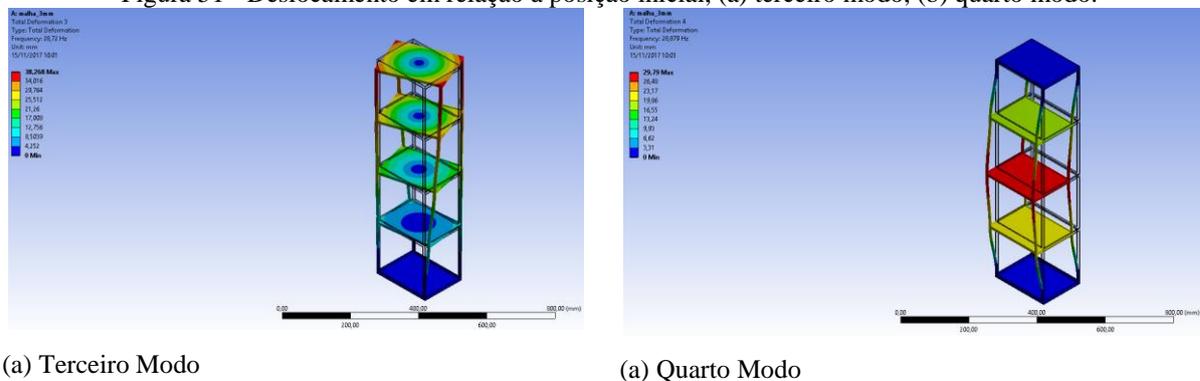
As Figura 50 e Figura 51 apresentam o deslocamento do pórtico em relação à posição inicial, referente aos quatro primeiros modos de vibrar.

Figura 50 - Deslocamento em relação à posição inicial, (a) primeiro modo; (b) segundo modo.



Fonte: a autora.

Figura 51 - Deslocamento em relação à posição inicial, (a) terceiro modo, (b) quarto modo.



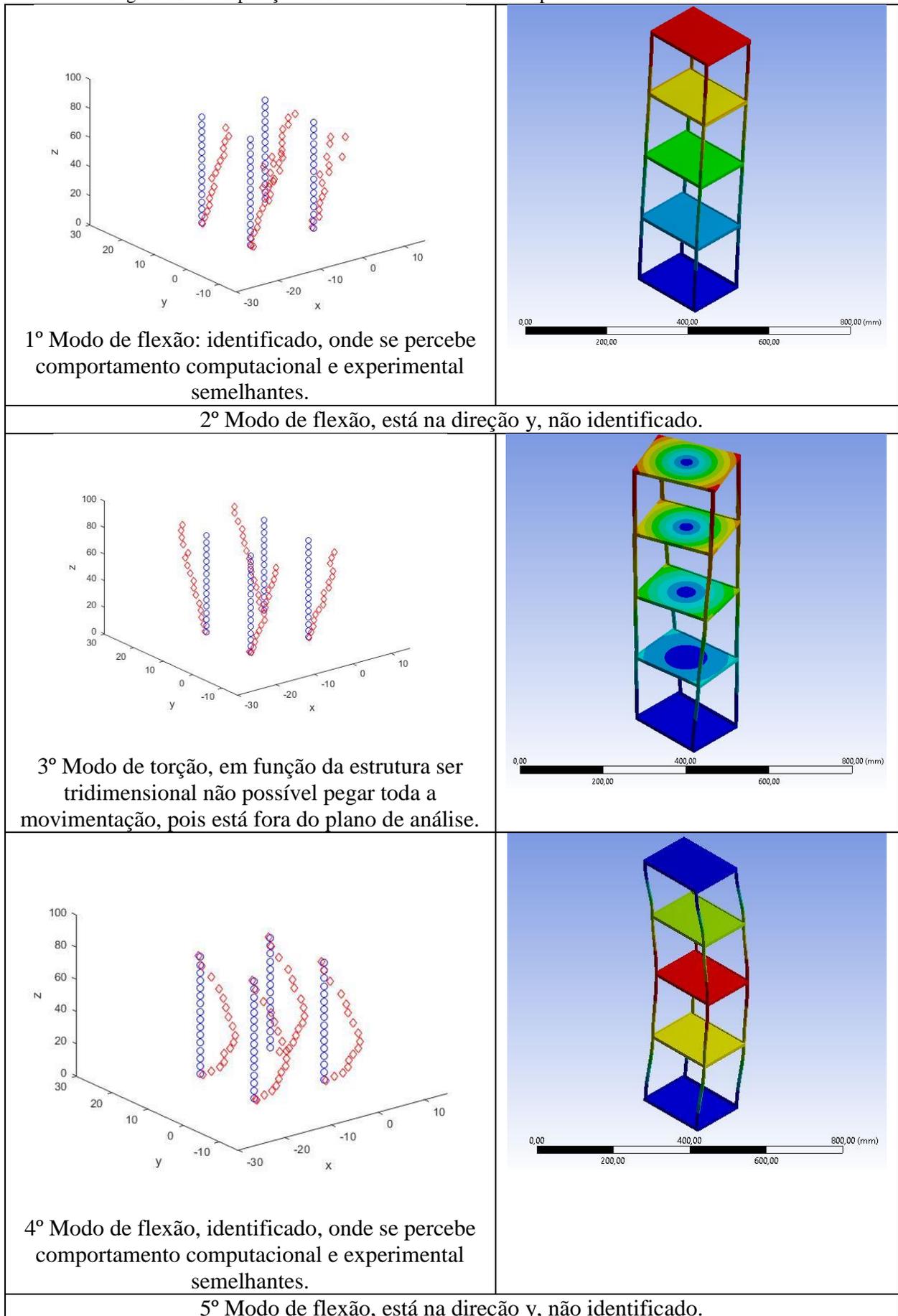
Fonte: a autora.

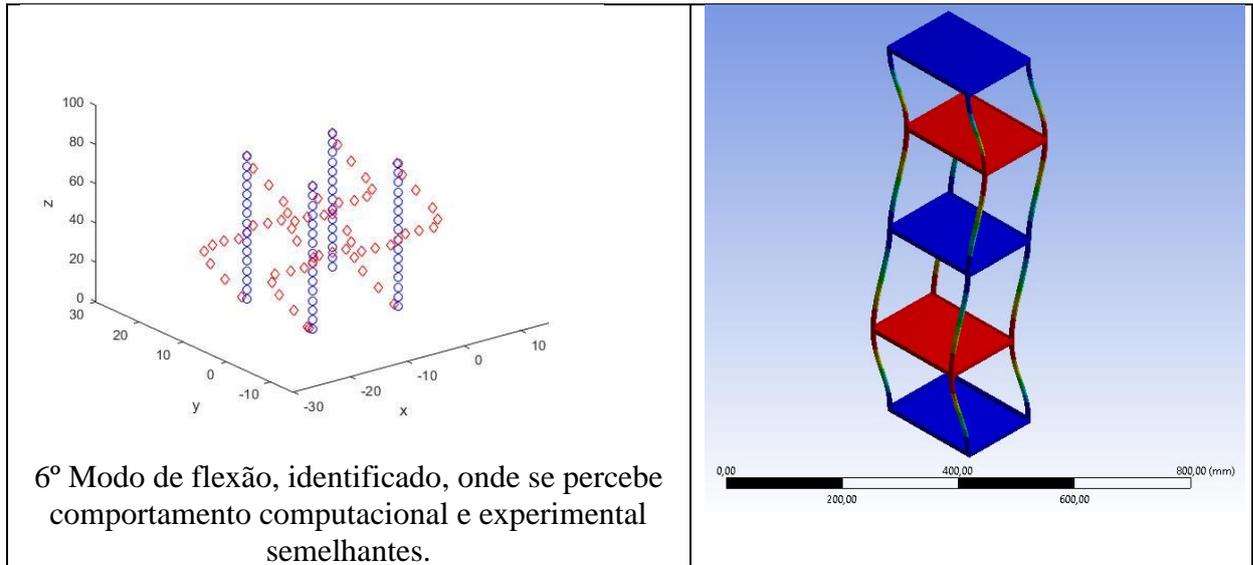
Os resultados computacionais das primeiras frequências são comparados com os resultados obtidos no ensaio experimental. Os modos identificados estão representados na Figura 52.

Nem todos os modos de vibração foram possíveis de identificação em função de o pórtico ser tridimensional. Os modos que se apresentam fora do plano de análise não foram possíveis de identificar.

Os modos de vibração do pórtico simulado computacionalmente com o experimental são similares, comprovando desta forma que os resultados numéricos obtidos para os modos de vibrar do pórtico apresentam boa precisão.

Figura 52 - Comparação entre os modos encontrados experimentalmente e os simulados.





Fonte: a autora.

Tabela 11 - Descrição dos modos de vibração do pórtico metálico.

Modo	Descrição
1º	Flexão nos pilares, predominante no sentido de menor dimensão.
2º	Não identificado.
3º	Torção em torno do eixo central do pórtico.
4º	Flexão nos pilares com sentidos contrários.
5º	Não identificado.
6º	Flexão nos pilares com sentidos contrários.

Fonte: a autora.

## 5.1 ESCOAMENTO EM TORNO DE UM CILINDRO – BIDIMENSIONAL

Um dos objetivos apresentados é identificar o comportamento do pórtico metálico, quando este estiver sujeito à ação do escoamento de um fluido. Toda estrutura apresenta uma resposta dinâmica quando sujeita a pressão provocada pelo escoamento de um fluido, gerando consequências diretas deste carregamento na análise estrutural. A resposta de uma estrutura sujeita a ação de um fluido será o deslocamento da estrutura provocada pela pressão do escoamento.

As simulações de escoamento apresentadas a seguir, buscam mostrar o comportamento do escoamento quando incide sobre estruturas, avaliado a partir de variáveis como velocidade, pressão e a deformação que será provocada na estrutura em análise.

A interação fluido-estrutura simulada levou consideração o parâmetro frequência natural, onde os valores utilizados são de baixas frequências, por provocar efeitos danosos maiores.

Nas simulações do escoamento do fluido foram realizados testes de escoamento em um canal utilizando obstáculos para que o comportamento do escoamento se assemelha-se a situações reais encontradas em cidades.

Com o intuito de identificar a resposta da estrutura, perante a interação fluido-estrutura, na sequência serão apresentadas as simulações realizadas para atender o objetivo.

A seguir apresenta-se um problema considerado inicial no estudo numérico do escoamento ao redor de geometrias. O objetivo desta etapa é testar a precisão física dos resultados obtidos com o software ANSYS em simulações contendo apenas o escoamento.

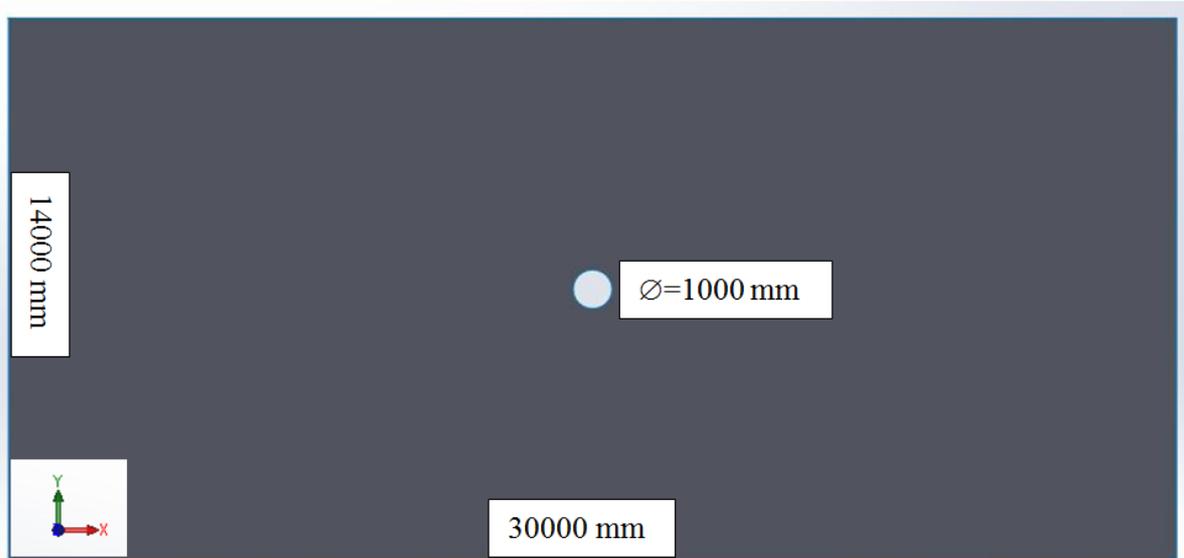
Este caso apresenta o escoamento de um fluido bidimensional, onde temos o escoamento constante em todo o espaço, chamado de canal. Além disso, tem-se a incidência do fluido sobre cilindro localizado na parte central do canal.

O contorno localizado à esquerda é denominado de entrada do fluido, onde se tem uma velocidade constante  $u_{\infty}=80$ . No contorno da direita tem-se a condição que a pressão é nula, ou seja,  $p=0$ . No contorno superior e inferior os parâmetros de velocidade normal e tensão de cisalhamento também são nulos. O fluido analisado possui densidade  $\rho=1 \text{ kg/m}^3$  e viscosidade  $\mu=1 \text{ kg/m.s}$ .

A geometria bidimensional possui uma extensão de 30000 mm de comprimento e 14000 mm de altura. Seu plano foi modelado como superfície. O cilindro está localizado na parte central da superfície, possuindo um diâmetro de 1000 mm.

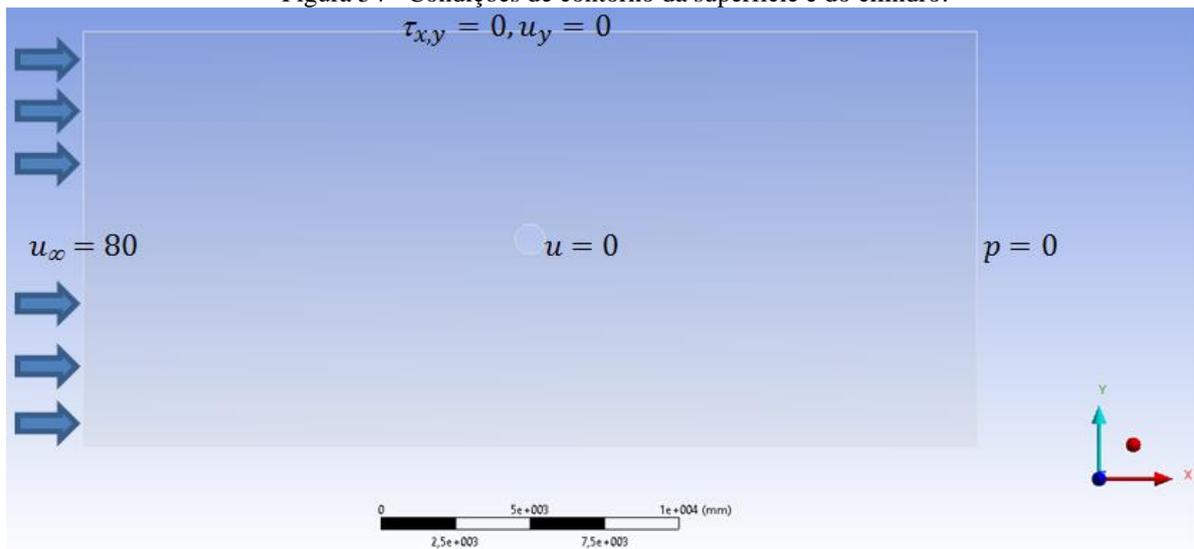
A principal finalidade de realizar a simulação é verificar o comportamento do escoamento do ar em torno do cilindro e o seu comportamento junto às fronteiras, conforme ilustram as Figura 53 e Figura 54.

Figura 53 - Geometria da superfície.



Fonte: a autora.

Figura 54 - Condições de contorno da superfície e do cilindro.

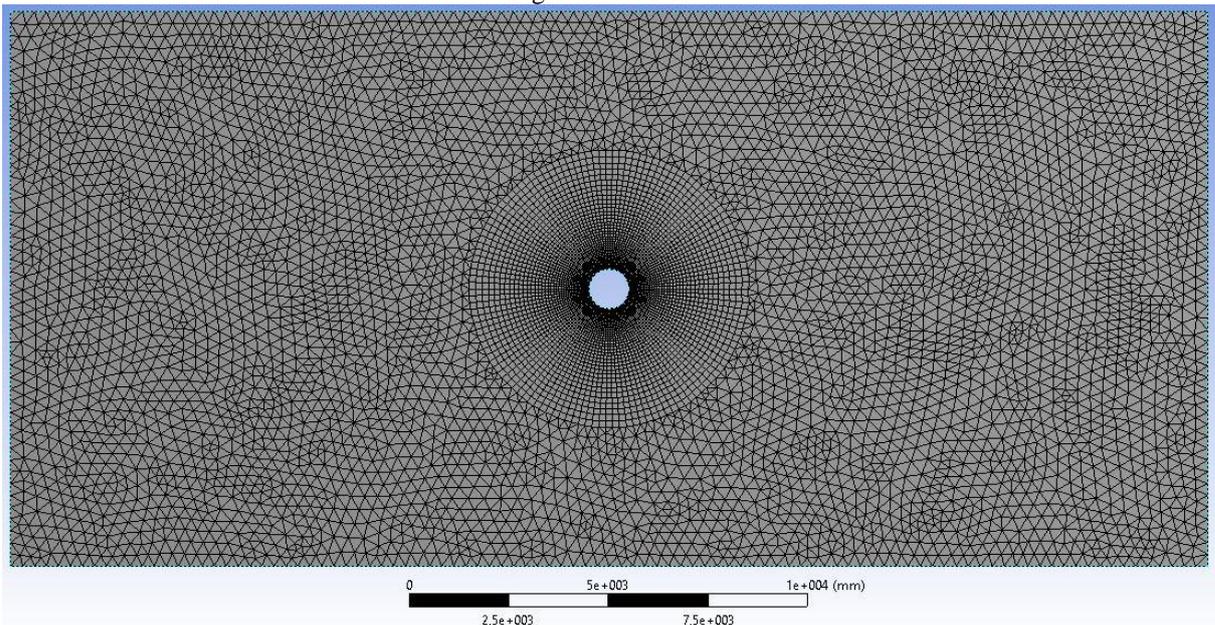


Fonte: a autora.

Foi utilizada a biblioteca Fluent do software ANSYS para resolver as equações de Navier-Stokes. Na geração da malha utilizou-se elementos triangulares e na parte central, onde foi realizado o refinamento temos elementos retangulares, conforme ilustra a Figura 55.

A malha da Figura 55 possui 14020 elementos com 9940 nós. O refinamento da malha nas proximidades do cilindro foi realizado em camadas.

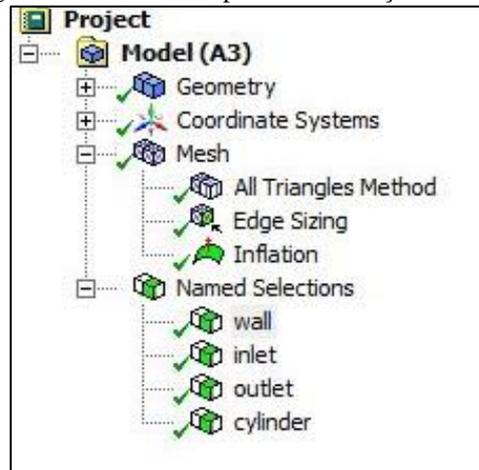
Figura 55 - Malha.



Fonte: a autora.

Para melhorar a qualidade dos elementos próximos ao cilindro a ser simulado, utilizou-se a ferramenta “inflation” (Figura 56). Essa ferramenta permite controlar os elementos gerados nas proximidades. Esse cuidado é necessário para melhor representar, isto é, aumentar a precisão da região de camada limite.

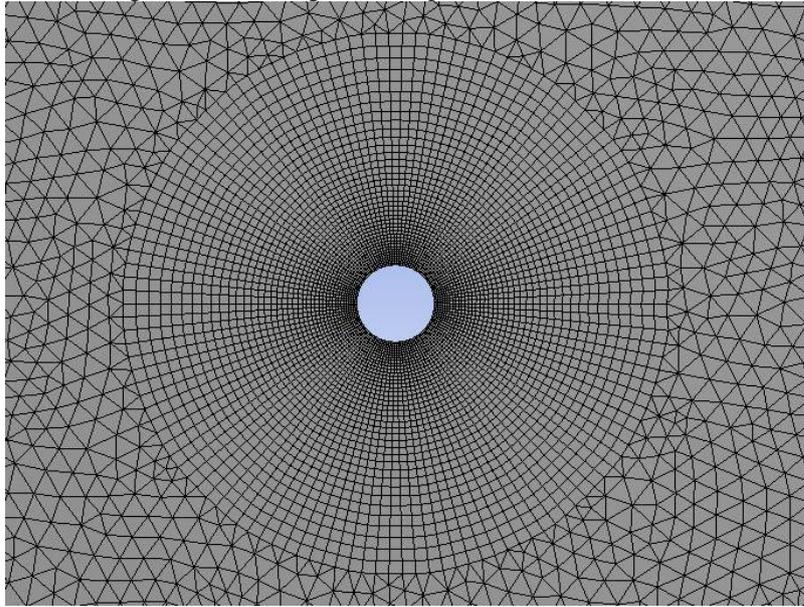
Figura 56 - Parâmetros para determinação da malha.



Fonte: a autora.

No perímetro do cilindro a malha utilizada apresenta-se mais refinada, ou melhor, discretizada. Assim, quanto mais refinada a malha nas proximidades do objeto de interesse mais preciso será o resultado encontrado (Figura 57).

Figura 57 - Malha gerada nas proximidades de interesse.

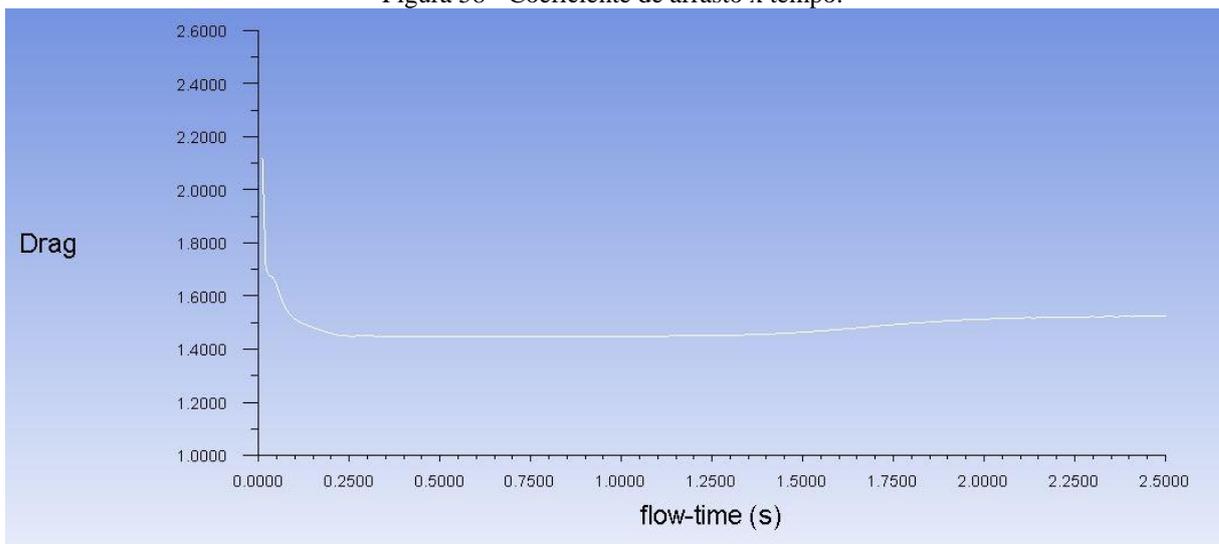


Fonte: a autora.

A Figura 58 ilustra o comportamento do coeficiente de arrasto em relação ao tempo.

O coeficiente de arrasto é uma grandeza adimensional. Analisando a figura percebe-se que este coeficiente apresenta um valor elevado no momento em que o fluido em escoamento entra em contato com o perímetro do cilindro, com um valor aproximado de 2,13. Com o passar do tempo o coeficiente vai diminuindo de valor até se aproximar de 1,5.

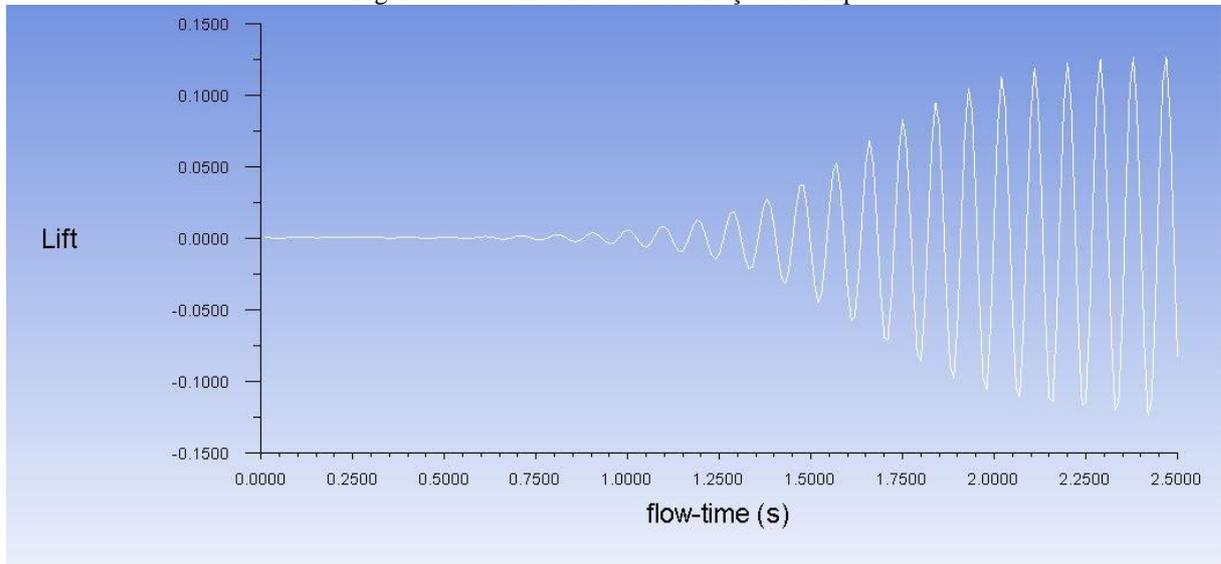
Figura 58 - Coeficiente de arrasto x tempo.



Fonte: a autora.

Na Figura 59 temos a oscilação do coeficiente de sustentação sobre o círculo. No início da oscilação temos uma amplitude pequena, com a evolução do tempo, percebe-se o aumento da amplitude de oscilação, apresentando um valor próximo de 0,125.

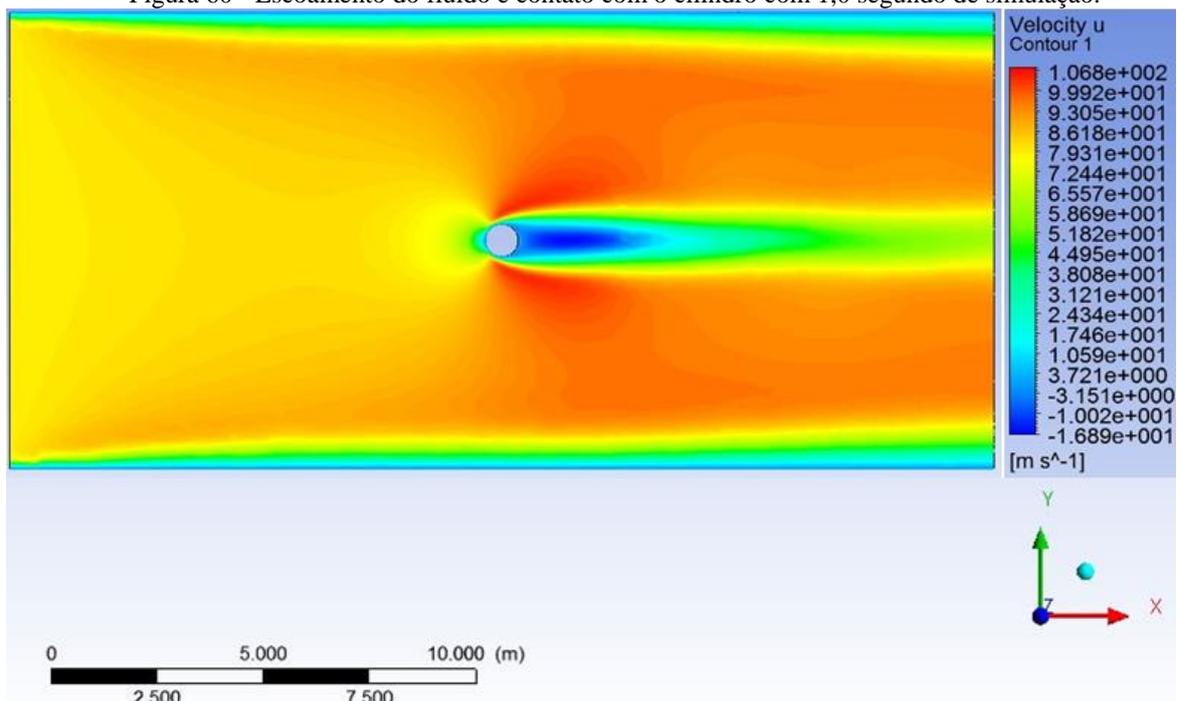
Figura 59 - Coeficiente de Sustentação x Tempo.



Fonte: a autora.

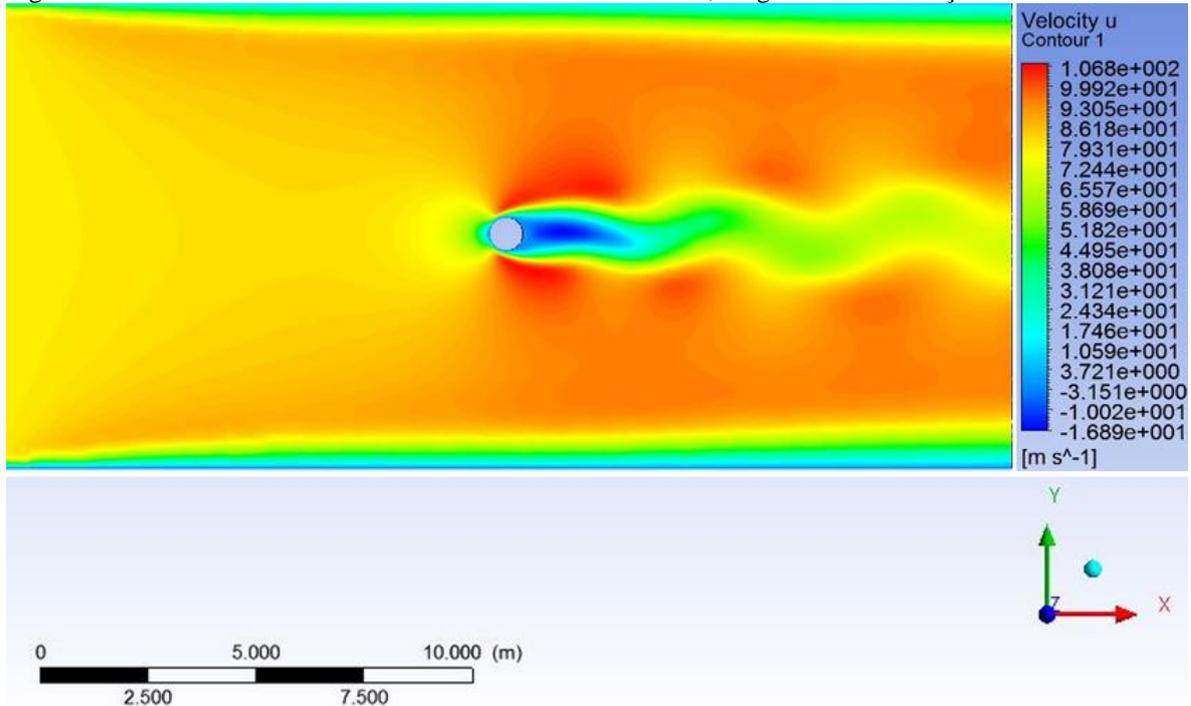
Nas figuras a seguir é apresentado o comportamento do escoamento do fluido em diferentes tempos de simulação.

Figura 60 - Escoamento do fluido e contato com o cilindro com 1,0 segundo de simulação.



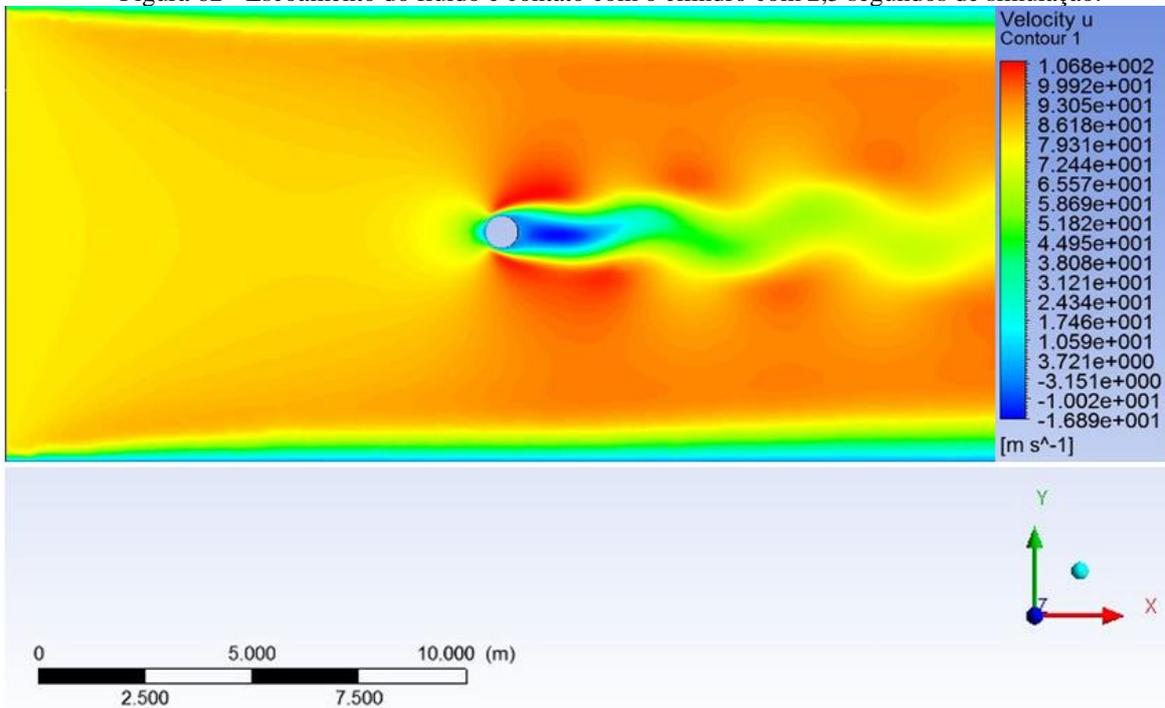
Fonte: a autora.

Figura 61 - Escoamento do fluido e contato com o cilindro com 2,0 segundos de simulação.



Fonte: a autora.

Figura 62 - Escoamento do fluido e contato com o cilindro com 2,5 segundos de simulação.



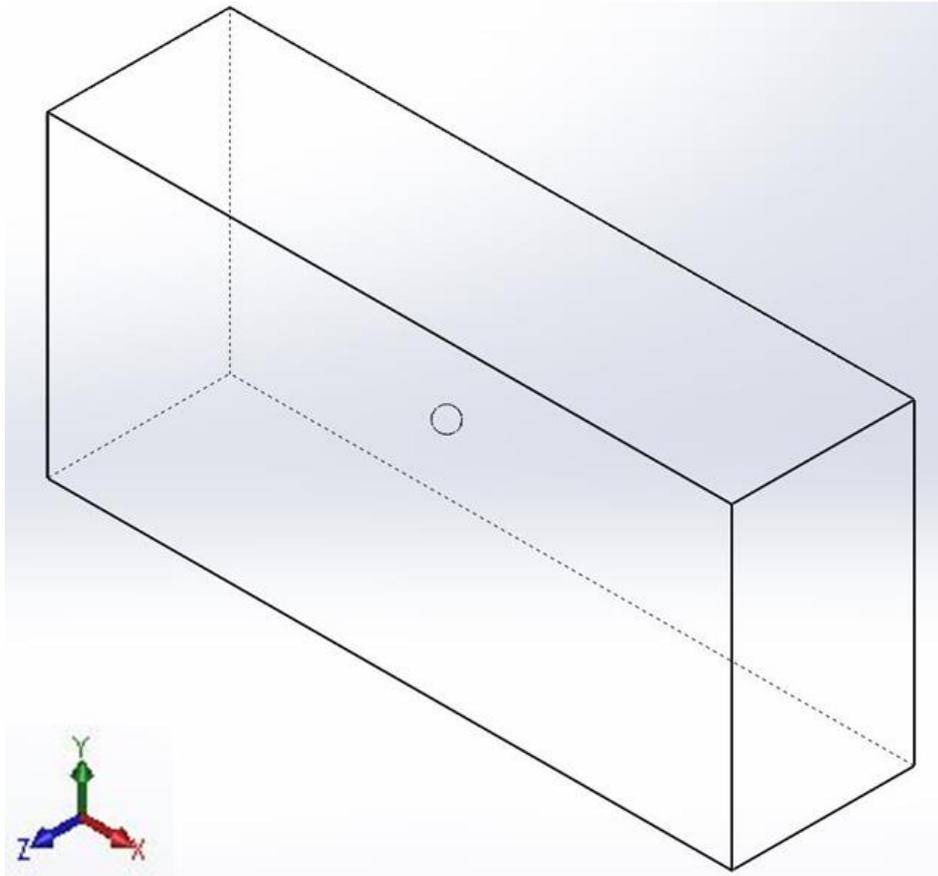
Fonte: a autora.

## 5.2 ESCOAMENTO EM TORNO DE UMA ESFERA

Na engenharia civil as estruturas e edificações, em sua grande maioria são concebidas com geometrias tridimensionais que estão sujeitas a ações variáveis de fluidos.

Para identificar o comportamento do fluido em torno de um objeto tridimensional, realizou-se a simulação computacional de um fluido, neste caso ar, com uma esfera inserida no interior do volume, conforme ilustra Figura 63.

Figura 63 - Geometria tridimensional.

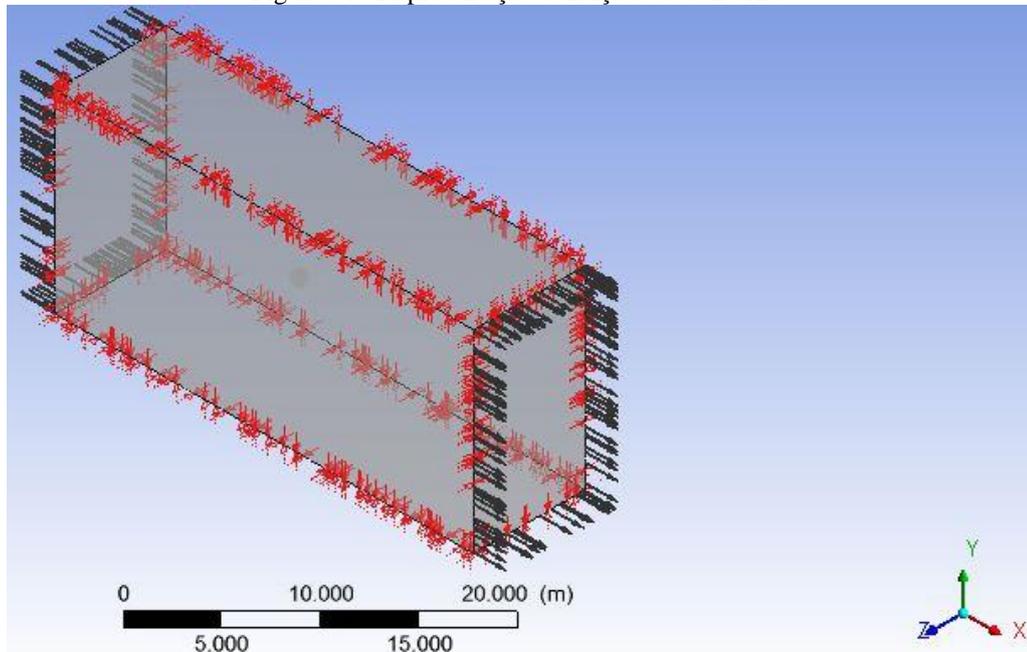


Fonte: a autora.

As dimensões do paralelepípedo representado são de 30.000 mm de comprimento, 14.000 mm de altura e 8000 mm de largura. A esfera apresenta-se locada a 14 000 mm da face de entrada, 7000 mm da face inferior e a 4000 mm das faces laterais. A esfera possui um diâmetro de 1000 mm.

Para esta simulação utilizamos também o software ANSYS, onde as condições de contorno definidas foram velocidade de entrada simulada foi de 80,00 m/s, faces laterais simétricas, conforme ilustra Figura 64.

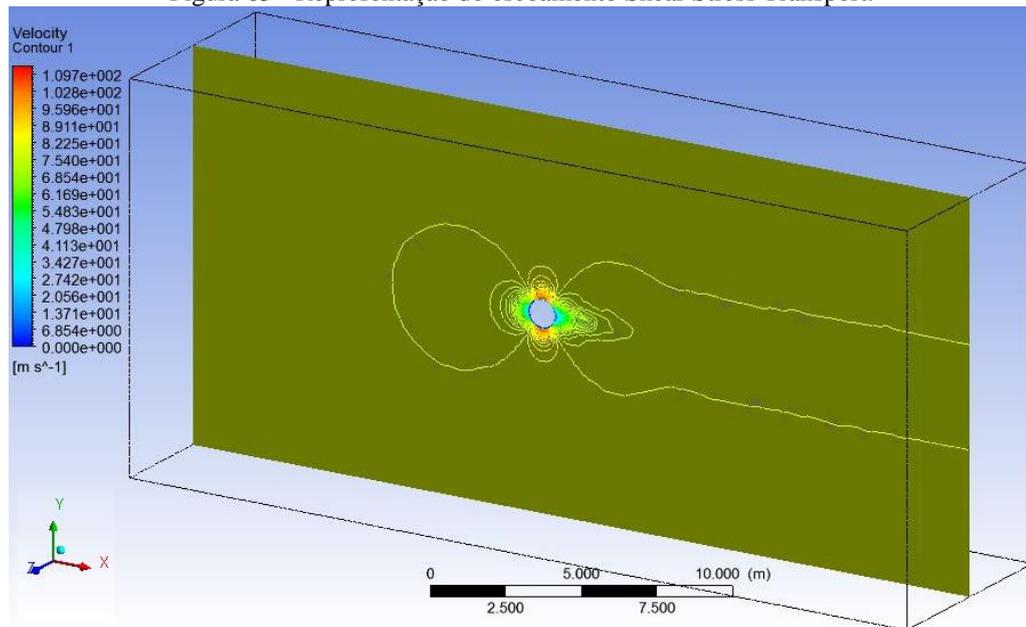
Figura 64 - Representação condições de contorno.



Fonte: a autora.

No software ANSYS foi selecionada a biblioteca CFX para esta simulação, com o método Shear Stress Transport, Figura 65.

Figura 65 - Representação do escoamento Shear Stress Transport.



Fonte: a autora.

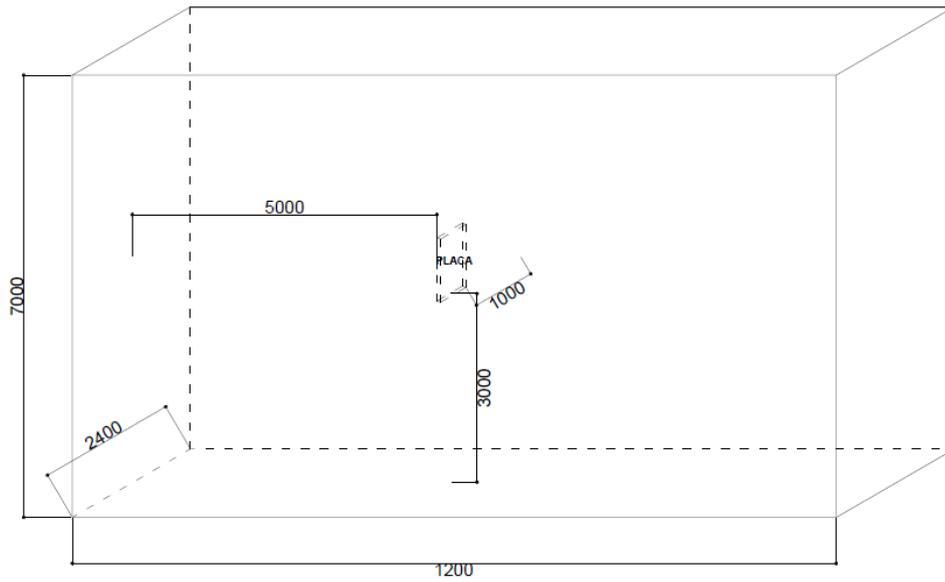
### 5.3 ESTUDO DE CASO – TRIDIMENSIONAL EM TORNO DE UMA PLACA

Para analisar o comportamento do fluido em torno de uma estrutura, elaborou-se uma geometria tridimensional, contemplando o fluido e uma placa, onde também foi considerado o material da placa aço ASTM A36.

O objetivo desta simulação é analisar a resposta dinâmica de uma estrutura imersa ao escoamento, e assim verificar a capacidade do software ANSYS, em conjunto da biblioteca CFX, na solução do problema acoplado.

A placa possui as dimensões de 60x400x1000 mm e encontra-se no interior do fluido (unidades em mm), conforme ilustra Figura 66.

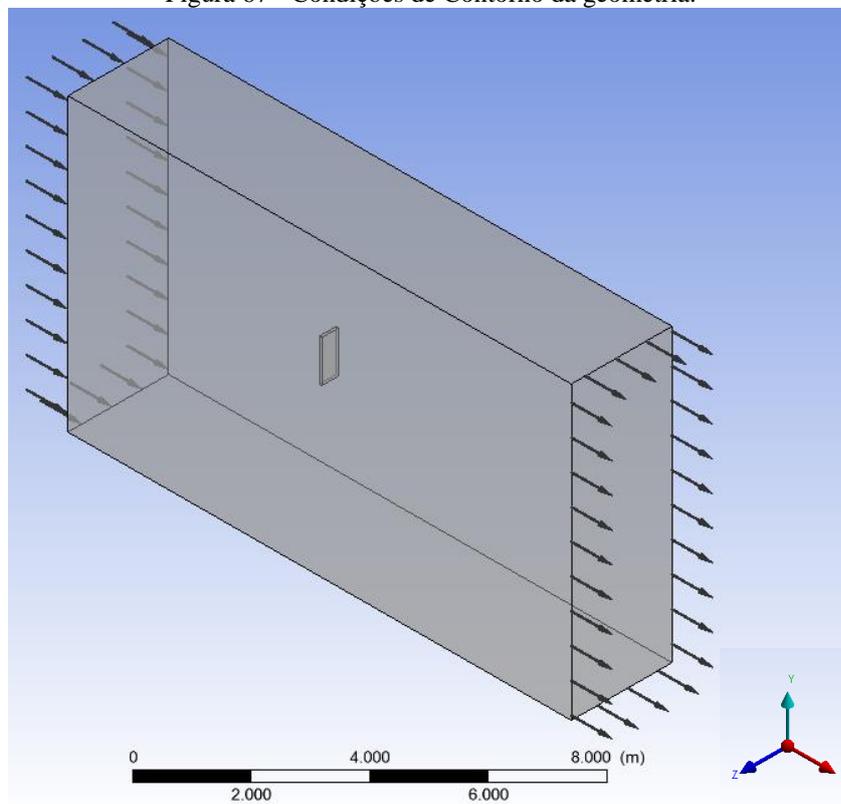
Figura 66 - Geometria fluido/placa.



Fonte: a autora.

As condições de contorno definidas foram velocidade de entrada simulada foi de 10,00 m/s e 80 m/s, faces laterais consideradas como paredes e a placa também considerada como parede, como exposto na Figura 67

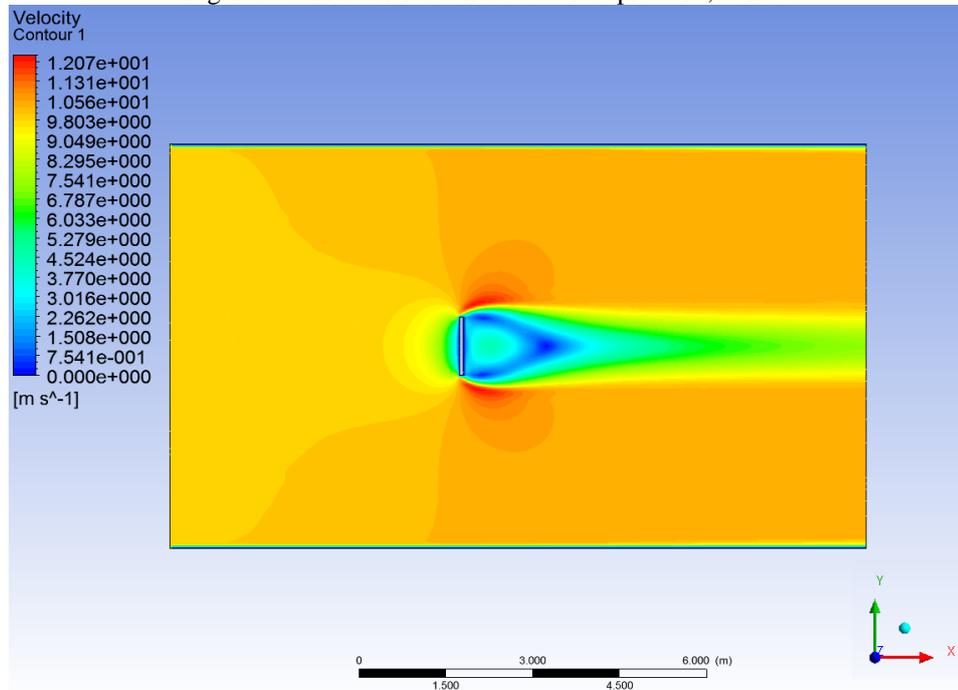
Figura 67 - Condições de Contorno da geometria.



Fonte: a autora.

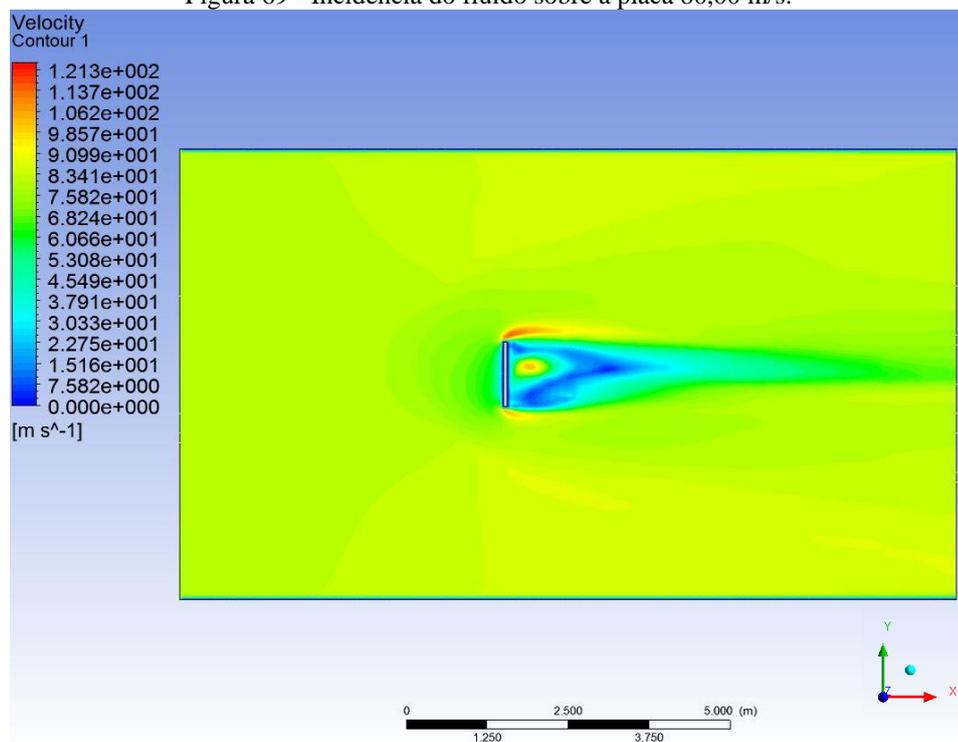
Como citado anteriormente para a simulação em questão utilizou-se duas velocidades diferente de entrada. Na Figura 68 e Figura 69, é possível visualizar a incidência do fluido sobre a placa.

Figura 68 - Incidência do fluido sobre a placa 10,00 m/s.



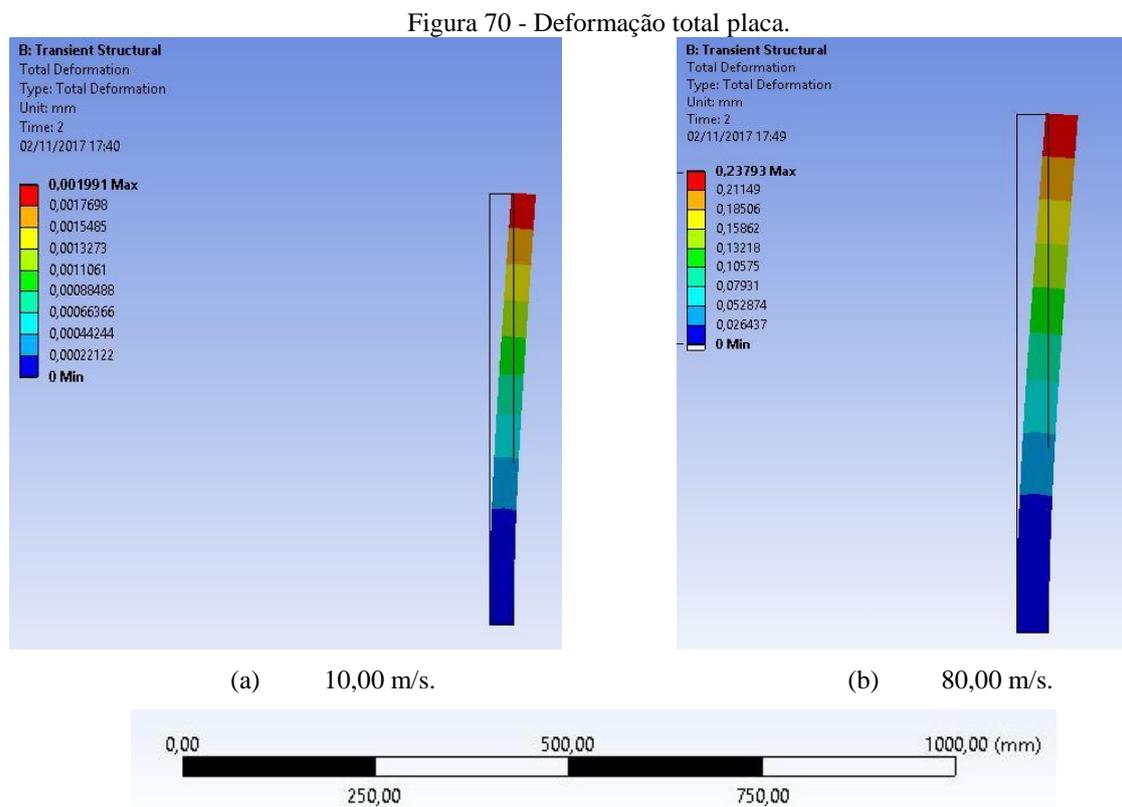
Fonte: a autora.

Figura 69 - Incidência do fluido sobre a placa 80,00 m/s.



Fonte: a autora.

O encontro do fluido com a placa provoca uma deformação (ação provocada pela pressão sobre a superfície de contribuição). No software ANSYS foi realizada esta transferência de pressão sobre a placa, onde para as duas diferentes velocidades, obtiveram-se deformações distintas: para velocidade de 10,00 m/s obteve-se uma deformação total de 0,001991 mm, já para a velocidade de 80,00 m/s a deformação total foi de 0,23793mm, conforme ilustra a Figura 70.



Fonte: a autora.

#### 5.4 ANÁLISE PÓRTICO TRIDIMENSIONAL

Objetivando analisar o comportamento de uma estrutura real quando esta estiver sujeita a ação de ventos aleatórios, realizou-se um estudo de malha bem como a simulação do escoamento do fluido.

A fim de determinar a malha utilizada de melhor convergência, realizou-se um estudo de convergência de malha, simulando-se três casos, para diferentes arestas do tetraedro para o

fluido e o pórtico metálico, conforme ilustra as tabelas a seguir. Além disso, são apresentados nestas tabelas dados estatísticos como número de elementos e nós.

Tabela 12 - Estudo de malha caso 01.

Fluido	Pórtico
Tipo do elemento: Tetraedros	Tipo do elemento: Tetraedros
Aresta do elemento: 100,00 mm	Aresta do elemento: 5,00 mm
Número de nós: 891.441	Número de nós: 110.771
Número de elementos: 5.177.255	Número de elementos: 53.026
Deformação total: 0,23588 mm	

Fonte: a autora.

Tabela 13 - Estudo de malha caso 02.

Fluido	Pórtico
Tipo do elemento: Tetraedros	Tipo do elemento: Tetraedros
Aresta do elemento: 75,00 mm	Aresta do elemento: 4,00 mm
Número de nós: 2.095.611	Número de nós: 179.603
Número de elementos: 12.250.696	Número de elementos: 88.650
Deformação total: 0,28487 mm	

Fonte: a autora.

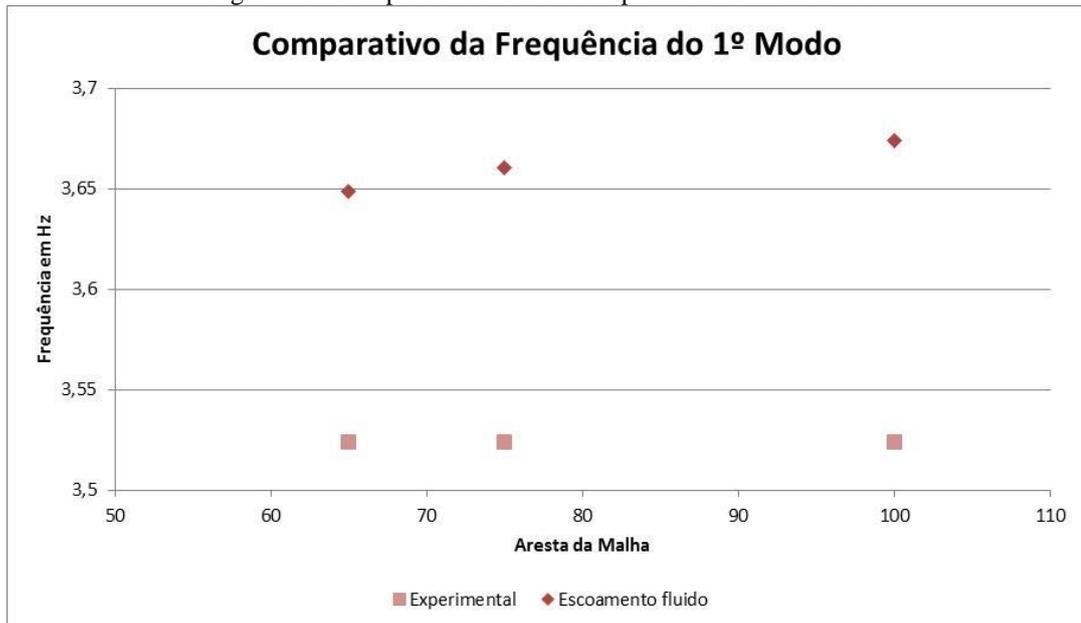
Tabela 14 - Estudo de malha caso 03.

Fluido	Pórtico
Tipo do elemento: Tetraedros	Tipo do elemento: Tetraedros
Aresta do elemento: 65,00 mm	Aresta do elemento: 3,00 mm
Número de nós: 3.207.729	Número de nós: 328.206
Número de elementos: 18.806.318	Número de elementos: 177.258
Deformação total: 0,29776 mm	

Fonte: a autora.

Com os dados obtidos na simulação e no experimento compararam-se as frequências, onde para os resultados apresentados neste trabalho optou-se pela malha intermediária por dois motivos: o primeiro tempo computacional, pois quanto mais refinada a malha maior será o tempo demandado para a simulação e o segundo a proximidade dos valores da frequência, conforme se ilustra na Figura 71.

Figura 71 - Comparativo resultados experimentais e simulados.



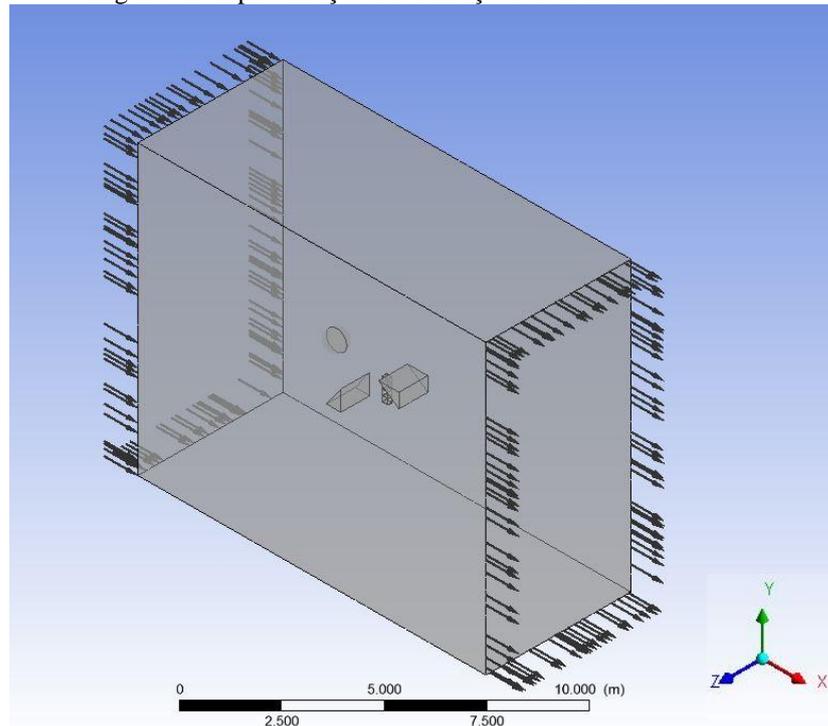
Fonte: a autora.

No pórtico tridimensional, modelaram-se em torno de sua geometria obstáculos, como uma esfera, duas cunhas. A região que envolve o pórtico e os obstáculos possui as seguintes dimensões: 12000,00 mm de comprimento, 10000,00 mm de altura e 5000,00 mm de largura. O pórtico apresenta-se localizado a 6000,00 mm da face de entrada do fluido, a 4000,00 mm da face inferior e na largura o eixo do pórtico está na cota 2500,00 mm. A Figura 73 apresenta a disposição dos obstáculos, bem como o volume do fluido.

Outra característica importante a se destacar é em relação ao pórtico, pois o mesmo apresenta sua base engastada e na laje superior do ultimo pavimento apresenta a massa acrescida para diminuir a frequência natural da estrutura.

Para esta simulação utilizou-se o software ANSYS, onde as condições de contorno definidas foram velocidade de entrada simulada foi de 80 m/s, faces laterais consideradas como paredes o pórtico e demais obstáculos também considerados como parede, como exposto na Figura 72.

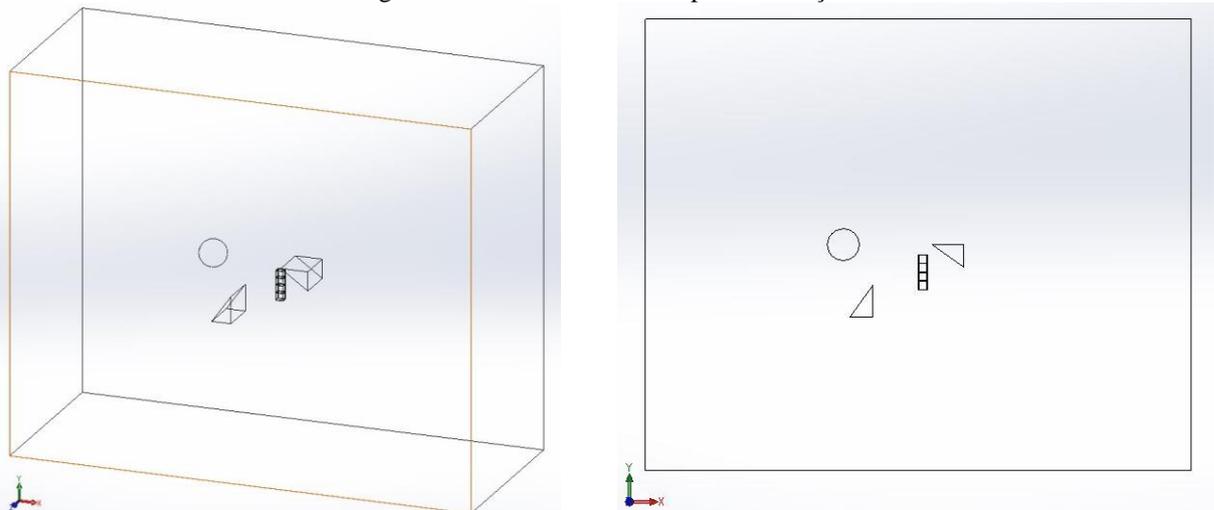
Figura 72 - Apresentação das condições de contorno.



Fonte: a autora.

Na Figura 73 ilustram-se os obstáculos utilizados para esta simulação, foram utilizadas uma esfera, duas cunhas, uma na parte frontal e uma na posterior do pórtico. Estes obstáculos tem a função de produzir um comportamento de escoamento irregular no fluido, isto é, gerar arrasto no pórtico.

Figura 73- Obstáculos e fluido para simulação.

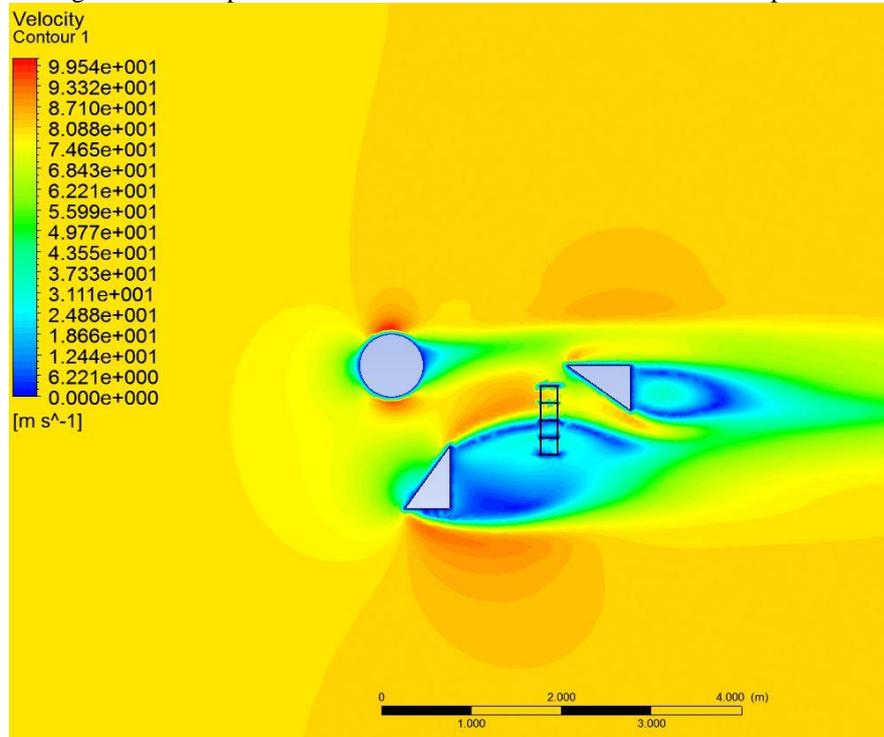


Fonte: a autora.

A malha utilizada possui elementos tetraédricos, possuindo para o fluido 2.095.611 nós e 12.250.696 elementos e para o pórtico, temos 179.603 nós e 88.650 elementos.

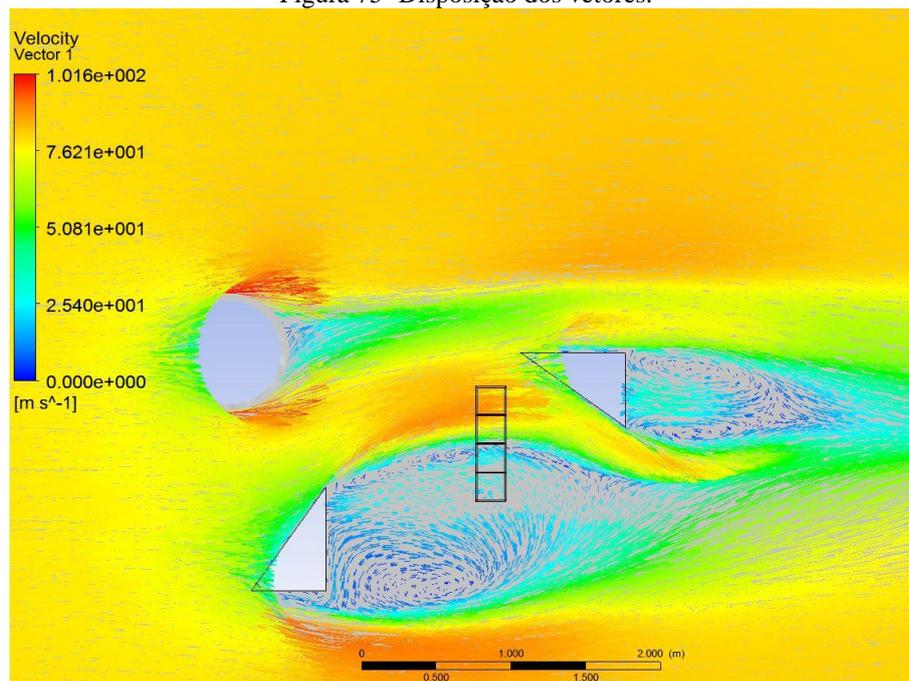
O comportamento do fluido pode ser observado nas figuras abaixo. Como se trata de pequenos deslocamentos buscou-se utilizar a melhor escala para que seja possível visualizar os modos de deformação.

Figura 74 - Comportamento do fluido incidindo sobre obstáculos e pórtico.



Fonte: o autor.

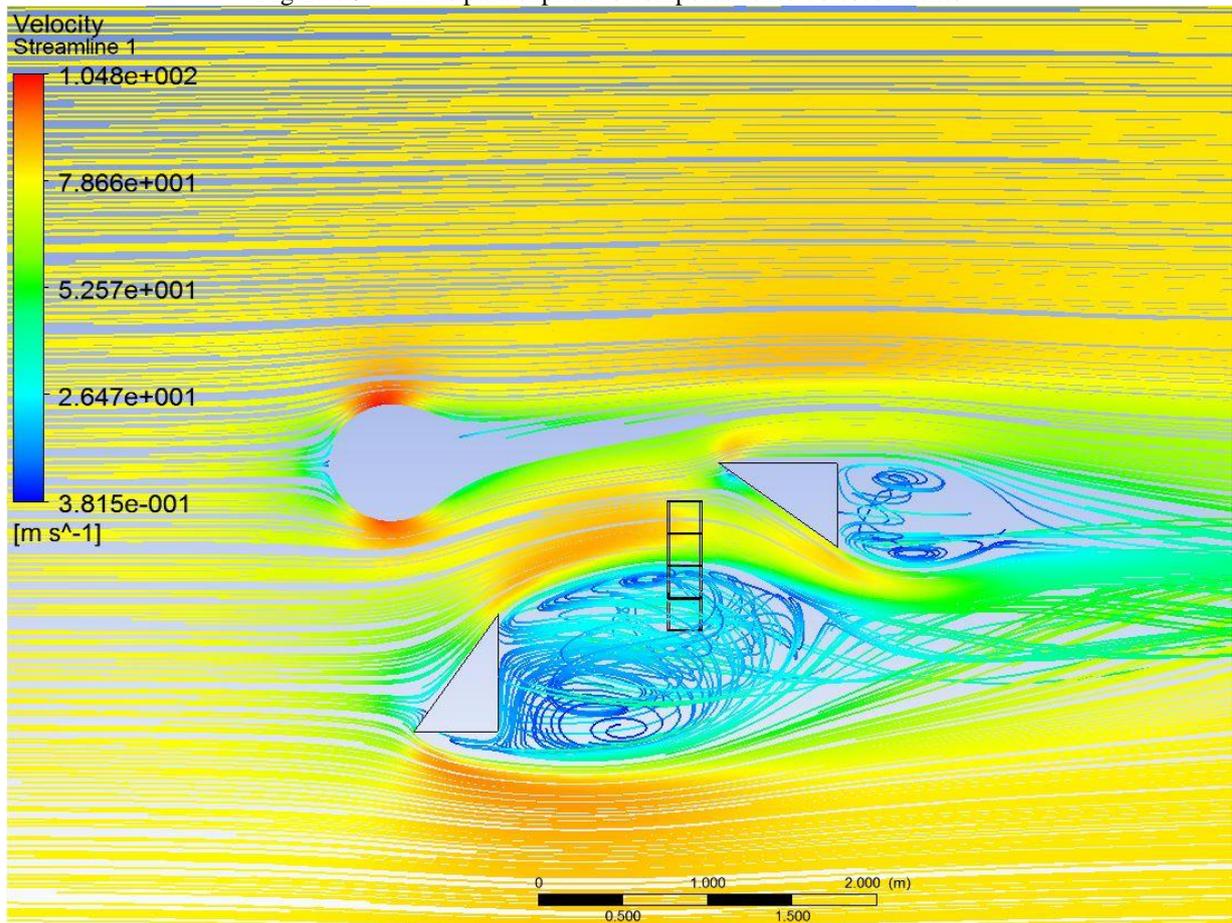
Figura 75- Disposição dos vetores.



Fonte: a autora.

O escoamento apresenta-se constante na entrada. Na sequência sofre uma colisão com os obstáculos a montante do pórtico, e desta forma o escoamento de ar chega oscilando através de vórtices até a estrutura que se encontra engastada na base, como temos nas estruturas civis reais. As linhas da Figura 76 ilustram o padrão de escoamento.

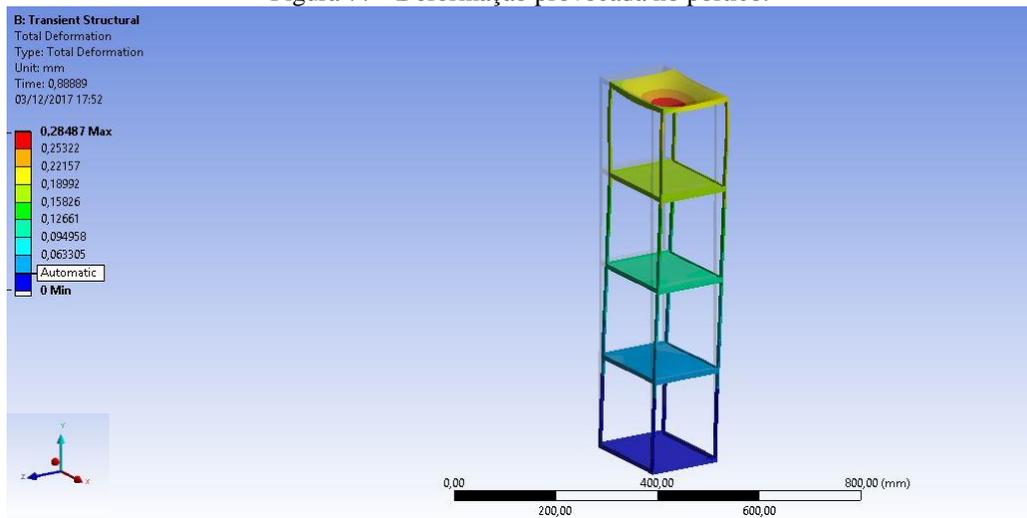
Figura 76 - Linhas para explicar o comportamento do escoamento.



Fonte: a autora.

O encontro do fluido com o pórtico metálico provoca uma deformação, ação provocada pela pressão sobre a superfície de contribuição, que neste caso são os pilares, vigas e lajes. Utilizando o software ANSYS foi realizada a transferência de pressão provocada pelo escoamento para o pórtico. Obteve-se o seguinte valor de deformação total conforme ilustra a Figura 77.

Figura 77 - Deformação provocada no pórtico.



Fonte: a autora.

Conforme exposto no decorrer dos resultados, percebe-se que na simulação numérica foi possível visualizar o deslocamento no pórtico metálico provocado pelo escoamento do fluido, da mesma forma como verificado na placa.

O valor do deslocamento foi pequeno, pois a frequência natural do escoamento não coincide com a frequência natural do pórtico.

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um estudo sobre Análise Modal e o comportamento dinâmico de um pórtico tridimensional quando exposto ao escoamento de um fluido.

A verificação dos resultados, parâmetros modais da estrutura, foram efetuados através de ensaio experimental realizado em laboratório e a simulação em software do pórtico metálico.

É importante salientar que as ferramentas utilizadas, como software aplicado e capacidade computacional, foram instrumentos disponíveis. Para um refinamento maior das malhas será necessário maior esforço computacional.

Com este trabalho verificou-se que a ação do vento sobre a estrutura provoca instabilidade, gerando vibração que é muito danosa e levando em alguns casos ao colapso, pois os elementos estruturais saem de um equilíbrio estático para uma condição de vibração que nem a estrutura consegue absorver totalmente.

Com relação à Análise Modal os resultados encontrados pelo método RFP ficaram muito próximo aos simulados no ANSYS (MEF). As frequências naturais encontradas, principalmente o segundo e o terceiro modo apresentaram diferenças. Estas pequenas divergências podem ter sido provocadas por:

- A malha utilizada ser grossa;
- Divergências geométricas entre os pórticos analisados (pórtico real e o modelado pelo método analítico);
- Interferência externa no momento de realização do ensaio (erro humano, aferição dos instrumentos, ruído);

O primeiro modo identificado na simulação foi comparado com o primeiro modo obtido nos experimentais e revelaram-se satisfatórios, apesar de certa discrepância. Em relação ao segundo e terceiro modos, estes apresentaram uma diferença maior, mas para a análise também foram considerados satisfatórios.

Foram realizadas simulações do escoamento do fluido em torno de anteparos, com diversos formatos, como cilindro, cunhas e geometrias em forma de paralelepípedos. A intenção destas simulações foi identificar a variação de pressão sobre a superfície de incidência e a configuração dos vórtices formados após o impacto com a geometria.

Com diferentes formatos cria-se a ideia dos obstáculos que temos nas cidades e parques industriais, onde com o escoamento as estruturas estão sujeitas a pressões oscilatórias, provocando movimentação nos elementos estruturais que se apresentam de forma estática.

Além disso, destaca-se que frequências naturais que possuem valores menores provocam efeitos danosos maiores nas estruturas.

Ante ao descrito, pode-se afirmar que o modelo computacional foi validado e, portanto o objetivo principal foi cumprido.

## 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como decorrência dos resultados conseguidos, apresentam-se algumas perspectivas para trabalhos futuros que envolvem a área de pesquisa aqui estudada:

- Execução de testes experimentais e simulações com software, utilizando a mesma metodologia em um pórtico parafusado, comparando os resultados encontrados com o aqui obtido;
- Utilização de outros métodos teóricos para análise dos resultados experimentais para realizar uma comparação, aferindo as diferenças e variações de cada método, bem como o uso de outro software para simulação;
- Identificação de outros modos de vibrar da estrutura;
- Condução de testes experimentais operacionais em edificações.

## 7 REFERÊNCIAS

ANSYS® **Academic Research Mechanical and CFD**. Versão 16.2, Licence Pak Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Departamento Acadêmico de Mecânica # 672590.

Almeida, S. F. **Análise Experimental Estática e Dinâmica da Rigidez de Ligações Viga-pilar de Concreto Pré-moldado**. Tese de Doutorado. São Carlos, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: Forças Devidas ao Vento em Edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 1988. 66 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 238 p.

BAZILEVS, Y., TAKIZAWA, K., & TEZDUYAR, T. E. “**Computational fluid-structure interaction: methods and applications**”. John Wiley & Sons. 2013.

CAMPREGHER, R. et al. **Computations of the Flow Past a Still Sphere at Moderate Reynolds Numbers Using an Immersed Boundary Method**. J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng. [online]. 2009, vol.31, n.4, pp.344-352. ISSN 1678-5878. <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-58782009000400009>.

CANO, N. A. O. **Avaliação de sistemas de isolamento para o controle de vibrações de edifícios submetidos a excitação de base**. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Brasil, 2013.

CASTEJON, Danilo Vieira. **Métodos de redução do arrasto e seus impactos sobre a estabilidade veicular**. Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Aeronaves) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

CORREIO DO ESTADO. **Inmet confirma tornado em Xanxerê, no Oeste catarinense**. Santa Catarina: 2015. Disponível em: <http://www.correiodoestado.com.br/brasilmundo/inmet-confirma-tornado-em-xanxere-no-oeste-catarinense/244676/>. Acesso em 29 out. 2017.

EWINS, D. J. “**Modal Testing: Theory, Practice and Application**”. John Wiley, Philadelphia, 2nd edition, 2000.

FISH, J. BELYTSCHKO, T. **A First Course in Finite Elements**. Wiley, 2007.

FORTUNA, A. O. (2002). **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: Conceitos básicos e aplicações**. Editora da Universidade de São Paulo – Edusp, São Paulo-SP.

GERMANO, E. B. M.R. **Otimização de Forma de Placas para o Posicionamento de Frequências Naturais: Resultados Numéricos e Experimentais**. Dissertação. Universidade de São Paulo, 2011.

GOLÇALVES, N. D. F. **Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas**. Tese. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 2007.

GUILLAUME, P. Modal Analysis. **Encyclopedia of Life Support Systems**, Oxford (UK), 2002. Disponível em: <<http://mech.vub.ac.be/avrg/publications/ModalAnalysis.pdf>>. Acesso em: 01/11/2017.

HE, J. FU, Z. **Modal Analysis**. Butterworth Heinemann., 2001.

IGLESIAS, A. M. “**Investigating various modal analysis extraction techniques to estimate damping ratio**”. Thesis of master degree submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2000.

LIMA, R. C. **Simulação de Grandes Escalas de Escoamentos Incompressíveis com Transferência de Calor e Massa por um Método de Elementos Finitos de Subdomínio**. Dissertação. Universidade Estadual Paulista, 2005.

KOUROUSSIS, G., BEM FEKIH, L., CONTI, C., VERLINDEN, O. “**EasyMod: a matlab/scilab toolbox for teaching modal analysis**”. Proceedings of the 19th International Congresso on Sound and Vibration, Vilnius (Lituânia), July 9-12,2012.

MASOTTI, Diego. **Comparação de Métodos de Determinação do Amortecimento Estrutural Através de Técnicas de Ajuste de Curvas de Funções Resposta em Frequência**. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

MATWEB, Material Property Data. **ASTM A36 steel, bar**. Disponível em: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=d1844977c5c8440cb9a3a967f8909c3a>. Acesso em 07 set. 2017.

MATLAB v8.2. **The Language of Technical Computing**. Mathworks Inc, 2014.

MEIROVITCH, L. **Fundamentals of vibration**. College of Engineering: Virginia Polytechnic Institute and State University. McGraw–Hill, 2001. 806 p.

NUNES J., O. A. **Identificação dos parâmetros modais utilizando apenas as respostas da estrutura - Identificação no domínio do tempo**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, 2006.

OMEGA, **Sua Fonte Única Para Medição E Controle De Processos**. Introdução aos acelerômetros. Disponível em: <http://br.omega.com/prodinfo/acelerometros.html>. Acesso em 06 set. 2017.

PAÏDOUSSIS, M. P. **Fluid-Structure Interactions Slender Structures and Axial Flow. 2. Ed.**, Canadá: Elsevier Ltd, 2014.

PEGORARO, M. **Estudo da Análise Modal Baseado no Acoplamento Fluido-estrutura**. Dissertação de Mestrado. Pato Branco/PR: 2016.

PEREIRA, L. A. S. et al. **Proposta de um isolamento para edifícios submetidos à excitação de base**. Brasília/DF. XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. CILAMCE 2016. 18 p. Disponível em: <http://periodicos.unb.br/index.php/ripe/article/view/23720/17043>. Acesso em 08 nov. 2017.

PRAZZO, Carlos Eduardo. **Análise modal de uma estrutura do tipo viga utilizando materiais piezelétricos (PVDF) como sensores.** Dissertação de mestrado. Ilha Solteira/SP: [s.n.], 2011. 139 p.

RAO, Singiresu. **Vibrações mecânicas.** 4. ed., São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

REDDY, J. N. **An Introduction to the Finite Element Method.** Texas, USA: Ed. 3. Mc Graw Hill. 2006. 755 p.

RIBEIRO, R. S. et al. **Análise dinâmica em modelo reduzido de uma estrutura com dois pavimentos.** Universidade de Brasília - Departamento de Engenharia Mecânica. Brasília, DF Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. Vol. 11, N.º 1, pp. 47-58, 2007. Disponível em: <http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:iberoingmecanica-2007-1-0000/pdf>. Acesso em 08 nov. 2017.

RICHARDSON, M. H.; FORMENTI, D. L. **Parameter estimation from frequency response measurements using rational fraction polynomials.** 1<sup>st</sup> IMAC Conference, Orlando, FL, 1982. 15 p.

SCHWARZ, B. J.; RICHARDSON, M. H. **Experimental Modal Analysis.** Vibrant Technology, Inc. Jamestown, California 95327, 1999. 12 p.

VASCONCELLOS, G. L. F. et al. **Estudo numérico do escoamento ao redor de um cilindro circular em um túnel de vento para baixas velocidades para diferentes rotações.** Juiz De Fora/MG. XI Simpósio de Mecânica Computacional. SIMMEC/EMMCOMP 2014. 2014. 15p. Disponível em: [http://www.ufjf.br/simmec-emmcomp-2014/files/2014/05/simmec-emmcomp-2014\\_submission\\_103.pdf](http://www.ufjf.br/simmec-emmcomp-2014/files/2014/05/simmec-emmcomp-2014_submission_103.pdf). Acesso em 07 nov. 2017.

ZIENKIEWICZ, O. C. e TAYLOR, R. L. **“The Finite Element Method”**, Fourth Edition, McGraw-hill, Pub. Co. Ltd. UK, 2000.

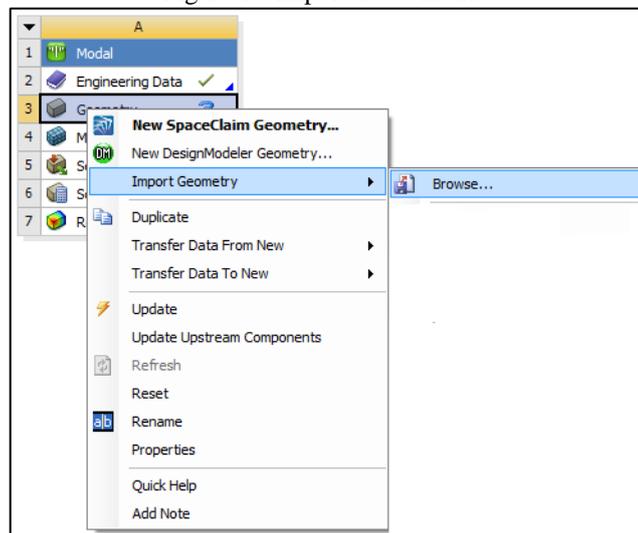
## 8 ANEXOS

### 8.1 ANEXO 1 – PROCEDIMENTO SIMULAÇÃO ANSYS ANÁLISE MODAL

Para este trabalho a geometria foi modelada no Solid Works. Um cuidado que deve-se ter é salvar o arquivo na extensão *.igs* ou *parasolid.xt* para que seja possível importar o arquivo para o ANSYS.

Na sequencia abre-se a janela do programa ANSYS, onde escolhe-se a opção Modal na lateral esquerda. Após com o botão direito do Mouse clica-se sobre Geometry – Import Geometry e procura-se o local onde o arquivo está salvo, conforme Figura 1 a seguir.

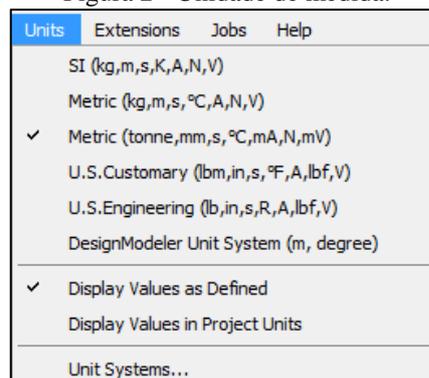
Figura 1 - Importar Geometria.



Fonte: a autora.

OBS. É importante verificar antes de importar a geometria a unidade de medida que está sendo utilizada, conforme ilustra Figura 2 a seguir.

Figura 2 - Unidade de medida.



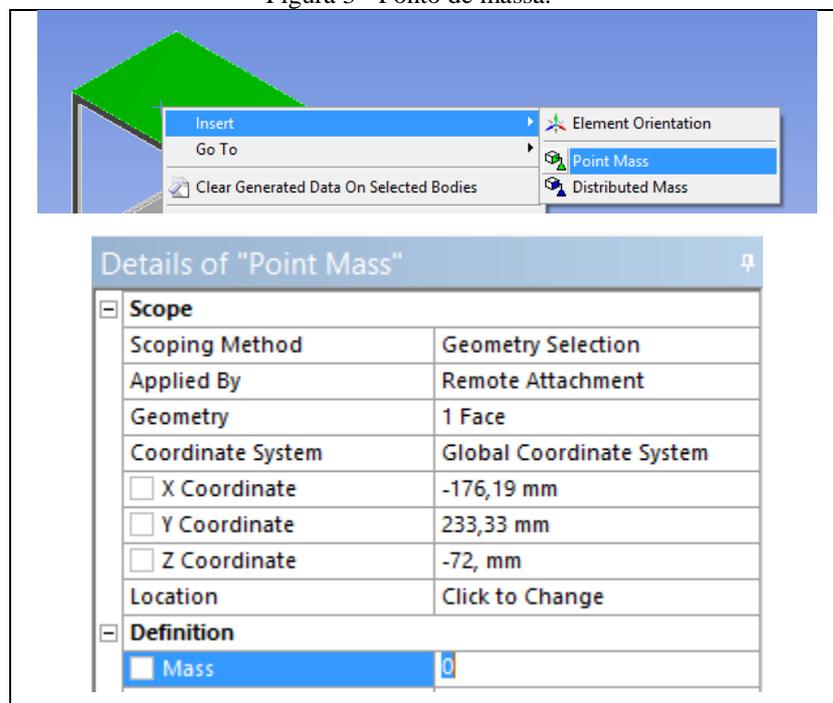
Fonte: a autora.

Como o pórtico deste trabalho apresenta uma massa distribuída no ultimo pavimento de 13,08 kg, a mesma deve ser inserida seguindo o procedimento a seguir:

- Primeiro com a opção face marcada seleciona-se a face da estrutura que será inserida a massa;
- Clica-se com o botão direito do mouse fazendo: Insert – Point Mass;
- Na lateral esquerda abrirá uma aba, onde no item Definition insere-se a massa de 13,080 kg.

A Figura 3 a seguir apresenta o procedimento descrito acima.

Figura 3 - Ponto de massa.



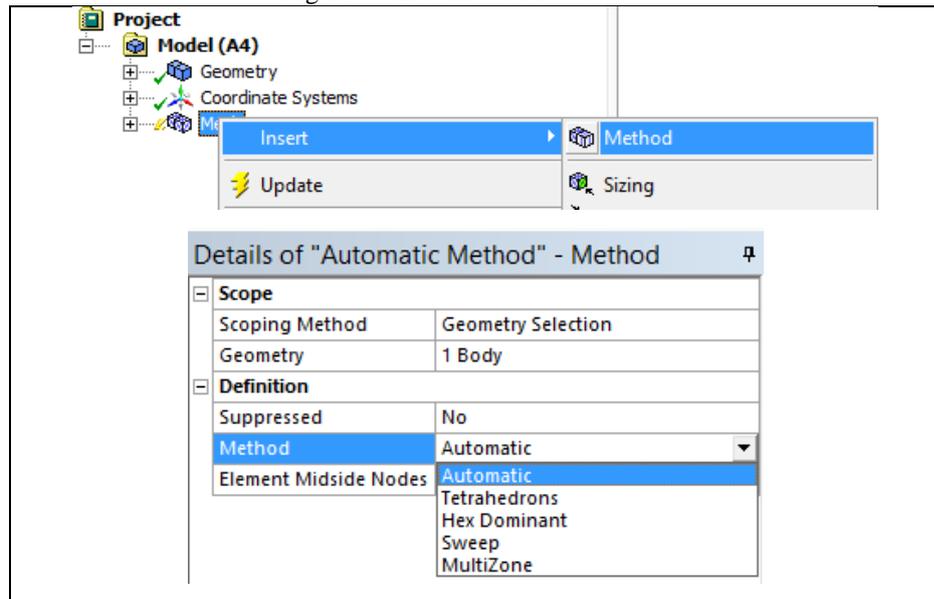
Fonte: a autora.

O próximo passo é gerar a malha, clica-se com o botão direito sobre a opção Mesh – Insert – Method.

Existe duas opções, primeiro selecionar o corpo e fazer o procedimento ante descrito ou fazer o procedimento e quando abrir a aba aplicar a geometria.

Na aba de escolha do método opta-se pelo tipo de elemento que será utilizado na geração da malha, para a simulação da análise modal deste trabalho foi escolhido o método de tetraedros (Figura 4).

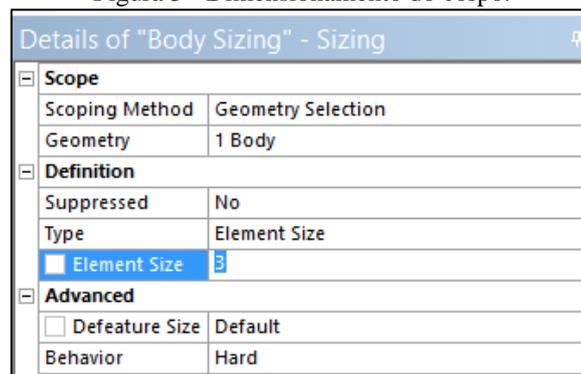
Figura 4 - Escolha do Método.



Fonte: a autora.

Para o dimensionamento do corpo, especificação da dimensão da aresta lateral do elemento, faz-se: primeiro seleciona o corpo, depois em Mesh botão direito do Mouse – Insert – Sizing, abrirá a janela apresentada na Figura 5, onde se especifica a dimensão da aresta desejada para geração da malha, no caso deste trabalho 3,00 mm. Quanto menor a dimensão da aresta maior será o tempo computacional para gerar a malha.

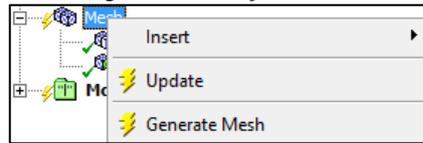
Figura 5 - Dimensionamento do corpo.



Fonte: a autora.

Após definido os parâmetros descritos acima, com o botão direito do mouse clica-se sobre Mesh e escolhe a opção Generate Mesh e aguarda-se a geração da malha, conforme ilustra Figura 6 a seguir.

Figura 6 - Geração malha.



Fonte: a autora.

A base do pórtico neste trabalho foi considerada engastada, para realização desta fixação seleciona-se a face que será engastada. Com o botão direito do mouse sobre a opção Modal – Insert – Fixed Support será desta forma engastada a face indicada, conforme Figura 7.

Figura 7 - Fixar base.



Fonte: a autora.

Com a malha gerada e demais parâmetros definidos, sobre o item Ansys Settings, abrirá uma aba, onde se pode definir a quantidade de modos de vibração serão calculados. Como neste trabalho o interesse eram os primeiros modos, foram solicitados os seis primeiros.

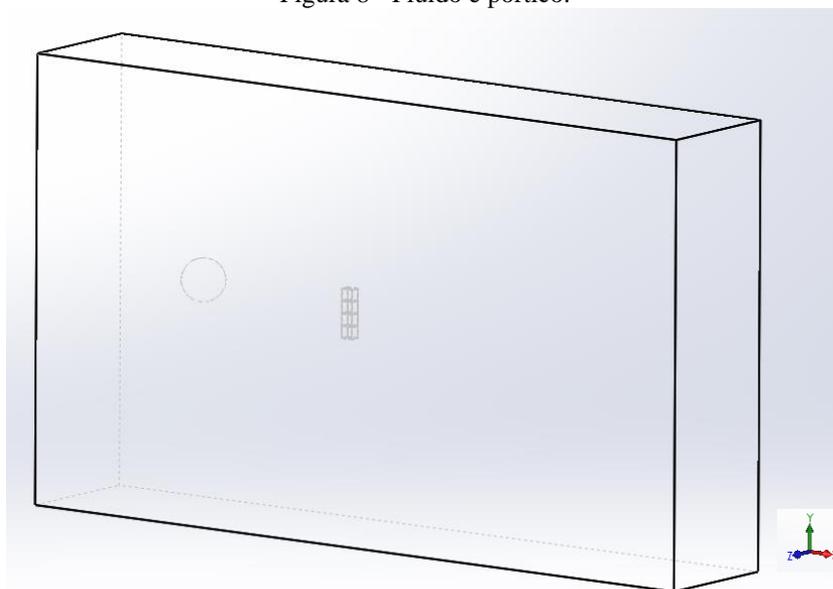
Na sequência clica-se sobre Solve e software realizará a simulação de Análise Modal.

Os resultados obtidos serão os modos de vibrar, bem como, as frequências naturais para cada modo de vibração.

## 8.2 ANEXO 2 – PROCEDIMENTO SIMULAÇÃO ESCOAMENTO

Para a simulação do escoamento primeiro no Solid Works cria-se um volume de grandes dimensões, conforme foi apresentado no trabalho, neste fluido posiciona-se a esfera e subtrai-se o seu volume, com o pÓrtico faz-se o mesmo procedimento, no entanto, no espaço subtraído deve-se posicionar o pÓrtico novamente, desta forma, tem-se o volume que representará o fluido e o pÓrtico, sendo dois corpos separados.

Figura 8 - Fluido e pÓrtico.

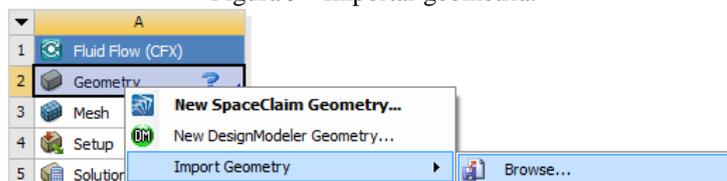


Fonte: a autora.

Finalizada a modelagem, se salva o arquivo na extensão .igs, para ser possível importar para o ANSYS.

Abre o software ANSYS, primeiro altera a unidade de medida e na sequência na lateral esquerda busca o Fluid Flow CFX. Com o programa na área de trabalho, clica-se com o botão direito do Mouse sobre Geometry – Import Geometry e procura-se o local onde o arquivo está salvo, conforme ilustra Figura 9 a seguir.

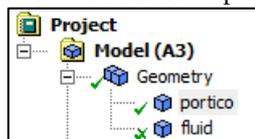
Figura 9 - Importar geometria.



Fonte: a autora.

Um detalhe importante a ser observado é que os dois corpos devem estar separados de forma que seja possível suprimir um deles conforme a necessidade de configuração, Figura 10. Caso a geometria não esteja desta forma é possível organizar isto no próprio ANSYS.

Figura 10 - Geometria separadas.



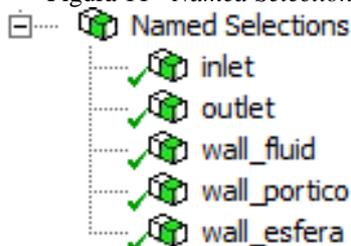
Fonte: a autora.

Na aba inicial, com o botão direito do mouse clica-se em Edit Geometry in Design Modeler, abrirá uma tela de desenho, neste local é possível ajustar o fluido utilizando o comando Boolean. Para utilizar este comando, na barra de ferramentas Create – Boolean teremos a opção de subtrair um corpo do outro na configuração, optando no item Operation – Subtract.

Na sequência no item Mesh, suprime o pórtico na aba Geometry. Restará apenas o fluido. Após gera-se a malha e suas configurações como no exemplo anterior, tamanho da aresta do elemento, tipo do elemento, refinamento, entre outros.

Após com a opção face selecionada, cria-se os Named Selections, que são as condições de contorno do fluido, como entrada, saída, paredes laterais, faces do pórtico, faces dos objetos (obstáculos) (Figura 11).

Figura 11 - Named Selections.

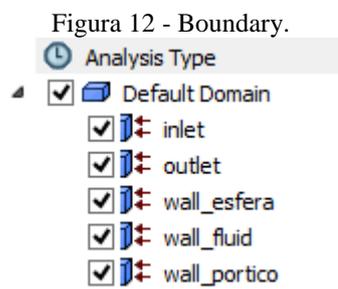


Fonte: a autora.

Finalizada esta etapa, abre-se o setup, com a janela aberta, dá-se duplo clique sobre Analysis Type, abrirá uma aba onde neste local opta-se pela análise transiente e o tempo de simulação.

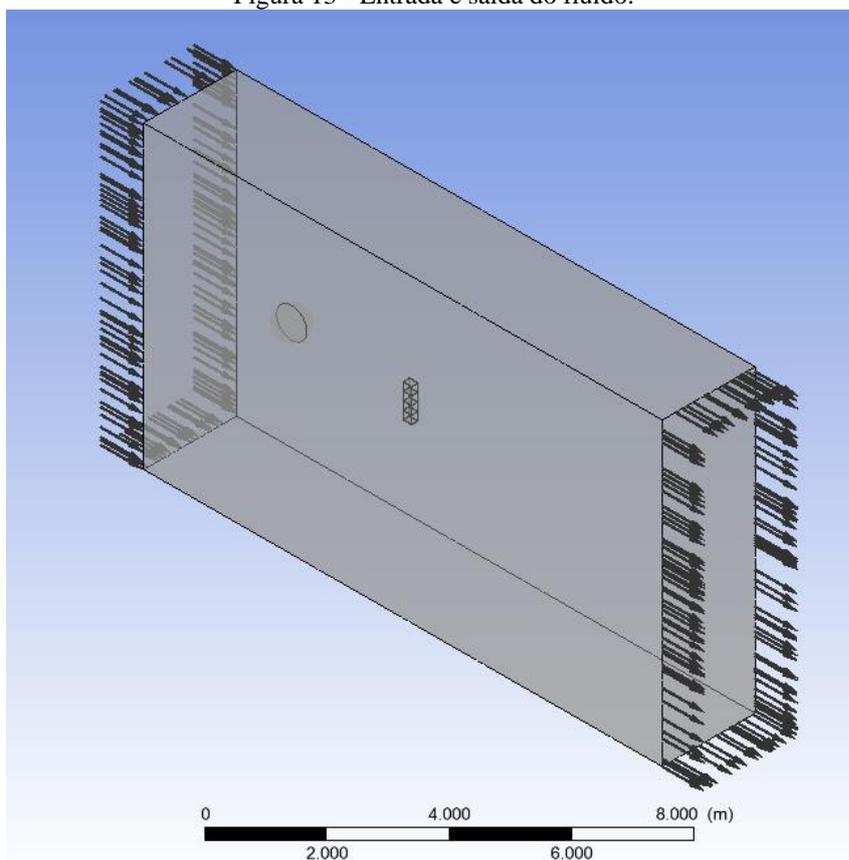
Na sequência na barra de ferramentas superior clica-se sobre o comando boundary, abrirá uma caixa de texto onde digita-se um a um as condições de contorno criadas no Named Selections.

Nas figuras a seguir estão representadas as situações descritas anteriormente.



Fonte: a autora.

Figura 13 - Entrada e saída do fluido.



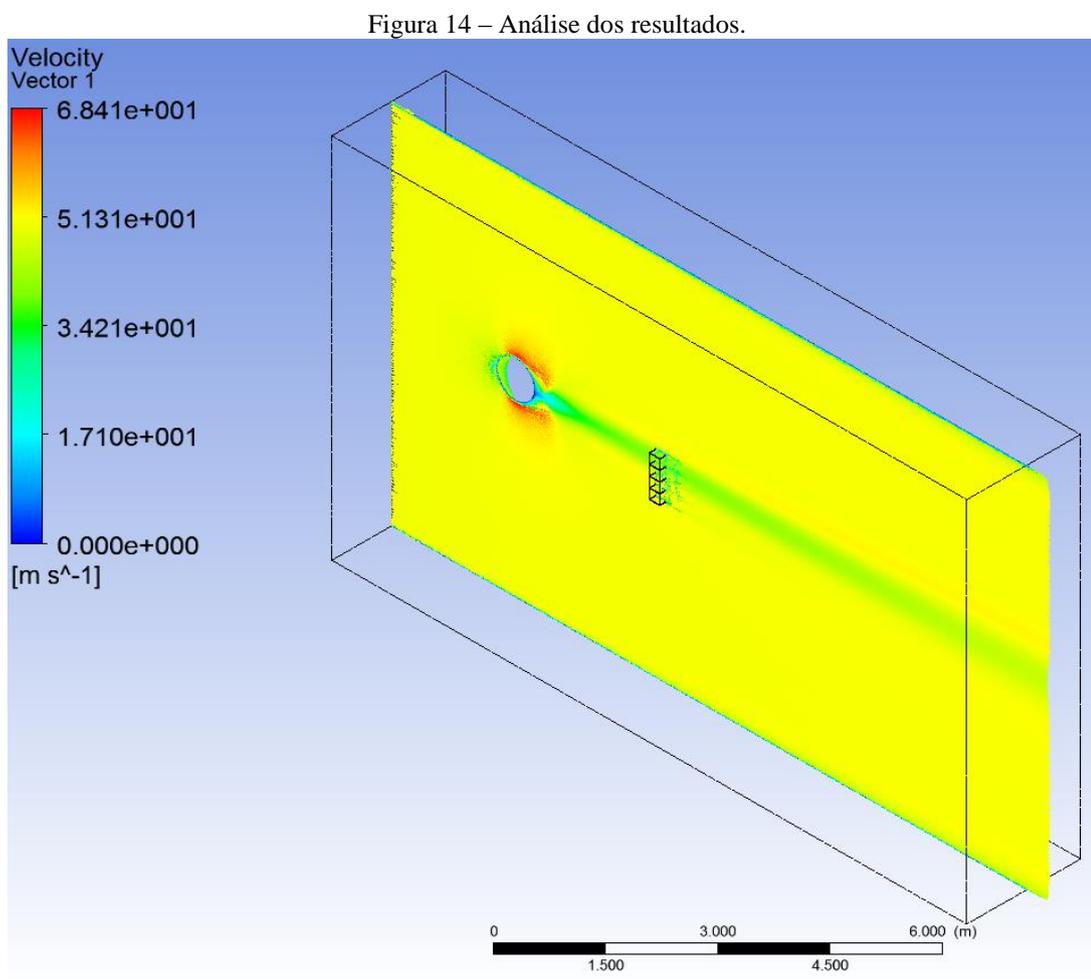
Fonte: a autora.

Algumas considerações: no Inlet é importante inserir a velocidade de entrada do fluido, que neste trabalho foi utilizado 80 m/s. Além disso, duplo clique sobre Analysis Type seleciona-se o método transiente para a simulação.

Ainda no Inlet, é necessário informar o tempo de simulação, tempo total e subdivisões. Para este trabalho foi utilizado 10,0 segundos e subdivisões de 1,0 segundo, para economia do tempo computacional.

Após abre-se a opção Solution, nesta solicita-se dupla precisão e solicita-se que inicie a simulação.

Para análise dos resultados é necessário ativar algumas ferramentas. Na parte superior do solution, temos as ferramentas, nesta aba seleciona-se o item Location e clica-se sobre plane, assim cria-se um plano onde na sequência podem-se ativar as demais ferramentas como vetor, contour, streamline, entre outros. Assim é possível analisar a situação esperado em relação ao comportamento do fluido, conforme ilustra a Figura 14.

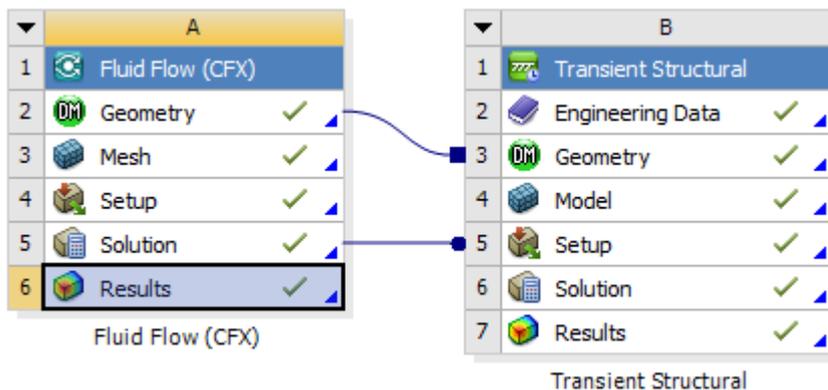


Fonte: a autora.

Como o intuito deste trabalho era analisar o comportamento de um pórtico quando o mesmo estiver sujeito à ação de um fluido, então, faz-se necessário importar a pressão provocada do fluido sobre o pórtico para o pórtico em si. Para isso, o próximo passo é

interligar os resultados obtidos no Fluid Flow CFX para o Transient Structural, conforme apresenta a Figura 15.

Figura 15 – Fluid Flow CFX para o Transient Structural.

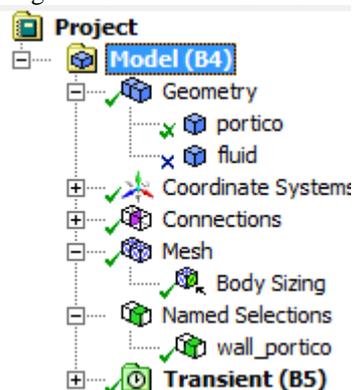


Fonte: a autora.

A sequência agora é abrir o Geometry, verificar a unidade de medida se estiver tudo Ok, abre-se o Model para realizar as configurações de malha e demais parâmetros que são levados em consideração para este tipo de análise.

Primeiramente abrindo o Model, suprime-se o fluido e assim tem-se apenas o pórtico. Após, em mesh configura-se o tipo de malha e tamanho dos elementos, refinamento, entre outros parâmetros. Além disso, cria-se um Named Selections – wall\_portico, parâmetro que depois será utilizado para importar a pressão provocada do fluido simulado sobre o pórtico, conforme Figura 16.

Figura 16 – Parâmetros Model.



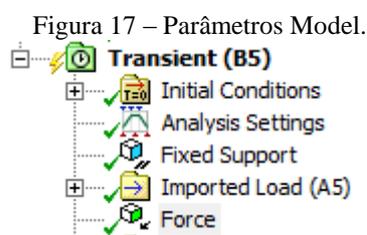
Fonte: a autora.

Gera-se a malha e depois se insere os parâmetros do transiente.

As configurações levadas em consideração do pórtico foram:

- Fixar a base seleciona-se a face da base, como botão direito clica-se sobre a face Insert - Fixed Support;
- Aplicar uma carga sobre a face superior do último pavimento seleciona-se a face da base, como botão direito clica-se sobre a face Insert - Force;
- O parâmetro Imported Load (A5) é criado automaticamente, desta forma é necessário apenas abrir e com um clique sobre ele com o botão direito, Insert – Imported Pressure.

A Figura 17 apresenta os devidos parâmetros considerados.



Fonte: a autora.

Uma observação importante é necessário configurar a Analysis Settings, em relação ao tempo, controle de etapas, conforme Figura 18.

Figura 18 – Controle de etapas.

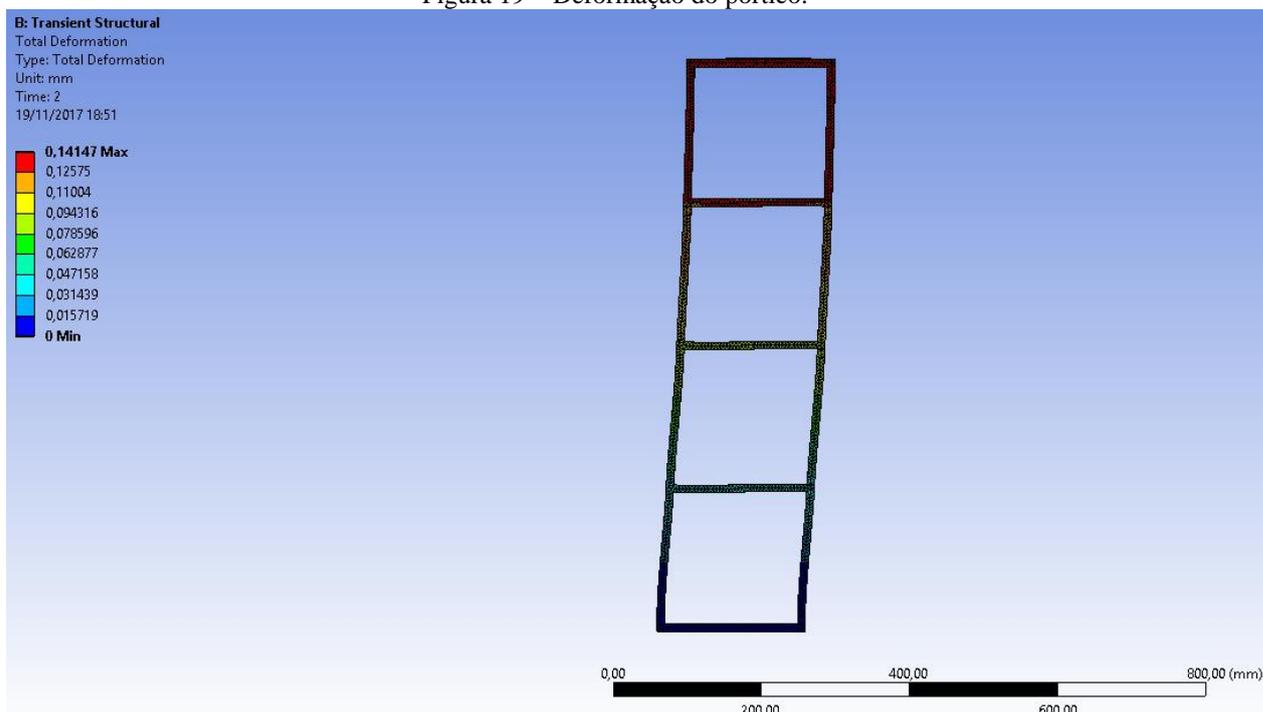
Step Controls	
Number Of Steps	2,
Current Step Number	2,
Step End Time	2, s
Auto Time Stepping	On
Define By	Time
Carry Over Time Step	Off
Initial Time Step	1, s
Minimum Time Step	1, s
Maximum Time Step	1, s
Time Integration	On

Fonte: a autora.

Após realizada todas estas configurações , clica-se em Solve na barra de ferramentas e aguarda-se até o software realizar a simulação.

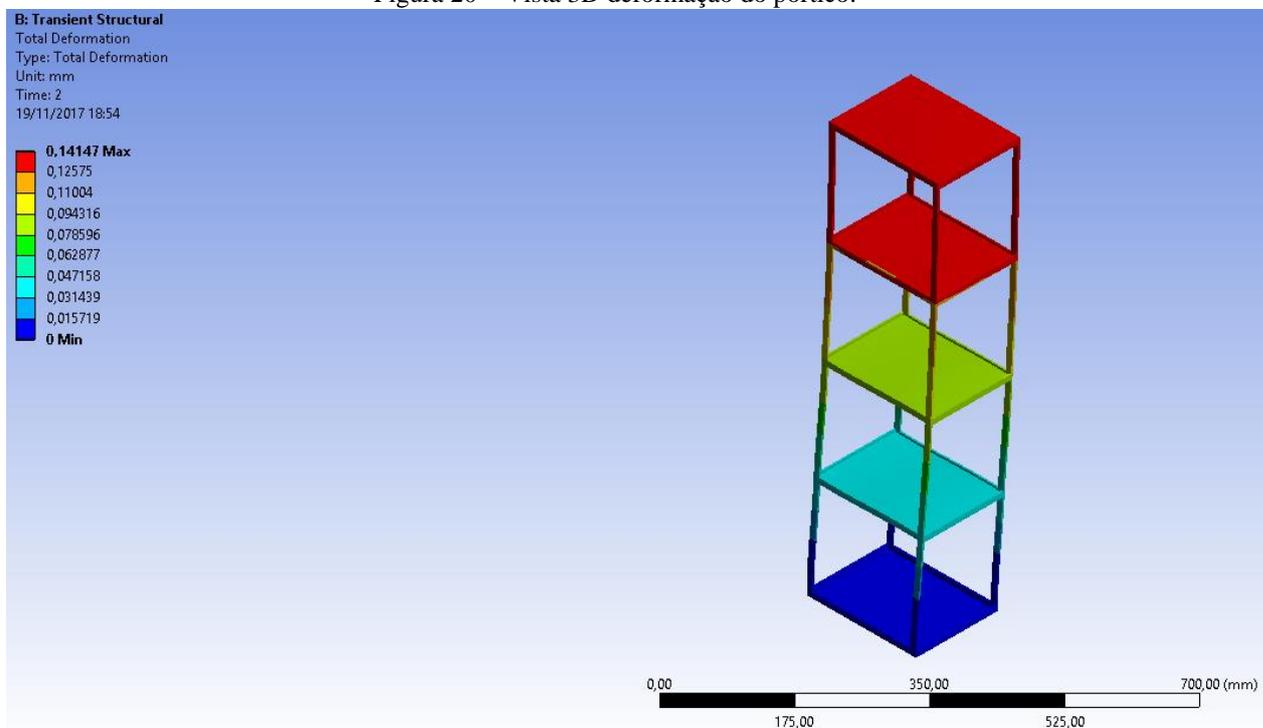
A Figura 19 e 20 apresenta a deformação total provocado pela ação do fluido sobre o pórtico.

Figura 19 – Deformação do pórtico.



Fonte: a autora.

Figura 20 – Vista 3D deformação do pórtico.



Fonte: a autora.