

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Lucas Giovanetti

**ANÁLISE ESTRUTURAL DINÂMICA DE GRADE DE
PROTEÇÃO DE TURBINA DE UMA USINA HIDROELÉTRICA**

Taubaté – SP

2015

Lucas Giovanetti

**ANÁLISE ESTRUTURAL DINÂMICA DE GRADE DE
PROTEÇÃO DE TURBINA DE UMA USINA HIDROELÉTRICA**

Dissertação apresentada para obtenção do
Título de Mestre pelo Curso Mestrado
Profissionalizante de Engenharia Mecânica
do Departamento de Engenharia Mecânica
da Universidade de Taubaté,
Área de Concentração: Projeto Mecânico
Orientador: Prof. Dr. Álvaro Manoel de
Souza Soares
Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto
Chaves

Taubaté – SP

2015

Lucas Giovanetti

**ANÁLISE ESTRUTURAL DINÂMICA DE GRADE DE PROTEÇÃO DE TURBINA
DE UMA USINA HIDROELÉTRICA**

Dissertação apresentada para obtenção do
Título de Mestre pelo Curso Mestrado
Profissionalizante de Engenharia Mecânica
do Departamento de Engenharia Mecânica
da Universidade de Taubaté,
Área de Concentração: Projeto Mecânico

Data: 17/12/2015

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Álvaro Manoel de Souza Soares Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Prof. Dr. Carlos Alberto Chaves Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Dr. Renato Kazuki Nagamine Alstom Energias Renováveis

Assinatura _____

*Dedico este trabalho a minha esposa Francine, e aos
meus filhos Diego e João.*

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Francine, aos meus pais Nelson e Maria Aparecida que desde o início estiveram ao meu lado, me incentivando e apoiando.

Ao professor Dr. Álvaro Manoel de Souza Soares pela impecável orientação, confiança e incentivo atribuído ao desenvolvimento desta dissertação.

Ao professor Dr. Carlos Alberto Chaves pela confiança e incentivo atribuído ao desenvolvimento desta dissertação.

Aos colegas da Turma que estiveram comigo nesta caminhada.

À Universidade de Taubaté e Professores, que forneceram todos os recursos e conhecimentos necessários para a minha formação e para realização deste trabalho.

Aos colegas da Alstom, principalmente Renato Kazuki Nagamine que tanto contribuíram para a realização deste trabalho.

À secretária Raquel pela atenção, respeito e incentivo.

*"A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda
pensou sobre aquilo que todo mundo vê."
(ARTHUR SCHOPENHAUER)*

RESUMO

Grades da tomada d'água de usinas hidroelétricas são equipamentos de grande importância porque são responsáveis pela proteção das turbinas hidráulicas contra impacto de corpos flutuantes. Tais estruturas estão submetidas à ação de cargas dinâmicas oriundas do escoamento da água através das barras. O objetivo do presente trabalho é analisar grades submetidas à ação de fluxo de água. Ou seja, analisar as respostas da estrutura e o comportamento do escoamento da água utilizando os cálculos de dinâmica de estruturas acopladas às técnicas de dinâmica de fluidos computacional (CFD). Para a elaboração destas análises, foi utilizado o software comercial CFX versão 14. Tais análises foram elaboradas mediante o processo de interação fluido-estrutura. Primeiramente, um modelo estrutural simplificado das barras verticais das grades é elaborado a partir de dados de projetos conhecidos. A partir deste modelo define-se um volume de controle que representa o escoamento do fluido. Devido ao número de Reynolds calculado, utiliza-se o modelo de turbulência para obtenção dos resultados tais como tensões e deslocamentos nas barras verticais, e perfil de velocidades do escoamento. Considerando o modelo proposto, foram elaboradas análises com sete diferentes valores de velocidade de modo a comparar os dados calculados numericamente através do método de elementos finitos com valores obtidos experimentalmente. A partir do modelo verificado, é apresentada uma análise de uma grade inclinada submetida a um fluxo paralelo.

Palavras-chave: Grade de proteção de turbina, interação fluido-estrutura, escoamento turbulento, dinâmica dos fluidos computacional.

ABSTRACT

Trashracks are very important equipment because they are responsible for protecting turbines of hydroelectric plants against floating bodies. These structures are subjected to the action of dynamic loads due to the water flow through the vertical and horizontal bars. The objective of this study was to analyze trashracks submitted by action of water flow. In other words, to analyze the responses of the structure and the behavior of water flow using dynamic of structures calculations coupled with computational fluid dynamics techniques (CFD) for a turbulent regime, through the use of commercial software CFX version 14. This analysis is elaborated by the process of fluid structure interaction. First of all, a simplified structural model of vertical bars is defined from other similar projects. For this model is defined a volume of control that represents fluid flow. Due to the Reynolds number calculated, it is utilized a turbulence model in order to obtain the results. These results are: stresses and displacements of vertical bars; and profile of velocities of flow. The results are analyzed and discussed. After that, considering the simplified model, analyzes with seven different values of speed are executed in order to compare the results between the data calculated numerically by finite elements method, and the values obtained experimentally. Considering the model verified, an analysis, of an inclined trashrack subjected to a parallel flow, is presented.

Keywords: *Trashracks, fluid structure interaction, turbulent flow.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Corte da usina hidroelétrica	21
Figura 2 - Esquema da grade.	22
Figura 3. Modelo do domínio de fluido e estrutura das barras verticais.	23
Figura 4. Modelo estrutural das barras verticais.	24
Figura 5. Definição dos modos de vibração e símbolos para uma grade típica: (a) Vista lateral; (b) Vista frontal; (c) Vista em planta.	32
Figura 6. Esquema das respostas laterais típicas das barras, segundo Shiraishi e Matsumoto (1983): (a) Grupo I; (b) Grupo II; (c) Grupo III.	34
Figura 7. Esquema do dispositivo de testes: (a) Vista em planta do canal de testes; (b) Vista lateral do sistema de oscilação; (c) Vista frontal da grade.	36
Figura 8. Barras ensaiadas ($d = \text{constante} = 10 \text{ mm}$, $R = 1000\text{-}4000$).	36
Figura 9. Resposta lateral em uma barra simples com ângulo de incidência do fluxo igual a zero.	37
Figura 10. Resposta lateral em uma barra simples com ângulo de incidência do fluxo igual a zero.	38
Figura 11. Resposta lateral de barras de grades com pequenos ângulos de incidência do fluxo para Perfis R10, $c/d = 10$).	39
Figura 12. Malha de elementos finitos das barras verticais.	41
Figura 13. Representação da malha do volume de controle usando o Ansys Meshing.	42
Figura 14. Detalhe da malha do volume de controle usando o Ansys Meshing.	43
Figura 15. Detalhe da malha do volume de controle usando o Ansys Wokbench.	44
Figura 16. Detalhe das condições de fronteira aplicadas ao modelo usando o Ansys CFX.	45
Figura 17. Geometria do modelo de elementos finitos da grade.	49
Figura 18. Detalhe do Modelo estrutural de elementos finitos da grade (elementos de formato de hexaedros).	50
Figura 19. Condições de contorno do modelo estrutural de elementos finitos da grade.	50
Figura 20. Malha de volumes finitos do fluido utilizada na análise CFD.	51
Figura 21. Detalhe da malha de volumes finitos do fluido utilizada na análise CFD (hexaedros).	51

Figura 22. Detalhe Condições de contorno utilizadas na análise CFD (simetria, interface, paredes, velocidade de entrada e pressão na saída).	52
Figura 23. Gráfico da variação do RMS (raiz do desvio quadrático médio) relativo a conservação do momento e massa, em função do passo de tempo acumulado.	53
Figura 24. Gráfico da variação do RMS (raiz do desvio quadrático médio) relativo aos parâmetros de turbulência k- ϵ , em função do passo de tempo acumulado.	54
Figura 25. Gráfico da variação dos parâmetros do Solver, em função das iterações acumuladas.	55
Figura 26. Gráfico da variação das cargas na Interface, em função das iterações acumuladas.	56
Figura 27. Gráfico da variação do RMS (raiz do desvio quadrático médio) relativo a conservação do momento e massa, em função do passo de tempo acumulado.	57
Figura 28. Gráfico da variação do RMS (raiz do desvio quadrático médio) relativo aos parâmetros de turbulência k- ϵ , em função do passo de tempo acumulado.	58
Figura 29. Gráfico da variação dos pontos definidos pelo usuário, relativos aos parâmetros deformação total da malha em X, em função do passo de tempo acumulado.	59
Figura 30. Gráfico da variação dos parâmetros do Solver, em função das iterações acumuladas.	60
Figura 31. Gráfico da variação das cargas na Interface, em função das iterações acumuladas.	61
Figura 32. Tensões de Von Mises nas barras verticais.	62
Figura 33. Tensões de Von Mises nas barras verticais (vista lateral).	63
Figura 34. Deformações na direção do eixo x nas barras verticais.	63
Figura 35. Deformações na direção do eixo z nas barras verticais.	64
Figura 36. Perfil de velocidades da análise de dinâmica dos fluidos (plano XZ localizado a 300 mm da origem – <i>offset</i> em y).	65
Figura 37. Detalhe dos vetores de velocidades da análise de dinâmica dos fluidos.	66
Figura 38. Detalhe das linhas de corrente de velocidade da análise de dinâmica dos fluidos.	66
Figura 39. Detalhe do perfil de pressões da análise de dinâmica dos fluidos.	67
Figura 40. Gráfico de velocidade reduzida versus amplitude de vibração.	70
Figura 41. Análise Modal de uma Barra Vertical.	71
Figura 42. Tensões de Von Mises nas barras verticais.	72

Figura 43. Perfil de velocidades da análise de dinâmica dos fluidos (plano XY localizado sobre o plano XY na origem). 73

Figura 44. Detalhe do perfil de velocidades da análise de dinâmica dos fluidos (formação de vórtices na região próxima da barra). 74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes do modelo Standard $k-\varepsilon$	27
Tabela 2 - Características do fluido água utilizado	28
Tabela 3 - Características da malha default (automática) gerada pelo Ansys Meshing.	42
Tabela 4 - Tabela de carregamento.	44
Tabela 5 - Condições utilizadas para as simulações.	46
Tabela 6 - Dimensões da grade inclinada.	49
Tabela 7 - Resultados obtidos para os parâmetros de verificação do modelo.	69
Tabela 8 - Resultados obtidos para a elaboração do gráfico a/d versus U ($t=0,4$ s).	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- a - aceleração (m/s^2)
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- CFD - Computational Fluid Dynamics
- g - Aceleração da gravidade (m/s^2)
- MEF - Método de Elementos Finitos
- MVF - Método de Volumes Finitos
- S - Número de Strouhal
- Re - Número de Reynolds

LETRAS GREGAS

- ν - Viscosidade dinâmica ($kg/(m.s)$)
- ρ - Densidade (kg/m^3)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Objetivos	19
1.1.1. Objetivo geral	19
1.1.2. Objetivos específicos	19
1.2. Justificativa	19
1.3. Delimitação do assunto	20
1.4. Estrutura do trabalho	20
2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	21
2.1. Descrição do modelo físico	21
Figura 1 - Corte da usina hidroelétrica	21
2.2. Descrição do modelo matemático (Parte estrutural)	24
2.3. Descrição do modelo matemático (Parte Hidráulica)	25
Fonte: Bird, Stewart e Lightfoot (2004)	27
Tabela 2 - Características do fluido água utilizado	28
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
3.1. Método dos Volumes Finitos (MVF)	29
3.2. Parâmetros de Similaridade em Análise de Fluido Estrutura	31
4. METODOLOGIA	40
4.1. Ferramenta computacional utilizada e computador	40
4.2. Malha utilizada (Modelo estrutural)	40
4.3. Malha utilizada (Modelo hidráulico)	41
Tabela 3 - Características da malha default (automática) gerada pelo Ansys Meshing.	42
Fonte: Autor.	43
4.4. Condições de contorno (Modelo estrutural)	43
4.5. Condições de fronteira (Modelo Hidráulico)	44
4.6. Condições aplicadas às simulações	46
Tabela 5 - Condições utilizadas para as simulações.	46
4.7. Análise de uma grade inclinada	48
Tabela 6 - Dimensões da grade inclinada.	49
4.8. Gráficos da variação do Resíduo Médio Quadrático (RMS) - modelo de cinco barras verticais	53

4.9. Gráficos da variação do Resíduo Médio Quadrático (RMS) - modelo de duas barras verticais inclinadas	57
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
5.1. Resultados da análise estrutural - Modelo de cinco barras	62
5.2. Resultados da análise de dinâmica dos fluidos - modelo de cinco barras	65
5.3. Verificação dos resultados do modelo numérico comparando com os dados experimentais da bibliografia	67
5.4. Análise Modal de uma barra bi-engastada	71
5.5. Resultados da análise estrutural - Modelo de duas barras verticais inclinadas	72
5.6. Resultados da análise de dinâmica dos fluidos - modelo de duas barras verticais inclinadas	73
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
6.1. Conclusões	75
6.2. Trabalhos futuros	76
REFERÊNCIAS	77

1. INTRODUÇÃO

Uma das mais importantes funções de grades de estruturas de tomadas d'água de usinas hidroelétricas é a proteção contra a entrada de corpos flutuantes que podem se chocar com as pás da turbina hidráulica. Devido a esta grande importância, a análise destas estruturas deve ser estudada a fim de se evitar falhas. Devido ao tipo de carregamento, provocado pelo escoamento de fluido, a análise deve ser considerada com base na dinâmica de estruturas. Tal estudo de comportamento dinâmico pode ser validado utilizando o método de elementos finitos.

Muitas falhas ocorridas em grades de tomada d'água foram provocadas por problemas de vibração. Behring e Yeh (1980) apresentam uma série de falhas provocadas em grades. Todas elas provocadas por vibração. Em uma das grades analisadas, a causa das falhas foi atribuída preliminarmente a um problema de material com defeito. Após uma análise mais detalhada, percebeu-se que as barras danificadas se concentravam na região inferior, próximo a soleira das grades. Nesta região localizam-se altas velocidades do fluxo de água. Após quatro anos de operação, notou-se que algumas barras verticais entre suportes horizontais haviam-se perdido dos painéis inferiores. Durante os trabalhos de reparo, um painel de grade em bom estado de conservação, localizado na parte superior foi substituído por um painel inferior. Depois de duas semanas, este painel substituído perdeu duas barras verticais entre suportes e a terceira estava quebrada.

Em Nascimento, Silva e Giunta (2003), um modelo de grade de uma grande máquina de usina hidroelétrica considerando o problema de interação fluido-estrutura é apresentado. As características modais foram determinadas considerando a estrutura submersa na água e no ar. Além disto, o trabalho apresenta uma análise de verificação de riscos de dano provocados por sobrecarga devido a obstrução por plantas aquáticas e outros detritos acumulados entre as barras. Segundo o autor, as frequências naturais da estrutura quando a mesma está submersa na água são menores quando a estrutura está no ar.

Em Scheumann (2012), um estudo de caso detalhado de interação fluido-estrutura em grades é apresentado. Neste estudo, o objeto é a investigação de uma falha em grades situadas na tomada d'água da Usina *Rock Island Dam*. Neste

trabalho, a causa foi atribuída a um problema de corrosão. Mesmo assim, uma análise dinâmica foi elaborada para garantir que as tensões provocadas pela vibração não atingiu valores críticos.

Os estudos de Sadrnejad (2002) enfatizam que as cargas que provocam falhas em grades são de natureza dinâmica, ou seja, é importante compreender as características dinâmicas das estruturas das grades. A solução clássica de massa concentrada aplicada a interação dinâmica fluido-estrutura é utilizada como um procedimento de solução aproximada do problema.

Nguyen e Naudascher (1991) apresentam vários estudos experimentais de escoamentos em barras de grades considerando fluxo paralelo e fluxo oblíquo.

Em Kerenyi et al. (1997), os resultados experimentais de uma investigação de vibração provocada por escoamento de fluido em barras verticais são descritos. A identificação dos coeficientes de força dinâmica do fluido são determinados por meio de análise de regressão acompanhada por simulação numérica. Os autores apresentam ainda um modelo físico para o problema.

Em Hribernik et al. (2013), é apresentada uma investigação de diferentes tipos de projetos de grades e os impactos gerados nas perdas de carga dos escoamentos de fluido. Uma análise numérica em ANSYS CFX é elaborada para calcular a velocidade de aproximação do fluido. O objetivo é determinar um projeto otimizado da grade que minimiza a perda de carga, ou seja, maximiza a eficiência da máquina geradora.

A NBR 11213 (2001) apresenta uma análise para verificação da vibração nas grades. Segundo esta norma, existe uma relação entre a frequência natural da grade e a frequência de excitação devido aos vórtices. Ou seja, para um projeto seguro contra vibrações, a relação entre frequências deverá ser maior que 1,5, com obstrução de 25% da área de passagem do fluido. É importante salientar que a norma NBR 11213 considera a análise de vibração em grades considerando o fluxo paralelo e o fluxo transversal. Ou seja, a norma não analisa a vibração das barras submetidas a ação de fluxo oblíquo.

Kolkman e Jongeling (2007) descrevem uma excitação devido à pulsação periódica no fluxo gerado por bombas e turbinas (esta frequência é calculada através da velocidade de rotação dividida pelo número de pás). Esta excitação é uma causa de vibração em grades. Todos os tipos de danos devem ser observados. Porém, estes danos, na maioria dos casos, estão localizados nos painéis inferiores.

Algumas barras se quebram por fadiga e outras simplesmente desaparecem. Alguns parafusos de fixação se rompem por tração e algumas porcas se perdem devido a vibração.

Em Ghamry e Katopodis (2012), são apresentados resultados de análises numéricas de fluxo turbulento entre as barras verticais com diferentes geometrias e espaçamentos entre barras em condutos forçados. As simulações foram elaboradas utilizando duas classes de modelos de turbulência: o modelo de Navier-Stokes de Reynolds médio e o modelo de tensão de Reynolds. Alguns resultados experimentais foram utilizados para validar os modelos de turbulência. Análises quantitativas e qualitativas foram executadas comparando valores medidos e calculados dos modelos de turbulência.

Segundo Nguyen e Naudascher (1991), existem três tipos principais de excitações induzidas pelo fluxo de fluido. A primeira é a excitação produzida pela turbulência, conhecida como *Buffeting*. Este fenômeno consiste na resposta da estrutura devida a excitação randômica gerada pela turbulência. Esta excitação é do tipo randômica por motivos óbvios. Geralmente de pequenas amplitudes e pode resultar em falhas por fadiga. A segunda é a instabilidade ou excitação induzida pelos vórtices. E a terceira é a autoexcitação.

Com o avanço das ferramentas computacionais, principalmente os aplicativos de cálculo estrutural em elementos finitos, atualmente é possível modelar estruturas otimizadas de forma a minimizar o peso. Entretanto, deve-se tomar um cuidado especial quando analisa-se estruturas submetidas a cargas dinâmicas. Principalmente estruturas sujeitas a escoamento de fluido.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar as respostas dinâmicas da estrutura de uma grade quando a mesma é submetida a ação de escoamento de fluido. Utiliza-se para este caso, as técnicas de dinâmica de estruturas acopladas com a dinâmica dos fluidos computacional.

1.1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Propor um modelo simplificado de análise de interação fluido-estrutura;
- Apresentar um comparativo de resultados com dados da literatura afim de avaliar o modelo simplificado;
- A partir do modelo validado, apresentar análises do equipamento considerando geometrias mais complexas.

1.2. Justificativa

Este trabalho justifica-se pela importância em analisar estruturas subaquáticas sujeitas à ação de escoamento de água.

Procura-se também contribuir com a aplicação de softwares de simulações numéricas e análises desta natureza.

1.3. Delimitação do assunto

Este trabalho delimita-se ao estudo e aplicação da dinâmica dos fluidos computacional na análise de interação fluido estrutura em barras verticais de grades de proteção de turbinas de usinas hidroelétricas.

1.4. Estrutura do trabalho

A dissertação está estruturada em capítulos e subcapítulos.

O capítulo 1 introduz o tema, o problema que motivou a pesquisa, os objetivos gerais e específicos, a justificativa, a delimitação do assunto e a estrutura do trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre elementos finitos, fundamentações teóricas da parte estrutural do problema e da parte hidráulica do problema.

O capítulo 3 trata da metodologia adotada na pesquisa, os dados como dimensões, parâmetros de vazão, velocidade e pressão. Assim como as relações entre estes parâmetros com a pesquisa em com a norma de cálculo de grades.

No capítulo 4 são apresentados os resultados e suas discussões.

O capítulo 5 apresenta as considerações finais, conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências que contêm os dados que facilitam o entendimento desta pesquisa.

2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Este capítulo aborda a descrição do problema estudado com grades de proteção de turbinas de usinas hidroelétricas.

2.1. Descrição do modelo físico

O problema aqui considerado é a análise da estrutura das grades sob ação do escoamento de um fluido, através da definição de um volume de controle. Este volume foi definido de acordo com o tipo de utilização do equipamento. A Figura 1 apresenta uma vista em corte de uma usina hidrelétrica com os principais equipamentos.

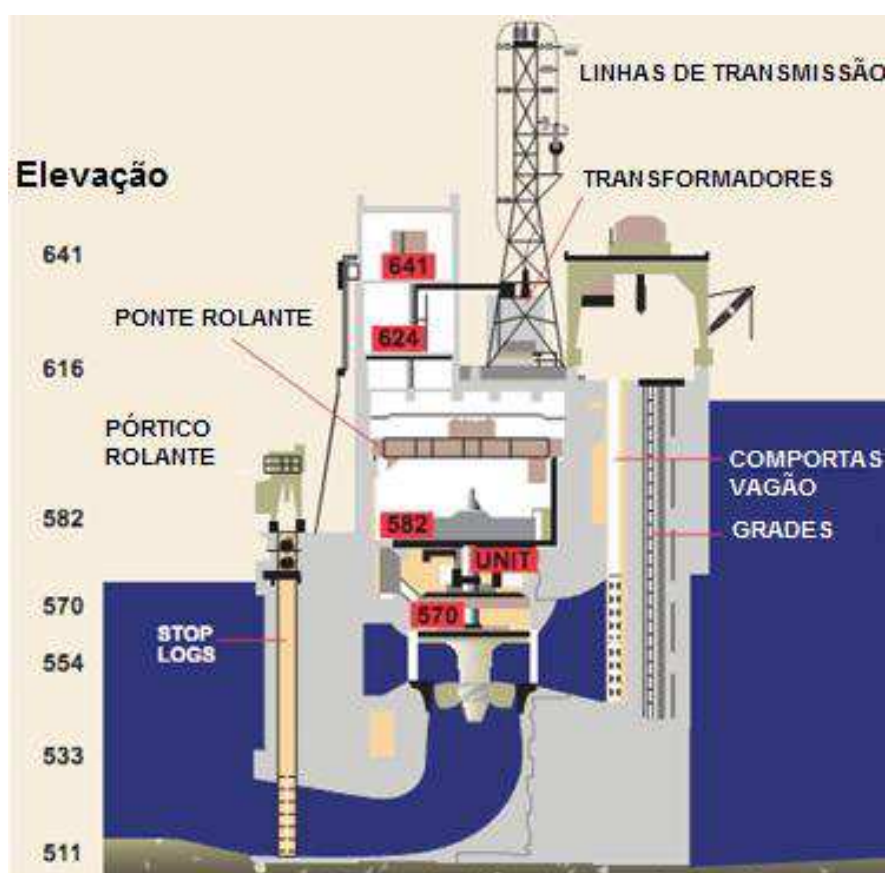


Figura 1 - Corte da usina hidroelétrica

.Fonte: Adaptado de Sheuman (2012).

A grade é um equipamento hidromecânico e está localizado na tomada d'água de usinas hidrelétricas. Devido a suas dimensões, uma grade pode ser composta por vários painéis. A divisão das grades em vários painéis se deve a vários fatores. Dentre eles, podemos citar o transporte da fábrica até a usina e a capacidade do equipamento de levantamento responsável pela movimentação das grades.

Na Figura 2, é apresentada uma grade cuja função é proteger a turbina do impacto de corpos flutuantes. A Figura 2 apresenta uma geometria de grade que foi utilizada para definir o modelo do presente estudo. Estas estruturas estão sujeitas a vibrações decorrentes da passagem de água conforme verificaram Kolkman e Jongeling (2007), as barras verticais inferiores são as mais solicitadas.

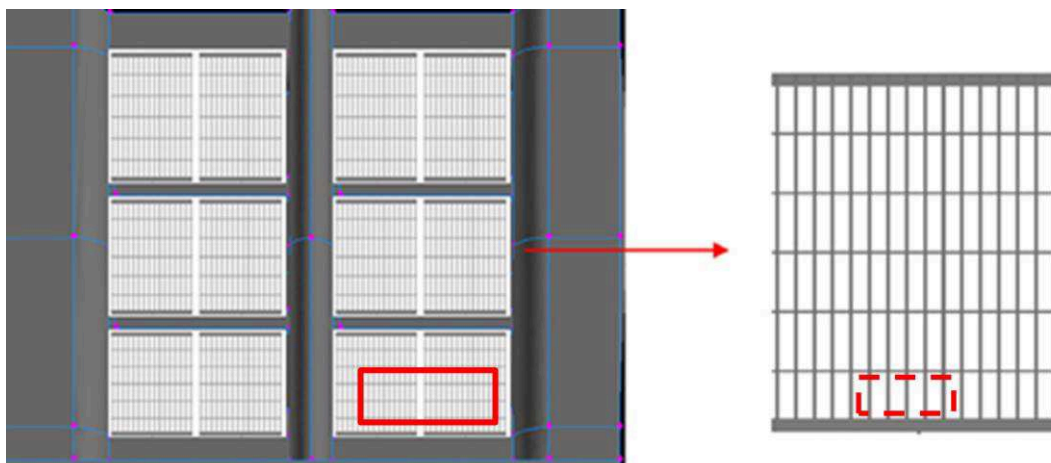


Figura 2 - Esquema da grade.

Fonte: Adaptado de Huang et al. (2013).

Desta forma, definiu-se como objeto de análise, a região mais próxima da soleira. Diante deste fato, é proposto um modelo de grade. Sendo a parte estrutural modelada através do Ansys Workbench com 5 barras verticais das grades com as seguintes dimensões: 650x50x9,5 mm. A distância entre barras considerada é de 150 mm. E, o escoamento da água, modelado através de um modelo CFD. Para as dimensões do domínio de fluido são consideradas 6039x900x650 mm.

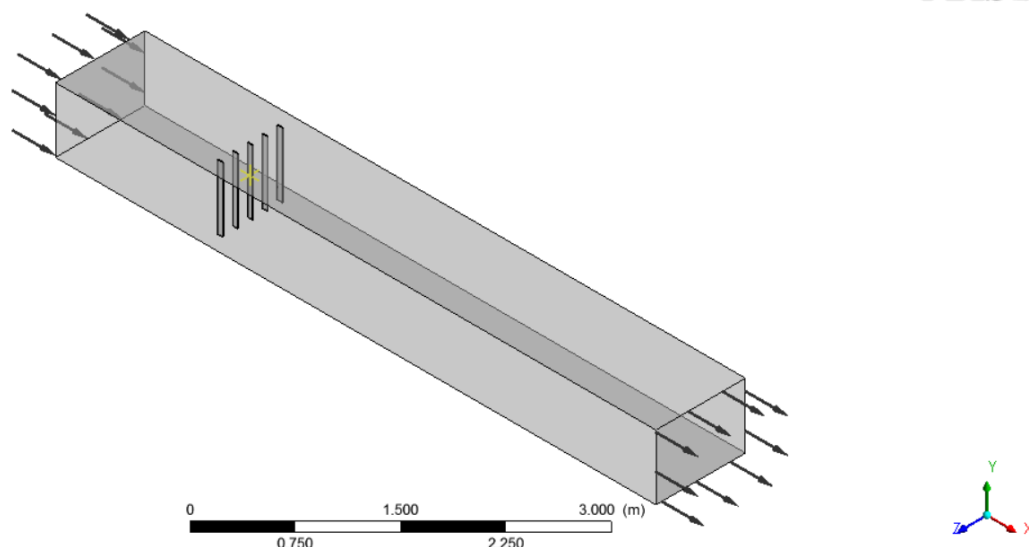


Figura 3. Modelo do domínio de fluido e estrutura das barras verticais.

Fonte: Autor

As dimensões do domínio de fluido foram definidas da seguinte forma. A distância a montante da grade foi considerada como 1510 mm, que representa duas vezes o diâmetro hidráulico. Segundo Fox et al. (2014), este diâmetro hidráulico é definido pela equação:

$$D_{hidráulico} = \frac{4 \cdot \text{Área}}{\text{Perímetro}} \quad (1)$$

onde a área é calculada a partir da seção transversal do domínio de fluido (plano YZ) e o perímetro é calculado a partir da mesma seção transversal.

A distância a jusante da grade foi considerada como 4529 mm, que representa seis vezes o diâmetro hidráulico. Estes dados foram definidos de forma a obter melhores resultados para o escoamento do fluido.

É importante salientar que o modelo proposto é um modelo simplificado, ou seja, limita-se a analisar as respostas das barras verticais submetidas à ação do escoamento. Isto explica porque não se considerou as dimensões do reservatório. Outro motivo de não se considerar as dimensões do reservatório, é devido às limitações computacionais.

2.2. Descrição do modelo matemático (Parte estrutural)

O modelo matemático que se aplica para este trabalho é de uma viga biengastada submetida a um carregamento distribuído. A Figura 4 apresenta o modelo estrutural simplificado utilizado no problema onde q representa a carga distribuída que varia com o tempo e l é o comprimento da viga.

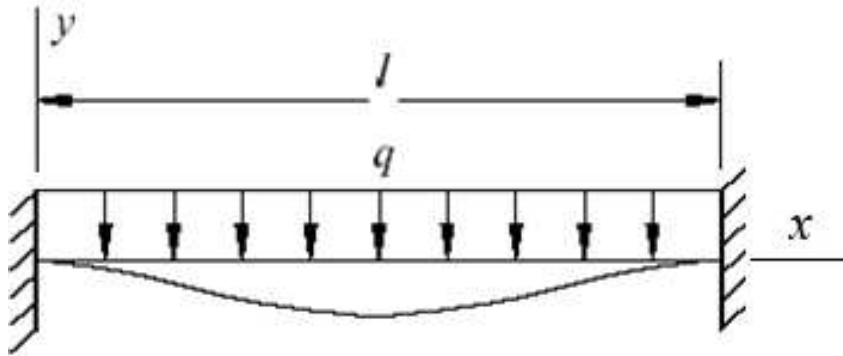


Figura 4. Modelo estrutural das barras verticais.

Fonte: Autor

Como a análise é de dinâmica de estruturas, a pressão dinâmica exercida pelo fluido representa a carga distribuída q . Segundo Timoshenko (1937), a equação diferencial da curva da deflexão estática de uma viga prismática é:

$$E.I. \frac{d^4 y}{dx^4} = q \quad (2)$$

e portanto:

$$q = -\frac{w}{g} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (3)$$

Onde q representa a intensidade de carga distribuída e EI é a rigidez a flexão da viga. Para adaptar esta equação para o caso de vibração lateral da viga, utiliza-se o princípio de D'Alembert e substitui-se a intensidade q da carga lateral pela força de inércia por unidade de comprimento da viga. Daí, obtém-se a equação (4):

$$EI \cdot \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = -\frac{w}{g} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (4)$$

Onde g representa a aceleração da gravidade, w/g representa a massa por unidade de comprimento da viga, y representa a deflexão, t representa a variável tempo, x representa o eixo longitudinal da viga e EI é a rigidez a flexão da viga.

2.3. Descrição do modelo matemático (Parte Hidráulica)

O modelo matemático que governa o comportamento fluidodinâmico do escoamento de água no interior do volume de controle em estudo está constituído pela equação de continuidade, pela equação da quantidade de movimento, aplicadas a um escoamento turbulento, isotérmico, tridimensional, incompressível, de um fluido viscoso, no caso água, com propriedades físicas constantes (BIRD, STEWART E LIGHTFOOT, 2004).

O sistema de equações solucionadas pela dinâmica de fluidos computacional são as equações de Navier-Stokes em sua forma conservativa e laminar, em estado estacionário (VERSTEEG E MALALASEKERA, 1995).

Para a formulação matemática do problema, as equações governantes correspondentes foram descritas em coordenadas cartesianas tridimensionais e consideraram-se as seguintes hipóteses: fluido newtoniano, escoamento turbulento, incompressível e em regime permanente com propriedades constantes.

As equações da continuidade e da quantidade de movimento relacionadas ao escoamento estudado são descritas, respectivamente, pelas Equações (5) a (9).

Conservação da massa: a equação da conservação da massa assenta no princípio da continuidade e pode ser escrita da seguinte forma (BIRD, STEWART E LIGHTFOOT, 2004):

$$\frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

Onde ρ é a massa específica do fluido de trabalho, u a componente do vetor velocidade na direção do eixo x , v a componente do vetor velocidade na direção do eixo y e w a componente do vetor velocidade na direção do eixo z .

Conservação da quantidade de movimento: as equações de conservação da quantidade de movimento, também conhecidas como equações de Navier-Stokes, seguem o princípio da segunda Lei de Newton: A variação de momentum em todas as direções é igual à soma das forças que atuam nessas mesmas direções (BIRD, STEWART E LIGHTFOOT, 2004):

$$\frac{\partial(\rho \cdot u \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v \cdot u)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w \cdot u)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \cdot \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + \rho \cdot g_x \quad (6.a)$$

$$\frac{\partial(\rho \cdot u \cdot v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w \cdot v)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \cdot \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + \rho \cdot g_y \quad (6.b)$$

$$\frac{\partial(\rho \cdot u \cdot w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v \cdot w)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w \cdot w)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \cdot \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + \rho \cdot g_z \quad (6.c)$$

onde ρ é a massa específica do fluido de trabalho, u a componente do vetor velocidade na direção do eixo x , v a componente do vetor velocidade na direção do eixo y e w a componente do vetor velocidade na direção do eixo z , μ a viscosidade dinâmica, g_x , g_y e g_z as componentes do vetor aceleração da gravidade nas direções, respectivamente, x , y e z e P a pressão.

O modelo Standard $k-\varepsilon$ tornou-se popular na solução de problemas de engenharia envolvendo escoamentos de fluidos com transferência de calor conjugada, por ser robusto e computacionalmente econômico e com precisão de resultados razoável em grande variedade de casos práticos. O modelo Standard $k-\varepsilon$ é um modelo de duas equações semi-empírico, onde são introduzidas duas novas variáveis para a modelação do escoamento, sendo elas, a energia cinética gerada pela turbulência (k) e a sua taxa de dissipação (ε). Este modelo apenas é válido para escoamentos turbulentos completamente desenvolvidos e a influência da viscosidade molecular é desprezada.

A equação de transporte utilizada para modelar k é:

$$\frac{\partial(\rho \cdot k \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot k \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot k \cdot w)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \cdot \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \cdot \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \cdot \frac{\partial k}{\partial z} \right] + G_k - \rho \cdot \varepsilon - Y_M + S_k \quad (7)$$

A equação de transporte utilizada para modelar ε é:

$$\frac{\partial(\rho \cdot \varepsilon \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot \varepsilon \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot \varepsilon \cdot w)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + C_{1\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot G_k - C_{2\varepsilon} \rho \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (8)$$

Nestas equações, G_k representa a geração de energia cinética turbulenta devida aos gradientes da velocidade média. Y_M representa a contribuição da dilatação flutuante em turbulência compressível.

$C_{1\varepsilon}$ e $C_{2\varepsilon}$ são constantes que foram determinadas experimentalmente para ar e água em várias configurações de fluxo (Tabela 1), enquanto σ_k e σ_ε são números de Prandtl turbulentos para k e ε respectivamente e assumem os valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficientes do modelo Standard $k-\varepsilon$

Coeficiente	Valor
$C_{1\varepsilon}$	1,44
$C_{2\varepsilon}$	1,92
C_μ	0,09
σ_k	1,0
σ_ε	1,3

Fonte: Bird, Stewart e Lightfoot (2004)

Relativamente à viscosidade turbulenta pode ser determinada pela equação:

$$\mu_t = \rho \cdot C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

onde o valor do coeficiente C_μ é definido na Tabela 1.

O fluido newtoniano água pode ser considerado incompressível (vide Tabela 2). A temperatura de entrada do fluido água é 25 °C.

Tabela 2 - Características do fluido água utilizado

Variável	Valor
Densidade (kg/m ³)	997
Capacidade térmica específica (J/(kg.K))	4181,7
Pressão de referência (atm)	1
Temperatura de referência (°C)	25
Viscosidade dinâmica (kg/(m.s))	$8,899 \times 10^{-4}$
Condutividade térmica (W/(m.K))	0,6069

(Fonte: Autor)

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo aborda a fundamentação teórica relativa ao tema estudado com grades de proteção de turbinas de usinas hidroelétricas.

3.1. Método dos Volumes Finitos (MVF)

O Método dos Volumes Finitos (MVF) é baseado na análise de volumes de controle. Este método apresenta uma forma de resolver as equações de conservação computacionalmente. Isto porque estas equações só podem ser resolvidas numericamente. Ou seja, as equações de conservação não possuem solução analítica.

De uma maneira geral, o MVF é um método que pode ser explicado através da análise das equações da conservação da massa em um volume de controle dividido em volumes de controle com dimensões pequenas. Para cada divisão de volume, tem-se a equação de conservação da massa correspondente. Aplicando o limite para cada pedaço de volume, tem-se um ponto, no qual pode-se modelar fisicamente o problema através de uma equação diferencial. A solução desta equação diferencial representa a solução do método de volumes finitos.

Conforme Schneider e Maliska (1999), a equação governante de conservação para um campo de velocidades conhecido, utilizando um sistema de coordenadas cartesianas (x,y), pode ser escrita da seguinte forma, considerando o problema convectivo/difusivo bidimensional transiente para uma variável genérica ϕ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma^\phi \frac{\partial\phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma^\phi \frac{\partial\phi}{\partial y}\right) + S^\phi \quad (10)$$

onde Γ^ϕ é o coeficiente difusivo, S^ϕ representa o termo fonte, ρ é a massa específica do fluido e t o tempo. Equação (10) pode ser escrita de uma forma resumida, se os fluxos difusivos e convectivos forem agrupados em um único termo, ou seja:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla \cdot (\vec{J}) = S^\phi \quad (11)$$

$$\vec{J} = \rho \cdot \vec{V} \cdot \phi - \Gamma^\phi \cdot \nabla \phi \quad (12)$$

onde \vec{J} representa o fluxo (advectivo e difusivo), ou seja total. E \vec{V} é o vetor velocidade.

A função de interpolação tem como objetivo, calcular o valor e a derivada de uma propriedade qualquer ϕ (que pode ser pressão, velocidade, etc.) na interface do volume de controle.

O principal objetivo do método de volumes finitos é achar uma função de interpolação e o gradiente desta função de interpolação. Obter a função de interpolação e suas derivadas significa calcular todas as propriedades na interface do volume de controle.

A função de interpolação representa a variação da propriedade em um volume de controle. Se a malha for muito grosseira, esta função de interpolação pode ser muito diferente da solução da equação diferencial. Isto pode gerar muitos erros. Ao passo que, ao fazer o refinamento da malha, variação das propriedades dentro do volume de controle e na interface serão pequenas. Por isto a importância do refinamento da malha nestes problemas de dinâmica dos fluidos computacional. Atualmente, com o avanço da tecnologia em processadores dos computadores, é possível simular problemas com geometrias complexas com centenas de milhares de elementos.

Teoricamente, quando utiliza-se a função solução da equação diferencial como função de interpolação, a análise seria isenta de erros. Como isto é praticamente impossível tem-se que obter a função de interpolação através dos métodos conhecidos na literatura.

3.2. Parâmetros de Similaridade em Análise de Fluido Estrutura

Os parâmetros apresentados neste item serão apresentados de forma a auxiliar na validação do modelo de elementos finitos. Conforme Nguyen e Naudascher (1991), a vibração de uma grade depende primeiramente das suas propriedades estruturais e condições de apoio. Vibrações de uma barra vertical de grade poderão ocorrer em diferentes direções relativas ao fluxo de água. Os modos de vibração da estrutura submersa são diferentes dos modos de vibração da estrutura ao ar livre. As barras verticais normalmente são projetadas com rigidez na direção do fluxo muito maior do que na direção transversal. Uma grade com estas características apresenta maior sensibilidade ao fluxo transversal ou vibrações laterais do que às vibrações devido ao fluxo. Conservativamente, uma grade consiste de barras verticais esbeltas apoiadas por vigas horizontais espessas. Neste caso, a grade será mais sensível a vibração devido ao fluxo. De uma maneira geral, entretanto, uma grade vibrará em qualquer modo de vibração na qual a frequência é mais próxima da frequência do carregamento prevalecente.

Nos estudos de vibrações induzidas por fluxos, segundo Parkinson (1974) e Novak (1971), citados por Nguyen e Naudascher (1991), é comum relacionar uma frequência de carregamento $f \sim V/d$, com a frequência natural n , onde V representa a velocidade do fluxo e d é a dimensão do corpo transversal ao fluxo. A grandeza adimensional resultante é chamada de velocidade reduzida e a sua fórmula é dada pela seguinte expressão:

$$U = \frac{V}{(n.d)} = \frac{f}{(n.S)} \quad (13)$$

ou seja:

$$S = \frac{f.d}{V} \quad (14)$$

onde S é o número de Strouhal. No caso onde houver ressonância, $f = n$, pode-se concluir facilmente que a velocidade reduzida é o inverso do número de Strouhal, $U = 1 / S$. Se uma parte da grade é exposta a um fluxo com um ângulo de incidência de θ como apresentado na Figura 5(c), as grandezas d e V utilizadas na definição da velocidade reduzida e número de Strouhal poderão ser substituídos por uma espessura efetiva da barra:

$$d_e = c \cdot \sin \theta + d \cdot \cos \theta \quad (15)$$

e a velocidade efetiva pode ser escrita da seguinte forma:

$$V_e = \frac{V}{1 - \frac{k \cdot d_e}{B}} \quad (16)$$

Onde c é o comprimento da corda e d é a espessura da barra, k é o número de barras expostas ao fluxo inclinado ao longo da largura B .

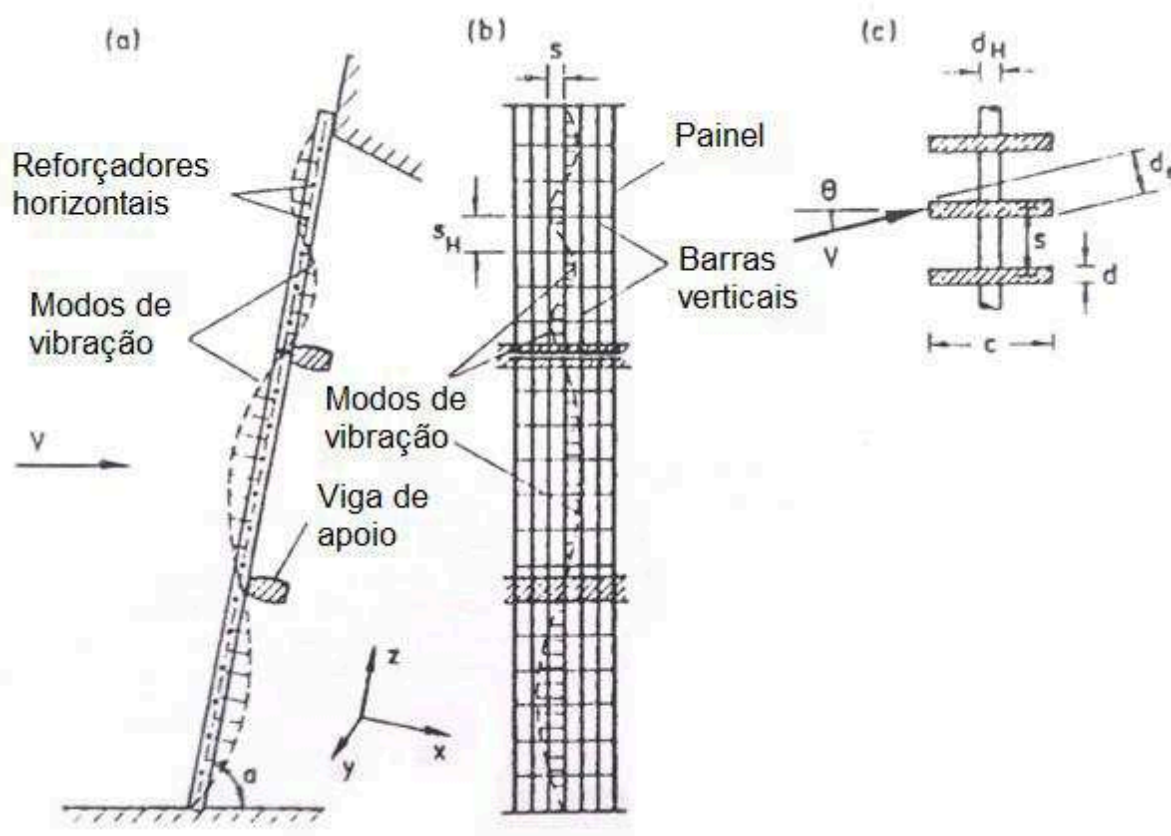


Figura 5. Definição dos modos de vibração e símbolos para uma grade típica: (a) Vista lateral; (b) Vista frontal; (c) Vista em planta.

Fonte: Adaptado de Nguyen e Naudascher (1991).

Os fatores geométricos que afetam a vibração das barras são: forma da seção transversal das barras, a razão espessura profundidade c/d , o espaçamento relativo centro a centro entre as barras verticais s/d , e o ângulo de incidência do fluxo θ , conforme definido na Figura 5(c).

Algumas propriedades estruturais relevantes incluem a razão de massa, que pode ser descrita como:

$$m_1 = \frac{m}{\rho \cdot A} \quad (17)$$

Outra propriedade estrutural relevante é a razão de amortecimento, que pode ser descrita como:

$$\beta = \frac{b}{4 \cdot \pi \cdot m} \quad (18)$$

Onde m é a massa estrutural por unidade de comprimento da barra, ρ é a densidade do fluido, A é a área da seção transversal da barra e b é a constante de amortecimento viscoso equivalente e:

$$n = \frac{M \cdot i_v}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\delta_{aço} + \frac{0,7 \cdot c}{d} \cdot \delta}} \quad (19)$$

onde n é a frequência natural de vibração, conforme apresentado na NBR 11213 (2001). Na Equação (19), l é o comprimento da barra entre apoios, E é o módulo de elasticidade longitudinal do material da barra, i_v é o raio de giração e M é o coeficiente de modo (é uma função das condições de apoio da barra). Neste caso, $M = 11,2 / \pi$, (para barra bi-engastada), $\delta_{aço}$ e δ são as densidades do aço e da água respectivamente. Para uma estrutura submersa em água, n poderá ser tomada como a frequência natural da estrutura na água, m é a massa incluindo a massa do conjunto grades e água, e b é o amortecimento total na água.

Os parâmetros que poderão afetar as vibrações induzidas pelo fluxo nas barras são, primeiramente a intensidade de turbulência:

$$Tu = \frac{V_{rms}}{V} \quad (20)$$

e, como uma extensão destes conceitos, o número de Reynolds:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} \quad (21)$$

Com v_{rms} é a velocidade das flutuações, ν é a viscosidade dinâmica do fluido. Enquanto o número de Reynolds afeta primariamente o comportamento do fluxo em corpos de formas curvas, a intensidade de turbulência poderá também influenciar a amostra média de tempo do fluxo separado ao redor de corpos angulares, segundo Blevins (1977) citado por Nguyen e Naudascher (1991).

A seguinte classificação proposta por Shiraishi e Matsumoto (1983) reflete o estado da arte da pesquisa aerodinâmica sobre estruturas cilíndricas como pontes com grandes vãos e edifícios tipo arranha-céus. A resposta típica do escoamento em perfis retangulares é apresentada na Figura 6.

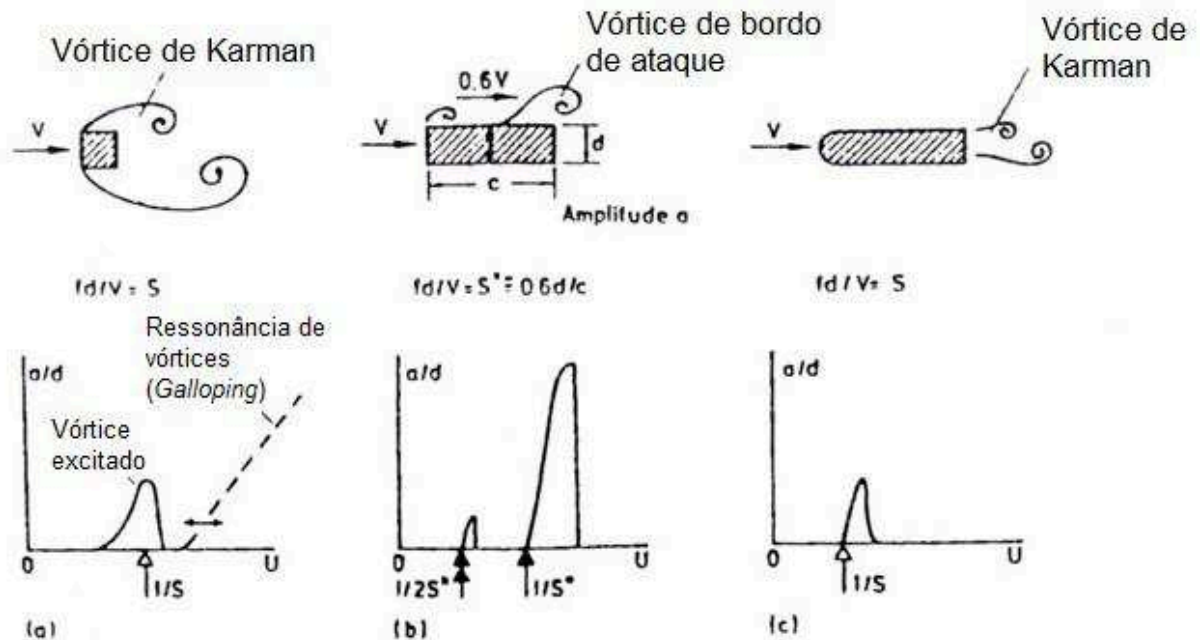


Figura 6. Esquema das respostas laterais típicas das barras, segundo Shiraishi e Matsumoto (1983): (a) Grupo I; (b) Grupo II; (c) Grupo III.

Fonte: Adaptado de Nguyen e Naudascher (1991).

A grandeza a/d representa a amplitude de vibração dividida pela espessura da barra, ou seja, existe um valor de velocidade reduzida onde a vibração relativa aumenta muito.

A classificação dos perfis em três grupos varia de acordo com a relação entre c e d .

Grupo I

Com perfis retangulares curtos, o fluxo se separa dos bordos de ataque e fortes vórtices se formam dentro da esteira formando um vórtice de Karman. A esteira de oscilação é larga e inclui toda seção do corpo. A vibração do corpo é excitada principalmente por vórtices de Karman, e um diagrama de resposta típica apresenta um pico agudo próximo do vórtice de ressonância, $U = 1 / S$. Com U aumentando além de $1 / S$, o corpo eventualmente se torna auto excitável e começa a vibrar com alta amplitude.

Grupo II

Com perfis em uma variação de profundidade e espessura intermediário (c/d de aproximadamente entre 2 e 6), os vórtices que se formam na camada de cisalhamento após os bordos de ataque colidem com os bordos de fuga, estabelecendo, assim, um mecanismo de excitação controlado por retroalimentação própria. Como resultado, a excitação do vórtice de Karman é enfraquecida. O novo mecanismo de excitação se torna particularmente melhorada se o corpo começa a vibrar e com isso, induz vórtices de bordos de ataque.

Grupo III

Com perfis retangulares longos, ou seja, $c \gg 6d$, o fluxo se mantém colado as superfícies laterais e se separa nos bordos de fuga. Em contraste com o Grupo I, a esteira e vórtice de Karman são muito mais estreitos neste caso. Então o número de Strouhal é mais alto, e as vibrações de ressonância começam com valores menores de U . A ocorrência de oscilações neste dependem não somente da geometria do bordo de fuga, mas também da grande extensão, e da geometria do bordo de ataque.

Segundo Nguyen e Naudascher (1991), experimentos com cargas dinâmicas e respostas das barras das grades foram conduzidas em um canal de água usando barras de diferentes formas de seção transversal, com vários espaçamentos e ângulos de incidência do fluxo. O esquema do experimento é apresentado na Figura 7. O modelo da grade consiste em barras de alumínio de profundidade variável e espessura de 5 mm ou 10 mm. Em um esforço para simular condições de fluxo bidimensional, a peça central de 30 cm de largura da grade foi montada em uma plataforma superior de oscilação, onde a parte remanescente de cada lado foi mantida estacionária. A plataforma de oscilação foi conectada via um sistema de pêndulo em um disco giratório que permitia um ajuste fácil do ângulo de incidência do fluxo. Este dispositivo foi utilizado para estudar a resposta dinâmica das barras isoladas ou das grades como um movimento de translação na direção lateral sem contaminação significativa do sinal de resposta por outros graus de liberdade como deflexões devido a momentos fletores ou momentos torsores.

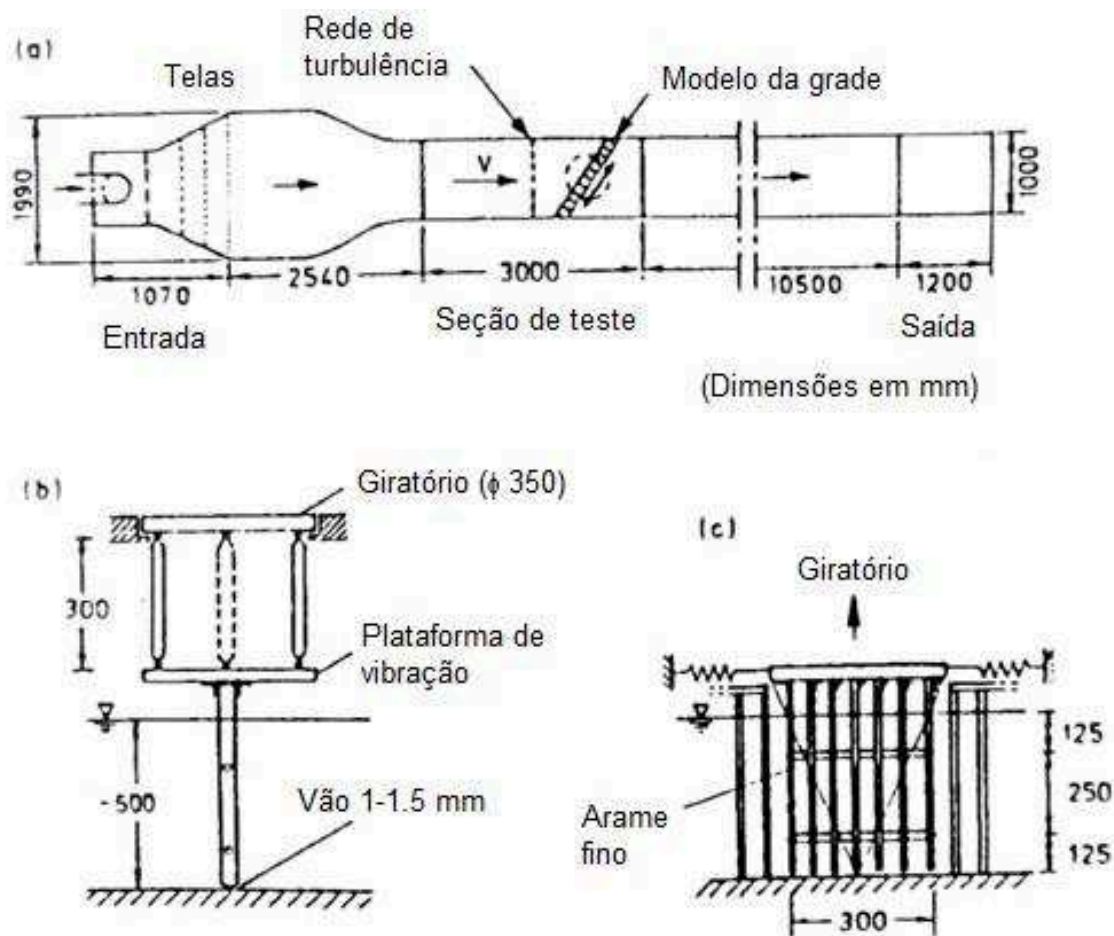


Figura 7. Esquema do dispositivo de testes: (a) Vista em planta do canal de testes; (b) Vista lateral do sistema de oscilação; (c) Vista frontal da grade.

Fonte: Adaptado de Nguyen e Naudascher (1991)

Os perfis utilizados nos ensaios estão apresentados na Figura 8.

Perfil	c/d	Seção transversal
R1	1	
R2	2	
R2.5	2.5	
R3	3	
R4	4	
R5	5	
R6	6	
RB	8	
R10	10	

Figura 8. Barras ensaiadas ($d = \text{constante} = 10 \text{ mm}$, $R = 1000-4000$).

Fonte: Adaptado de Nguyen e Naudascher (1991).

A partir dos dados já apresentados, elaborou-se o experimento e os resultados estão apresentados na Figura 9. Ou seja, a resposta lateral de uma barra com ângulo de incidência igual a zero.

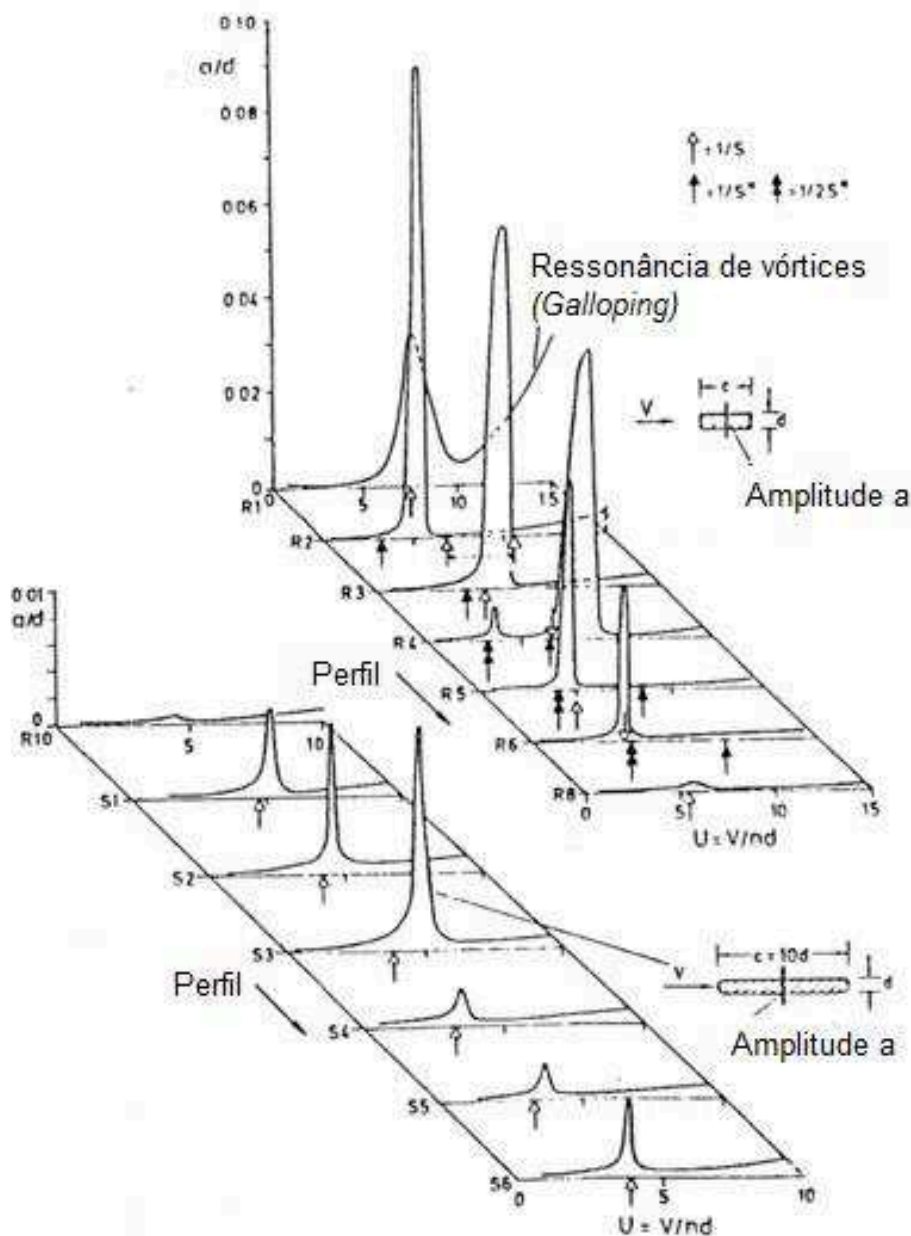


Figura 9. Resposta lateral em uma barra simples com ângulo de incidência do fluxo igual a zero.

Fonte: Adaptado de Nguyen e Naudascher (1991).

A Figura 10 apresenta a variação do número de Strouhal em função dos diferentes tipos de perfis.

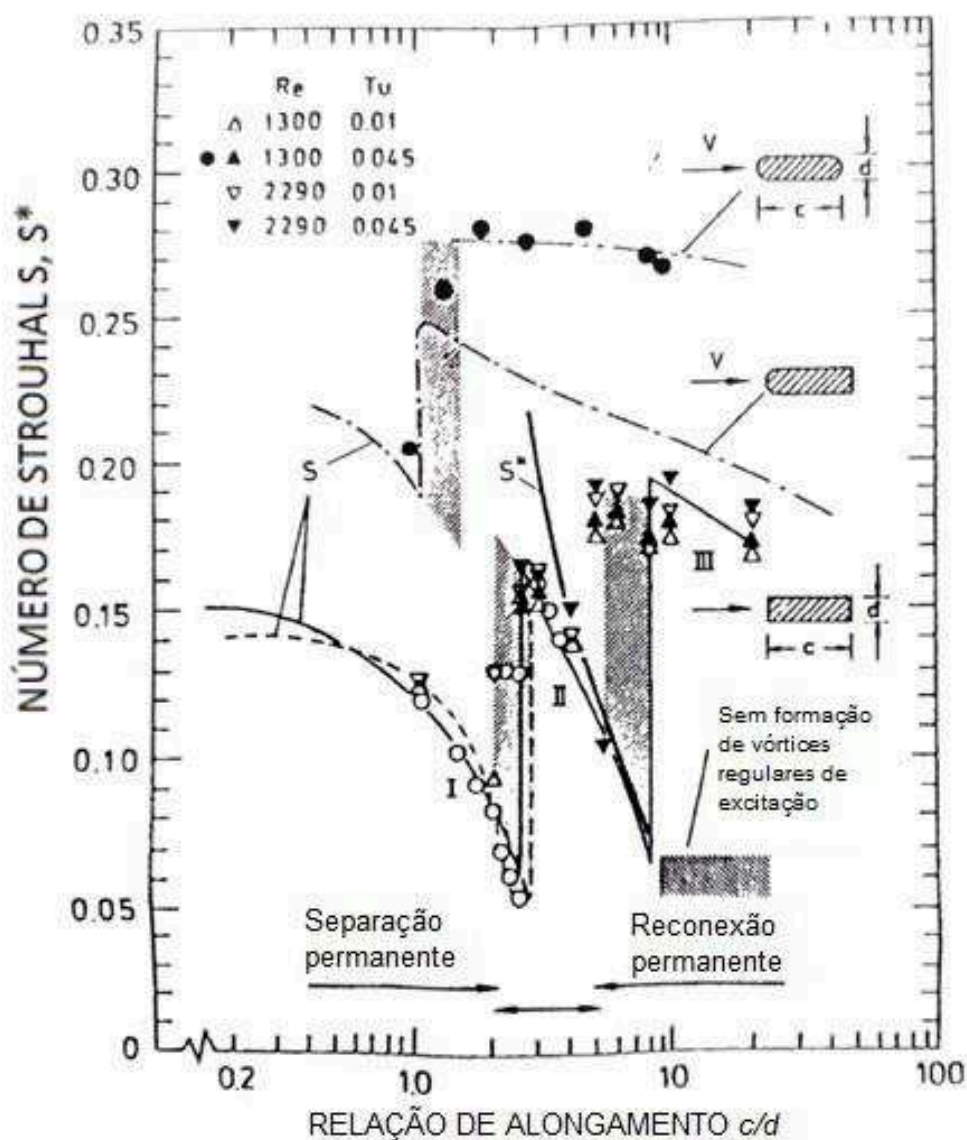


Figura 10. Resposta lateral em uma barra simples com ângulo de incidência do fluxo igual a zero.

Fonte: Adaptado de Nguyen e Naudascher (1991).

De acordo com o gráfico apresentado nas Figuras 9 e 10, existe um valor de velocidade reduzida onde a amplitude de vibração lateral é máxima. Este valor de velocidade será utilizado de forma a validar o modelo de elementos finitos.

A Figura 11 apresenta os resultados obtidos experimentalmente das respostas laterais de barras de grades submetidas a escoamentos com baixos ângulos de incidência. Para tais barras, foi considerada uma relação c/d igual a 10, que identifica os perfis de comportamento dinâmico estável.

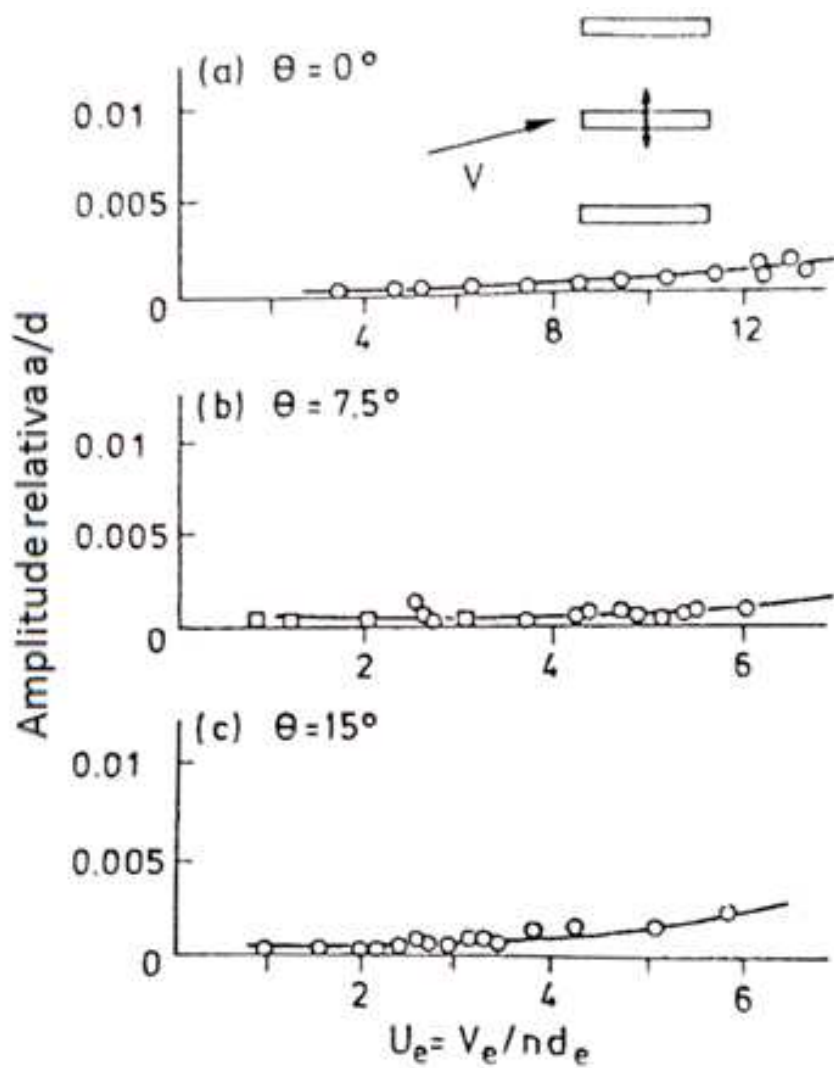


Figura 11. Resposta lateral de barras de grades com pequenos ângulos de incidência do fluxo para Perfis R10, $c/d = 10$.

Fonte: Adaptado de Nguyen e Naudascher (1991).

4. METODOLOGIA

Este capítulo descreve sucintamente sobre o detalhamento da análise elaborada com o objetivo de obter os resultados e respostas da estrutura submetida a um carregamento dinâmico gerado pelo escoamento do fluido.

4.1. Ferramenta computacional utilizada e computador

O software comercial CFX, em sua versão 14, é um programa para a predição de escoamento laminar e turbulento, e transferência de calor, massa e reações químicas, junto com modelos adicionais tais como escoamento multifásico, combustão e transporte de partículas. É baseado no método dos volumes finitos idealizado por Patankar (1980).

O programa CFX consiste de um número de módulos: geometria (Ansys Design Modeler), geração da malha (Ansys Meshing), setup do modelo (Ansys CFX-Pré), solução (Ansys CFX Solver) e Pós-Processamento ou gráfico (Ansys CFX-Pós) (ANSYS CFX, 2011).

O computador utilizado nas simulações foi do tipo Pentium IV – Intel com 3,2 GHz de processamento e 8,0 Gb de memória RAM.

4.2. Malha utilizada (Modelo estrutural)

A malha do modelo estrutural apresenta 13.140 nós e 1.625 elementos. O tamanho de cada elemento finito é definido como 10 mm. A Figura 12 apresenta a malha de elementos finitos do modelo estrutural.

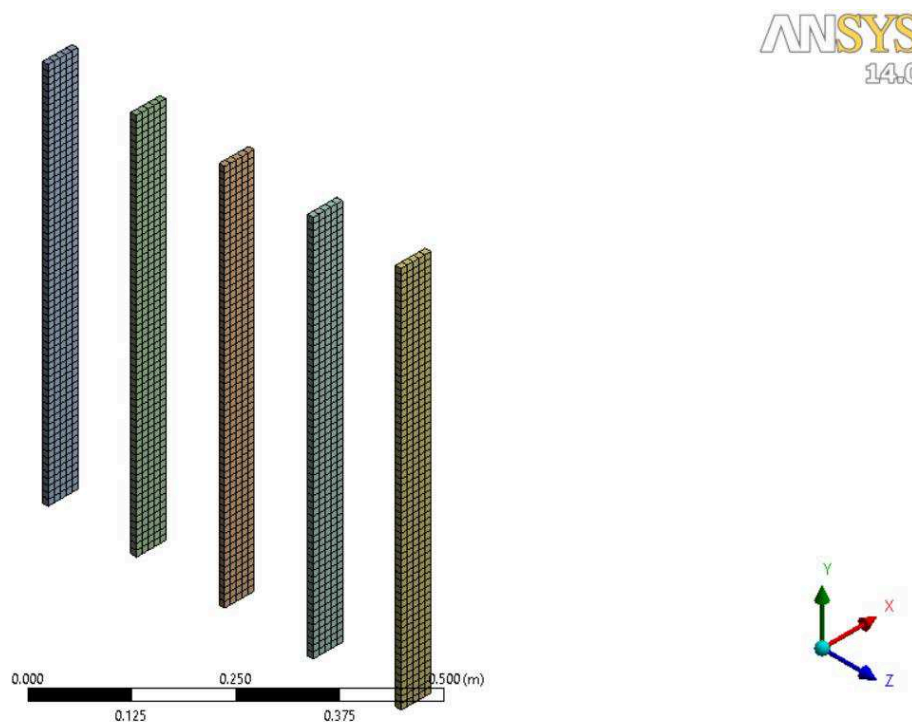


Figura 12. Malha de elementos finitos das barras verticais.

Fonte: Autor.

4.3. Malha utilizada (Modelo hidráulico)

Depois de definida a malha da parte estrutural, é possível definir a malha do domínio. É importante salientar que a escolha de uma boa malha é fundamental para a precisão dos resultados de dinâmica dos fluidos computacional. Sabendo que se trata do escoamento de um fluido é importante que o alinhamento da malha siga a direção do escoamento, o que é conseguido mais efetivamente com prismas ou hexaedros.

É altamente recomendável utilizar elementos hexaédricos próximos a parede, que neste caso é a região próxima às barras das grades. Quando o fluxo passa por elementos triangulares próximos a parede não é bom. Isto se deve ao fato da Lei de Parede. O ajuste da malha é fundamental para a análise de CFD.

Tendo em conta as considerações anteriores, partiu-se então para a produção da malha com recurso ao Meshing do pacote ANSYS WorkBench. Inicialmente foi criada uma malha com base em dados apresentados na Tabela3.

Tabela 3 - Características da malha default (automática) gerada pelo Ansys Meshing.

Variável	Condição
Physics preference	CFD
Mesh Method	Sweep Method

(Fonte: Autor)

A malha obtida com as definições referidas na Tabela 3 é mostrada nas Figuras 13 e 14. Observa-se que o software, definiu hexaedros para a geometria das células e distribuiu-as já na direção do escoamento. Esta malha apresentada possui 4.129.028 nós e 3.965.280 elementos.

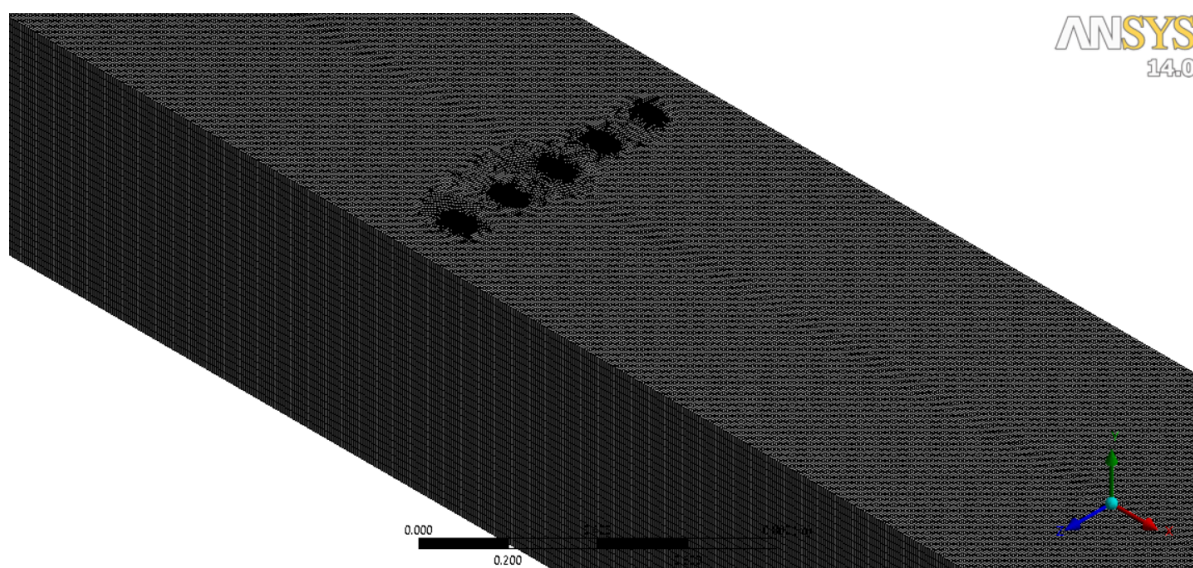


Figura 13. Representação da malha do volume de controle usando o Ansys Meshing.

Fonte: Autor.

Um detalhe da região da malha elaborada no Ansys Meshing do volume é mostrada na Figura 13. Os detalhes mais evidentes desta malha são os elementos em forma de hexaedros junto às grades (Figura 14). É importante salientar que a malha sofreu um processo de refinamento na região de interesse. Ou seja, a malha foi refinada na região próxima a interface do fluido com a estrutura.

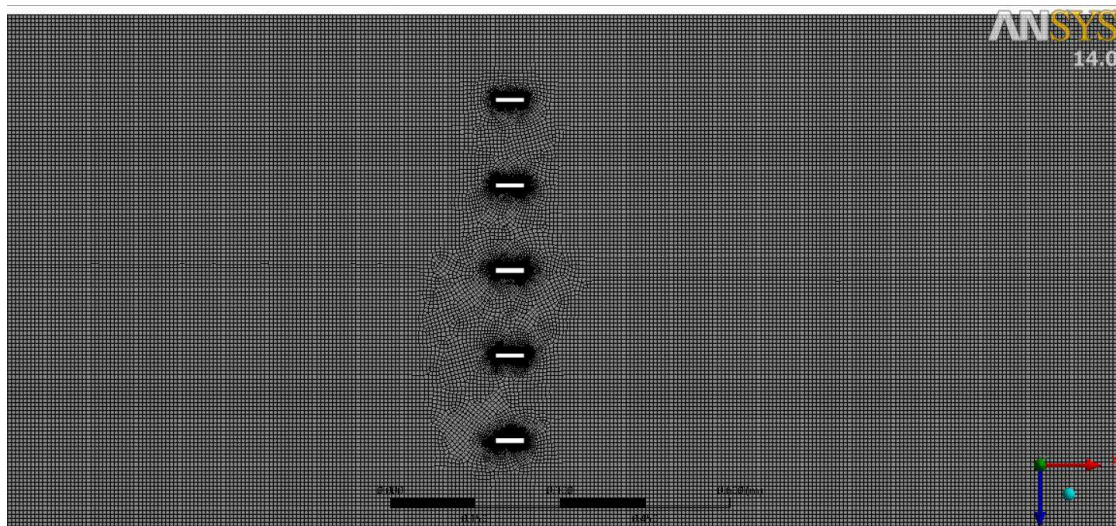


Figura 14. Detalhe da malha do volume de controle usando o Ansys Meshing.

Fonte: Autor.

4.4. Condições de contorno (Modelo estrutural)

As condições de contorno do modelo estrutural são as seguintes: engastamento perfeito nas extremidades das barras verticais. É aplicada a condição de interface fluido-estrutura na área molhada da grade. Além destas condições, é aplicada a condição de carregamento através de uma pressão equivalente a 3,0 m.c.a. Esta pressão é definida conforme a norma ABNT NBR11213 (2001). A partir desta pressão, determina-se a tabela de pressões que é inserida na análise. A Tabela 4 apresenta a variação de pressões em relação ao tempo, para uma análise de 2,0 segundos. A Figura 15 apresenta as condições de contorno aplicadas no modelo estrutural.

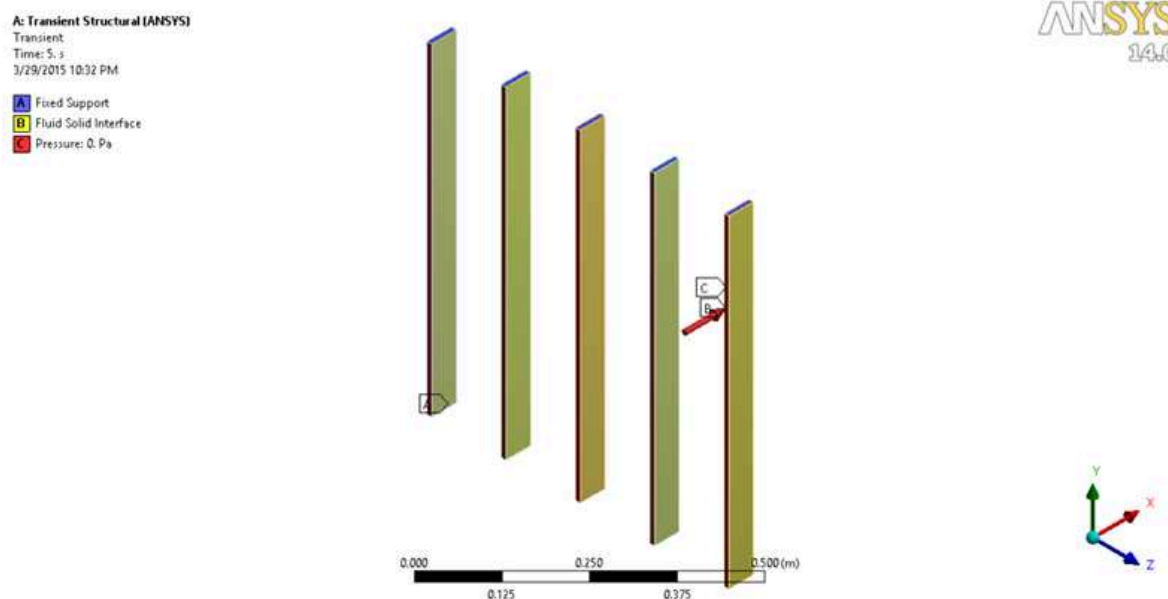


Figura 15. Detalhe da malha do volume de controle usando o Ansys Wokbench.

Fonte: Autor.

Tabela 4 - Tabela de carregamento.

Tempo (s)	Pressão (Pa)
0	$4,6313 \times 10^5$
0,499	$4,6313 \times 10^5$
0,5	0
2	0

(Fonte: Autor)

Devido à condição de carregamento, a análise estrutural é definida como transiente estrutural, ou seja, análise dinâmica.

4.5. Condições de fronteira (Modelo Hidráulico)

O software ANSYS CFX® versão 14 permite selecionar diversos tipos de condições de contorno como pressão, velocidade, vazão mássica, simetria, entre outras. Para as simulações realizadas neste trabalho as principais condições de

contorno utilizadas foram: condição de fronteira para escoamento na entrada, condição de fronteira para escoamento na saída e condição de simetria nas faces laterais do volume de controle (no plano perpendicular ao eixo z).

Zona de entrada do fluido: *velocity flow inlet* - neste tipo de condição de fronteira foi necessário definir a velocidade de entrada, a temperatura de entrada do fluido e para a situação de escoamento turbulento, também os valores de k e ϵ . Os valores de k e ϵ , poderiam ter sido calculados mas optou-se por gerar uma primeira simulação e ver para que valores estes tendiam, e numa segunda simulação atribuir esses valores no *velocity flow inlet*: $ReD = 432.945$ (turbulento), $u = 3,1$ m/s;

Zona correspondente as faces laterais do volume de controle: aqui foi definida a condição de simetria no eixo z;

Zona de saída do fluido: *outflow* - esta zona foi definida como saída de velocidade do fluido. Com a pressão de saída prescrita e igual a (0Pa).

A Figura 16 apresenta todas as condições de fronteira apresentadas pelo ANSYS CFX.

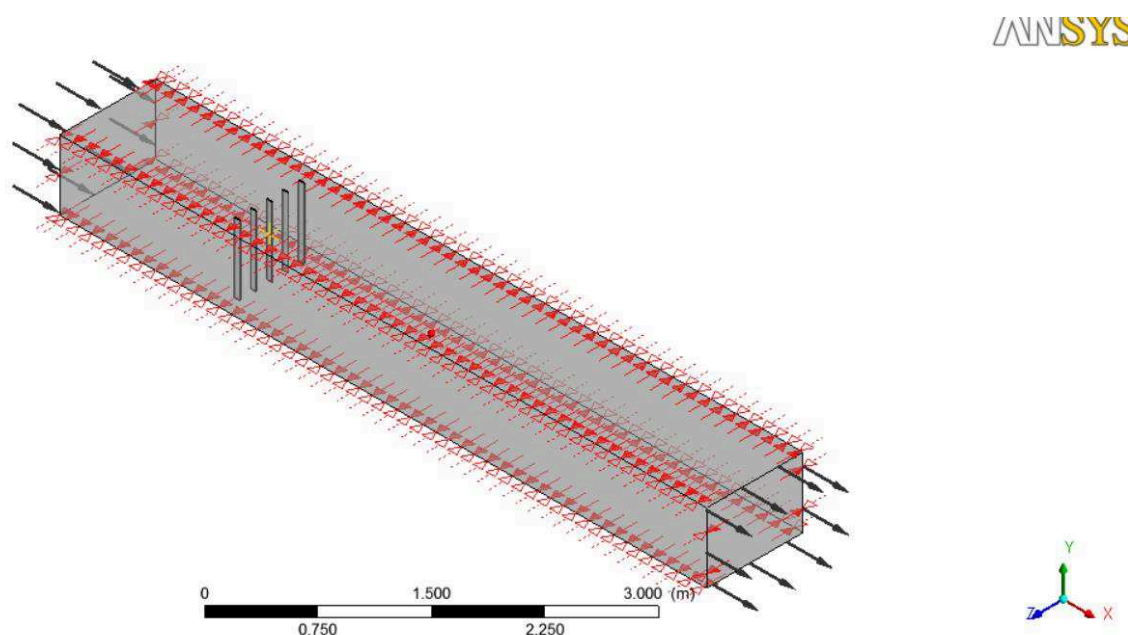


Figura 16. Detalhe das condições de fronteira aplicadas ao modelo usando o Ansys CFX.

Fonte: Autor.

4.6. Condições aplicadas às simulações

Na definição do modelo se considera o fluxo de água como fluido. Em relação às simulações, a caracterização do modelo se definiu na etapa de Pré-Processamento do software.

Considerou-se a opção de regime estacionário, devido ao fluido não variar suas propriedades com o tempo. No domínio estudado, especificou-se uma pressão de referência de 0 [Pa], na saída do escoamento.

O algoritmo de acoplamento, entre a pressão e velocidade, adotado para as simulações deste trabalho foi o SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*). O algoritmo SIMPLE é essencialmente um procedimento iterativo para prever e corrigir o cálculo do campo de pressão, cumprindo a conservação da massa (VERSTEEG e MALALASEKERA, 1995). As equações para as variáveis da solução são resolvidas sequencialmente e a solução é obtida iterativamente de forma a obter a convergência da solução.

O CFX resolve o processo iterativo da solução até que atinja determinados critérios de parada especificados. Esses critérios de parada são especificados para as equações da continuidade e energia e para as velocidades em x, y, z.

As condições impostas ao domínio do fluido requeridas para se definir a simulação são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Condições utilizadas para as simulações.

Parâmetro	Valor
Tipo de simulação	Estacionário
Esquema advectivo	<i>High resolution (default)</i>
Pressão de saída da tubulação	0 [Pa]
Temperatura de referência na entrada	25°C
Critério de convergência	RMS (raiz do desvio quadrático médio)
Solução inicial	Automático
<i>Time scale control</i>	<i>Auto time scale</i>

(Fonte: Autor)

É necessário verificar se o escoamento é laminar ou turbulento. Foi então calculado o número de Reynolds através da equação:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \quad (22)$$

Sendo $V = 3,1$ m/s, ρ e μ conforme dados da Tabela 2 e D igual ao espaçamento entre barras menos a espessura, obtém $\text{Re} = 432.945$, trata-se de um escoamento claramente turbulento, uma vez que em tubos a transição de escoamento laminar para turbulento dá-se para números de Re compreendidos entre 2.300 e 3.000.

4.7. Análise de uma grade inclinada

Considerando as mesmas premissas utilizadas para a análise do modelo simplificado de cinco barras, elaborou-se um modelo de grade inclinada. Tal modelo é elaborado com as dimensões apresentadas na Tabela 6.

A geometria do modelo de elementos finitos da grade está apresentado na Figura 17. Pode-se notar que tal modelo apresenta apenas duas barras verticais. Isto se deve ao fato de se utilizar a condição de simetria nas laterais do modelo. Como o objetivo é analisar as barras submetidas a ação do fluxo de água, apenas duas barras centrais serão analisadas.

Este modelo é baseado em estudos de projetos de grades utilizadas em pequenas centrais hidroelétricas. Devido as limitações computacionais, as dimensões das grades foram reduzidas. Porém o conceito de projeto é o mesmo.

A Figura 18 apresenta o detalhe da malha de elementos finitos utilizada no modelo estrutural da grade. Percebe-se que os elementos escolhidos são da forma de hexaedros. Isto se deve ao fato da estrutura da grade se comportar como parede para o escoamento.

Tabela 6 - Dimensões da grade inclinada.

Parâmetro	Valor
Largura da grade	1000 [mm]
Altura da grade	1000 [mm]
Quantidade de barras verticais	09, mas calculado com 02 devido às limitações computacionais
Quantidade de barras horizontais	01
Inclinação da grade em relação à vertical	8°
Material das barras da grade	ASTM A36
Seção transversal das barras verticais	50 x 5 [mm] (retangular)
Seção transversal da barra horizontal	Diâmetro: 22,4 [mm]
Distância entre barras	100 [mm]
Módulo de Elasticidade Longitudinal do material	210 [GPa]
Coefficiente de Poisson	0,3
Densidade do material	7850 [kg/m ³]

(Fonte: Autor)

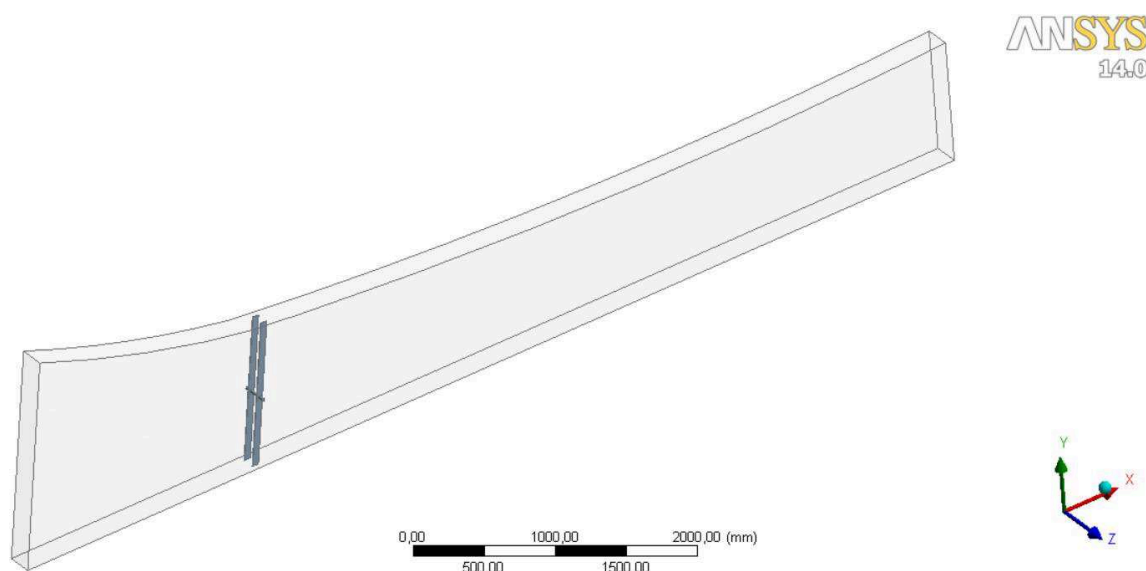


Figura 17. Geometria do modelo de elementos finitos da grade.

Fonte: Autor.

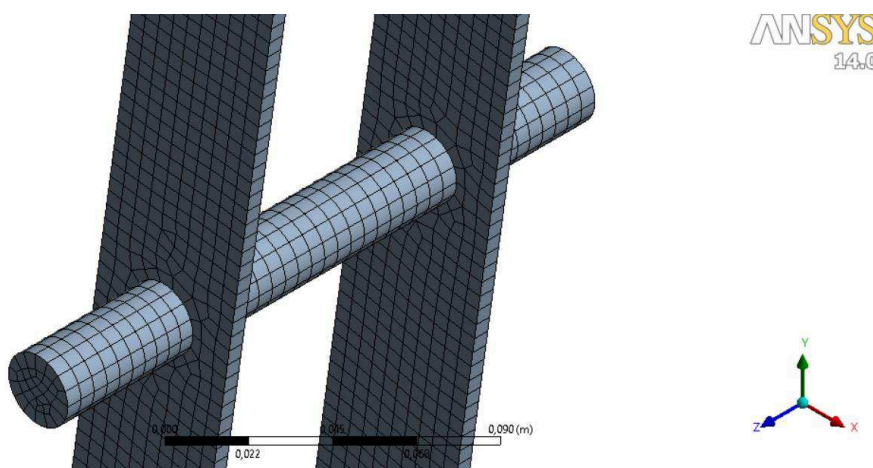


Figura 18. Detalhe do Modelo estrutural de elementos finitos da grade (elementos de formato de hexaedros).

Fonte: Autor.

A Figura 19 apresenta as condições de contorno utilizadas no modelo estrutural. Ou seja, quatro faces (duas superiores e duas inferiores) fixas definidas como deslocamentos iguais a zero. Área molhada definida como interface fluido-estrutura e pressão de 3,0 metros de coluna d'água aplicada na face perpendicular ao escoamento. A Figura 19 apresenta Pressão igual a zero na legenda devido ao fato da função degrau utilizada. Ou seja, no último intervalo de tempo, a pressão vale zero.

A: Structural
 Transient
 Time: 2. s
 12/8/2015 6:22 PM

A Fluid Solid Interface
 B Fixed Support
 C Pressure: 0. Pa

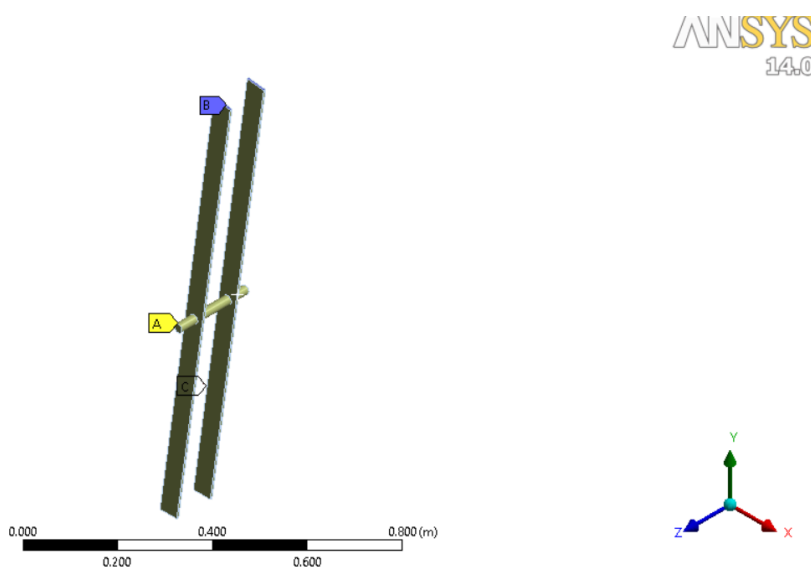


Figura 19. Condições de contorno do modelo estrutural de elementos finitos da grade.

Fonte: Autor.

A Figura 20 apresenta a malha de elementos finitos do fluido utilizada na análise. Conforme já informado anteriormente, os elementos escolhidos próximo a

parede foram os hexaedros. Isto porque é altamente recomendável não utilizar elementos triangulares próximos a parede devido aos problemas de convergência. Tal modelo apresenta 144.335 nós e 141.817 elementos.

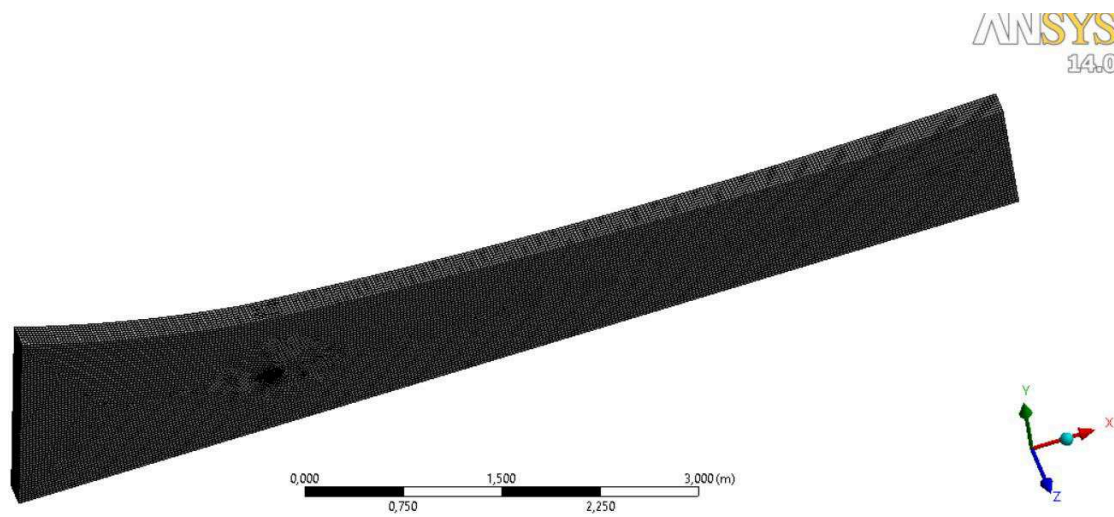


Figura 20. Malha de volumes finitos do fluido utilizada na análise CFD.

Fonte: Autor.

A Figura 21 apresenta o detalhe da malha de elementos finitos do fluido utilizada na análise.

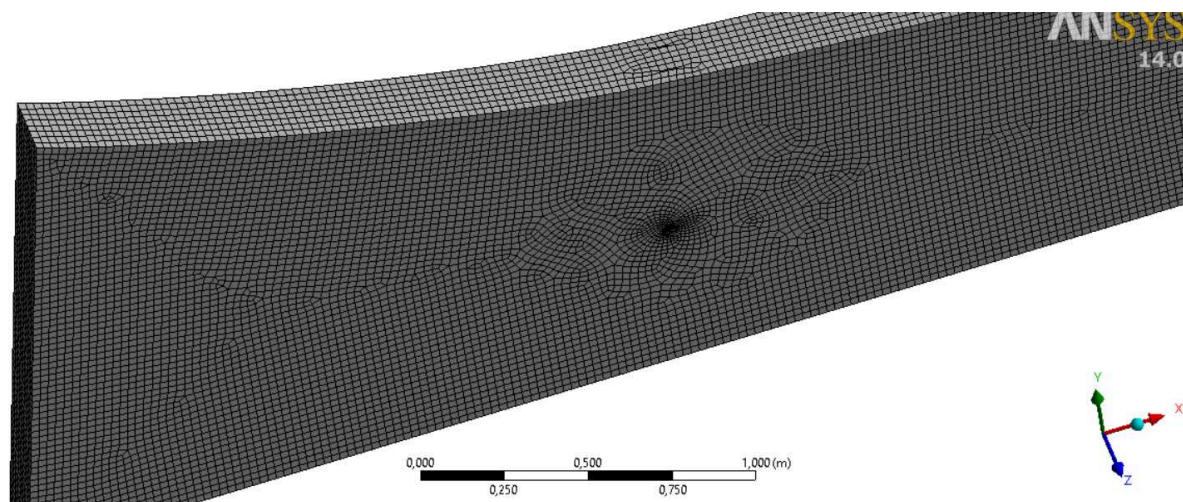


Figura 21. Detalhe da malha de volumes finitos do fluido utilizada na análise CFD (hexaedros).

Fonte: Autor.

A Figura 22 apresenta as condições de contorno utilizadas no modelo de fluidos. A velocidade na entrada foi considerada igual a 3,1 m/s. A pressão relativa na saída foi considerada como 0 [Pa]. As premissas para calcular o volume de controle foram as mesmas utilizadas na análise do modelo simplificado de 5 barras.

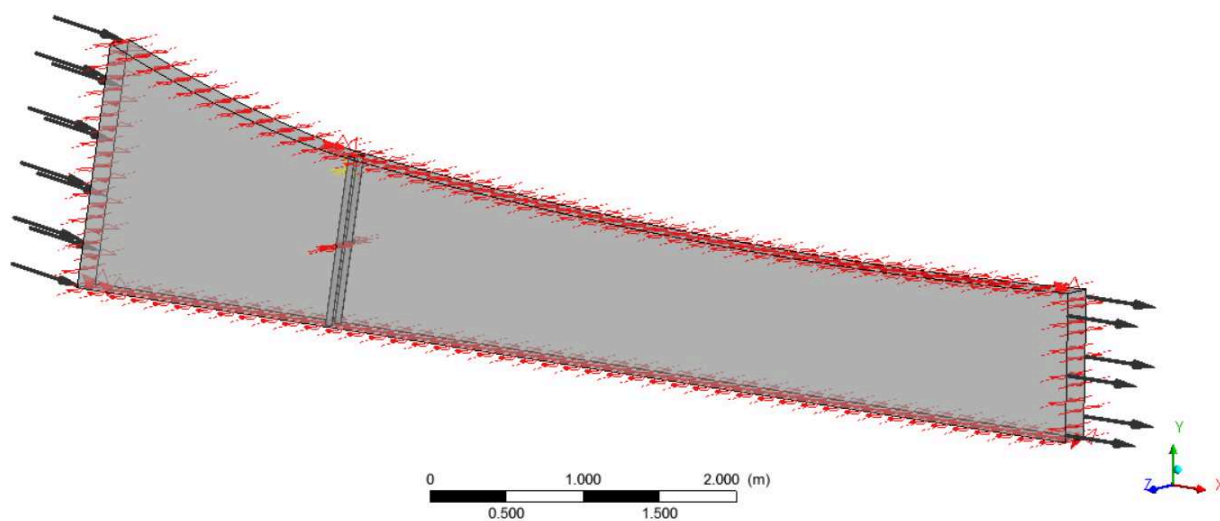


Figura 22. Detalhe Condições de contorno utilizadas na análise CFD (simetria, interface, paredes, velocidade de entrada e pressão na saída).

Fonte: Autor.

4.8. Gráficos da variação do Resíduo Médio Quadrático (RMS) - modelo de cinco barras verticais

Os resultados são obtidos a partir do *Solver* do Ansys. A Figura 23 apresenta o gráfico da variação do RMS (raiz do desvio quadrático médio) relativo a conservação do momento e massa, em função do passo de tempo acumulado.

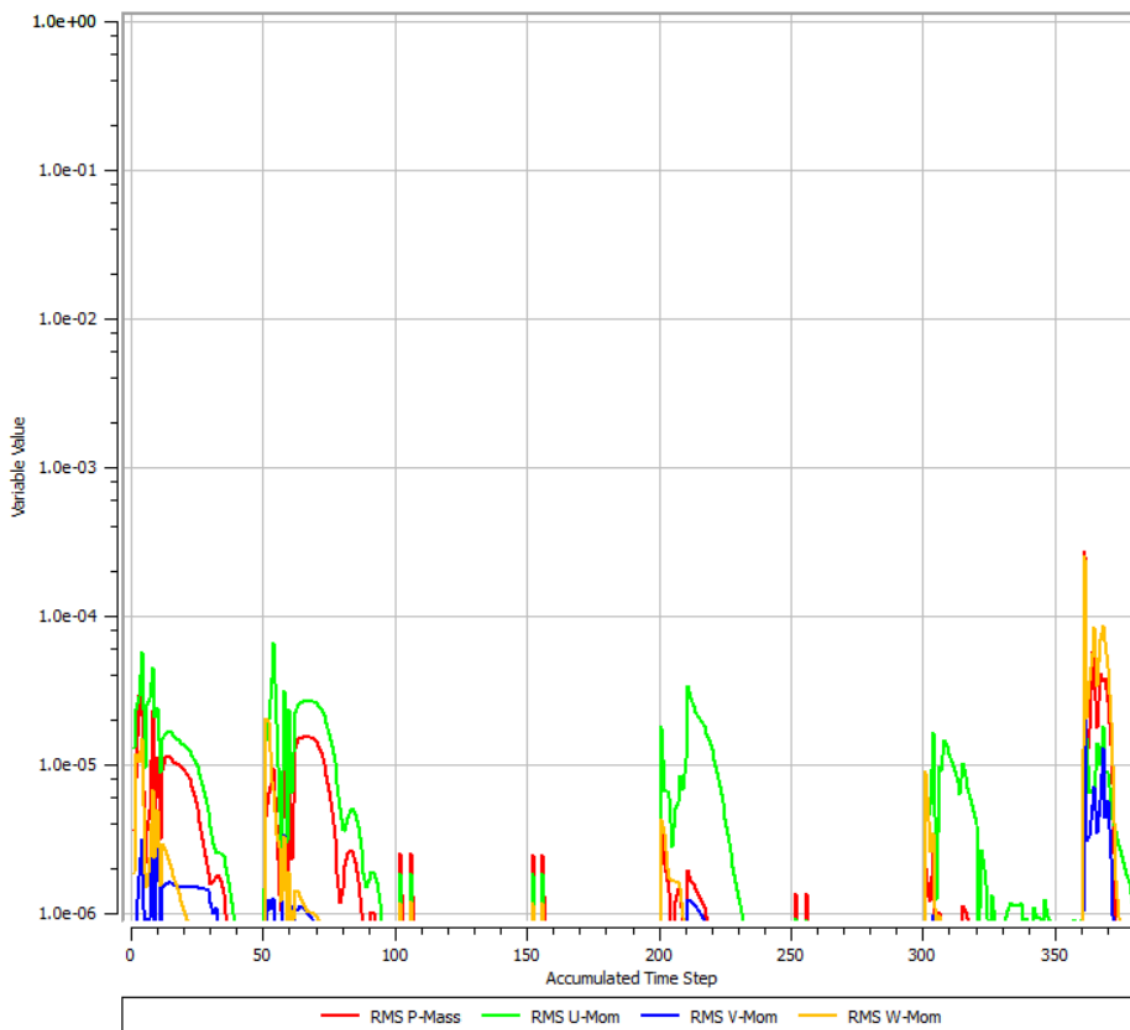


Figura 23. Gráfico da variação do RMS (raiz do desvio quadrático médio) relativo a conservação do momento e massa, em função do passo de tempo acumulado.

Fonte: Autor.

A Figura 23 apresenta o gráfico da variação do RMS (raiz do desvio quadrático médio) relativo aos parâmetros de turbulência $k-\epsilon$, em função do passo de tempo acumulado.

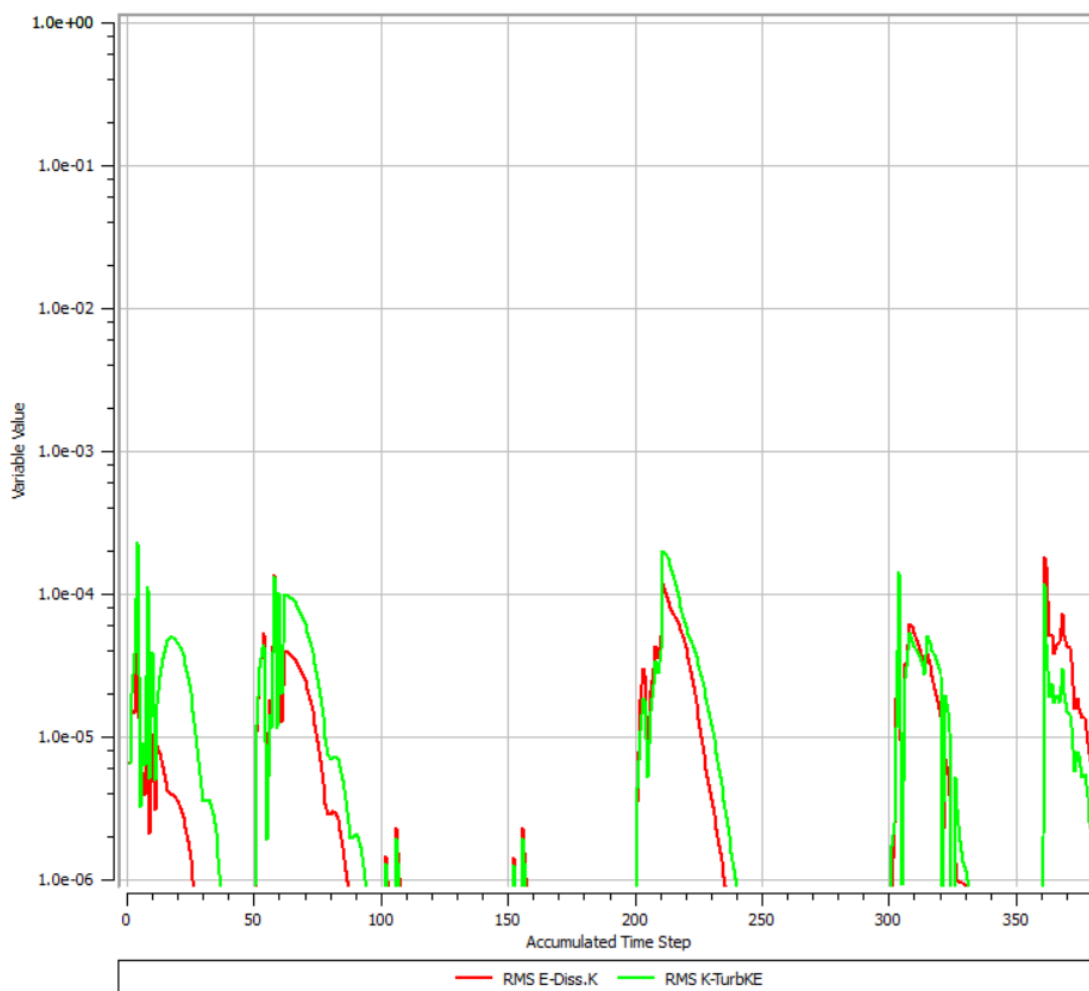


Figura 24. Gráfico da variação do RMS (raiz do desvio quadrático médio) relativo aos parâmetros de turbulência k - ϵ , em função do passo de tempo acumulado.

Fonte: Autor.

A Figura 25 apresenta o gráfico da variação dos parâmetros do *Solver*, em função das iterações acumuladas.

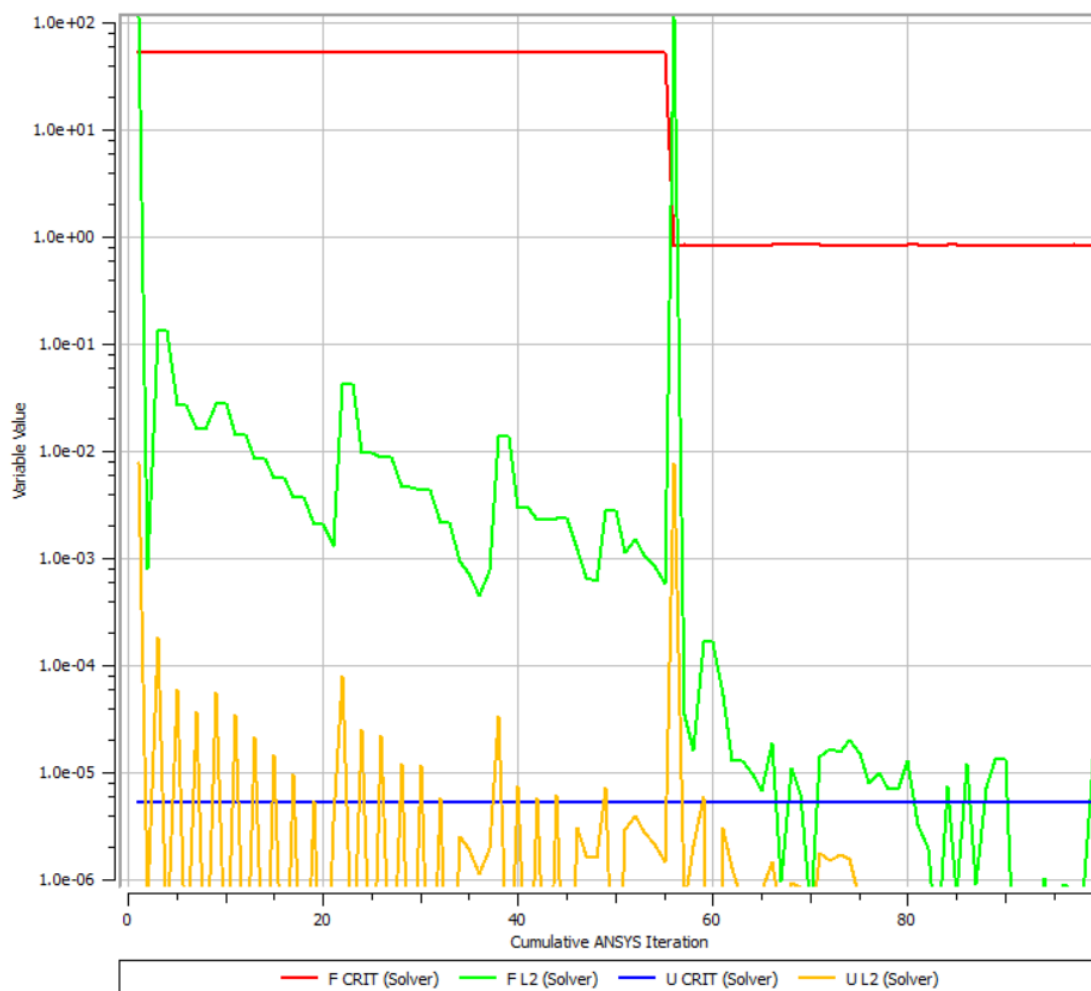


Figura 25. Gráfico da variação dos parâmetros do Solver, em função das iterações acumuladas.

Fonte: Autor.

A Figura 26 apresenta o gráfico da variação das cargas na Interface, em função das iterações acumuladas.

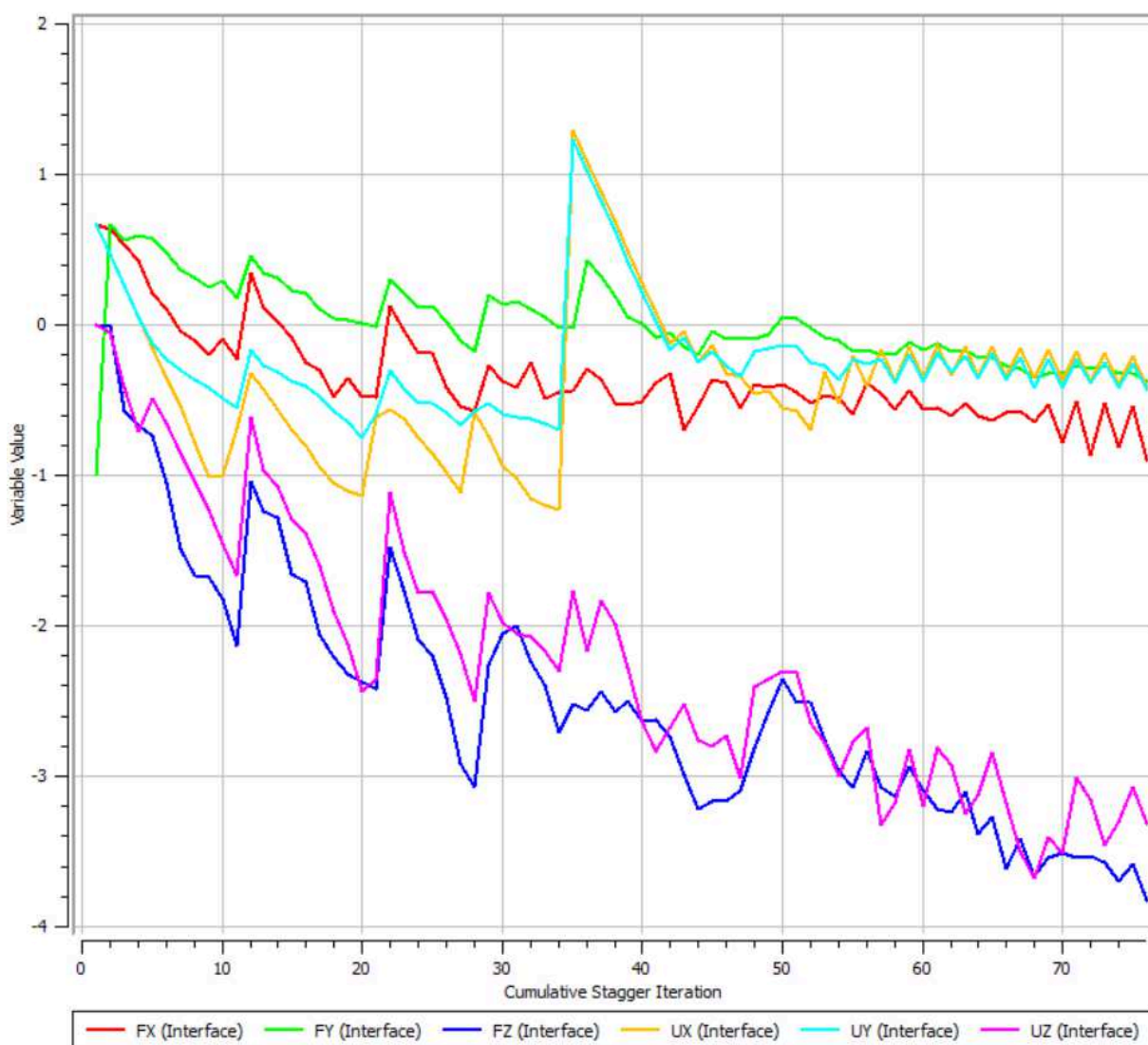


Figura 26. Gráfico da variação das cargas na Interface, em função das iterações acumuladas.

Fonte: Autor.

Os gráficos obtidos apresentam as curvas com aspecto esperado, ou seja, mantém uma tendência que representa convergência dos resultados.

4.9. Gráficos da variação do Resíduo Médio Quadrático (RMS) - modelo de duas barras verticais inclinadas

Primeiramente, são apresentadas as curvas de convergência do *Solver* do Ansys. A Figura 27 apresenta o gráfico da variação do RMS (raiz do desvio quadrático médio) relativo a conservação do momento e massa, em função do passo de tempo acumulado.

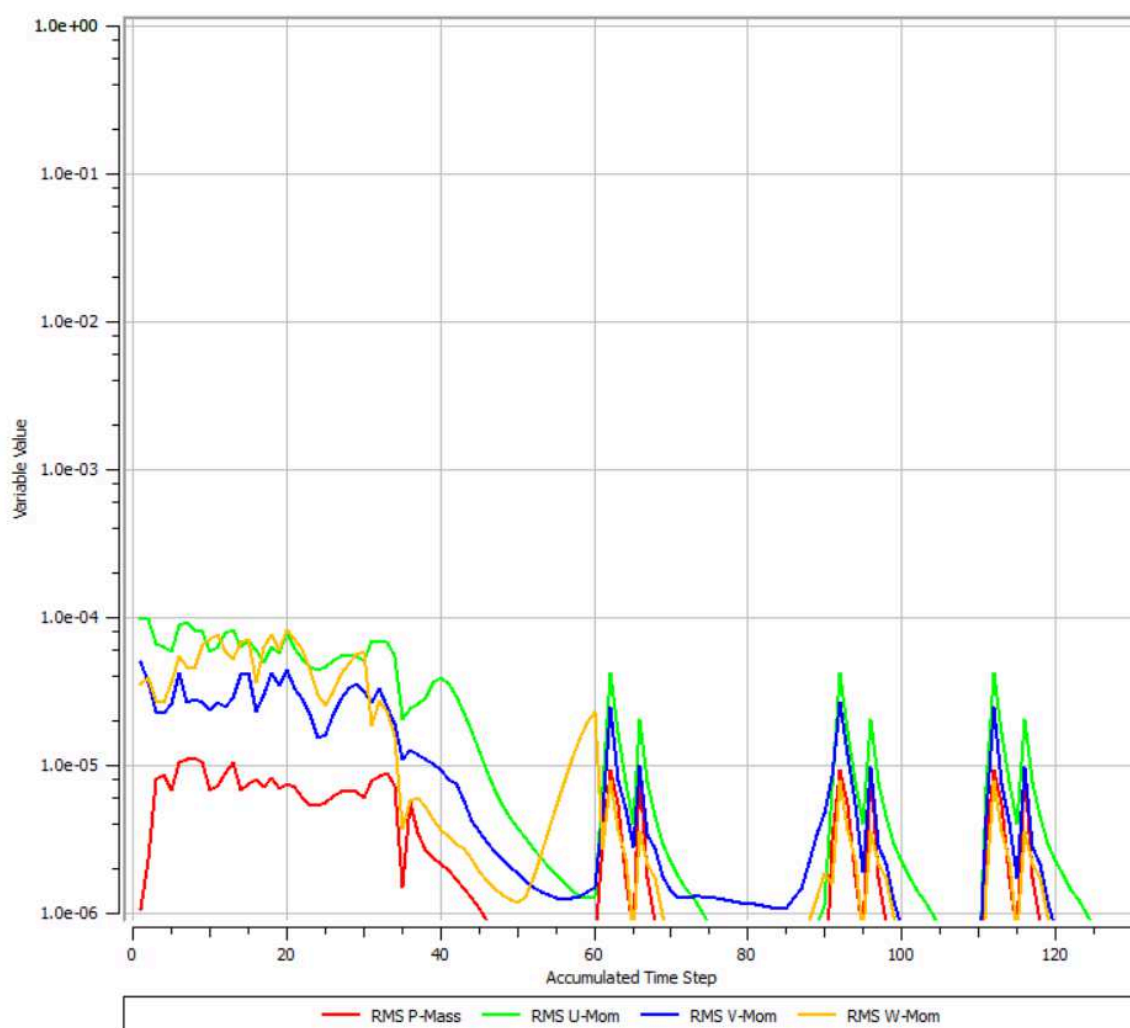


Figura 27. Gráfico da variação do RMS (raiz do desvio quadrático médio) relativo a conservação do momento e massa, em função do passo de tempo acumulado.

Fonte: Autor.

A Figura 28 apresenta o gráfico da variação do RMS (raiz do desvio quadrático médio) relativo aos parâmetros de turbulência $k-\epsilon$, em função do passo de tempo acumulado.

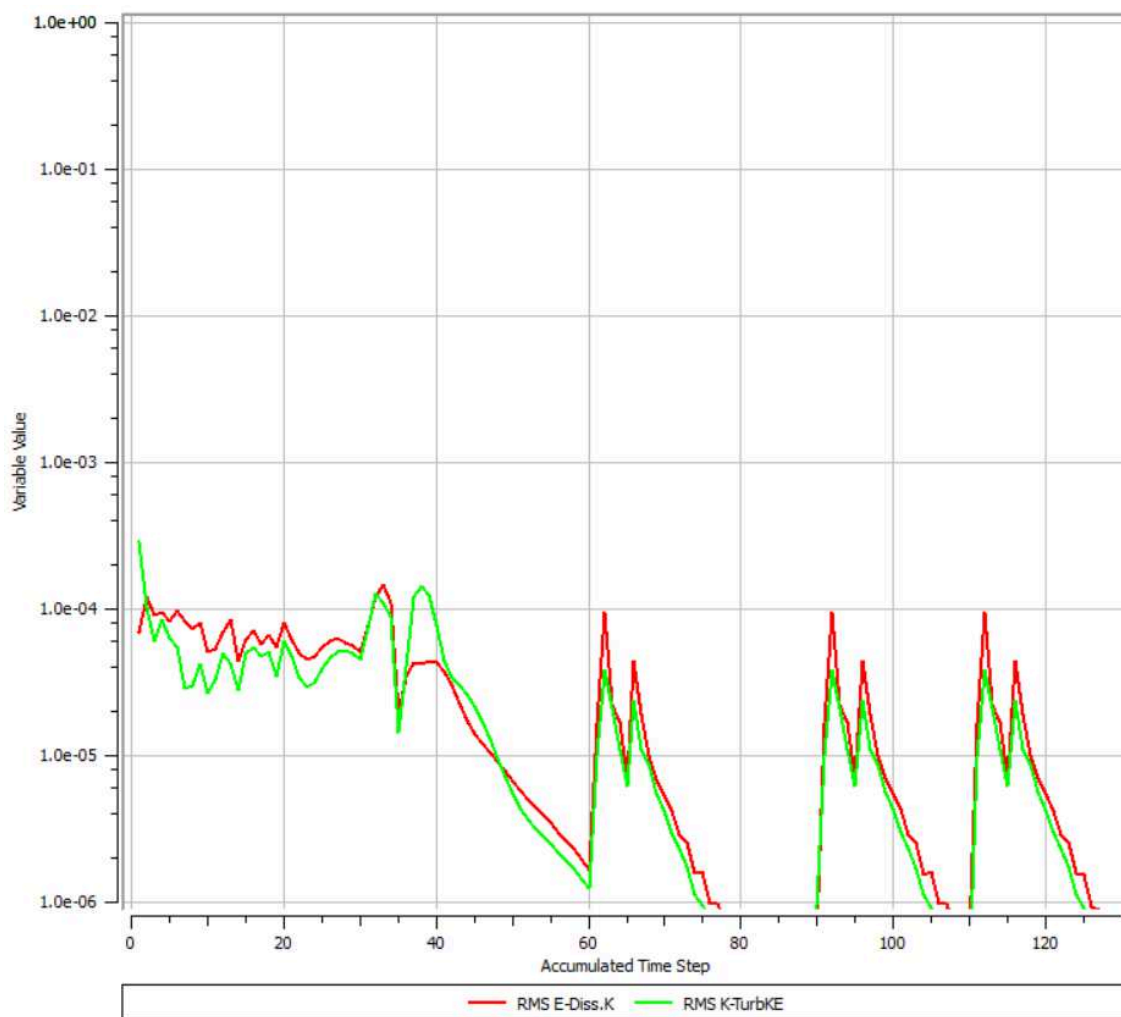


Figura 28. Gráfico da variação do RMS (raiz do desvio quadrático médio) relativo aos parâmetros de turbulência k - ϵ , em função do passo de tempo acumulado.

Fonte: Autor.

A Figura 29 apresenta o gráfico da variação dos pontos definidos pelo usuário, relativos aos parâmetros de deformação total da malha na direção X (paralela ao fluxo), em função do passo de tempo acumulado.

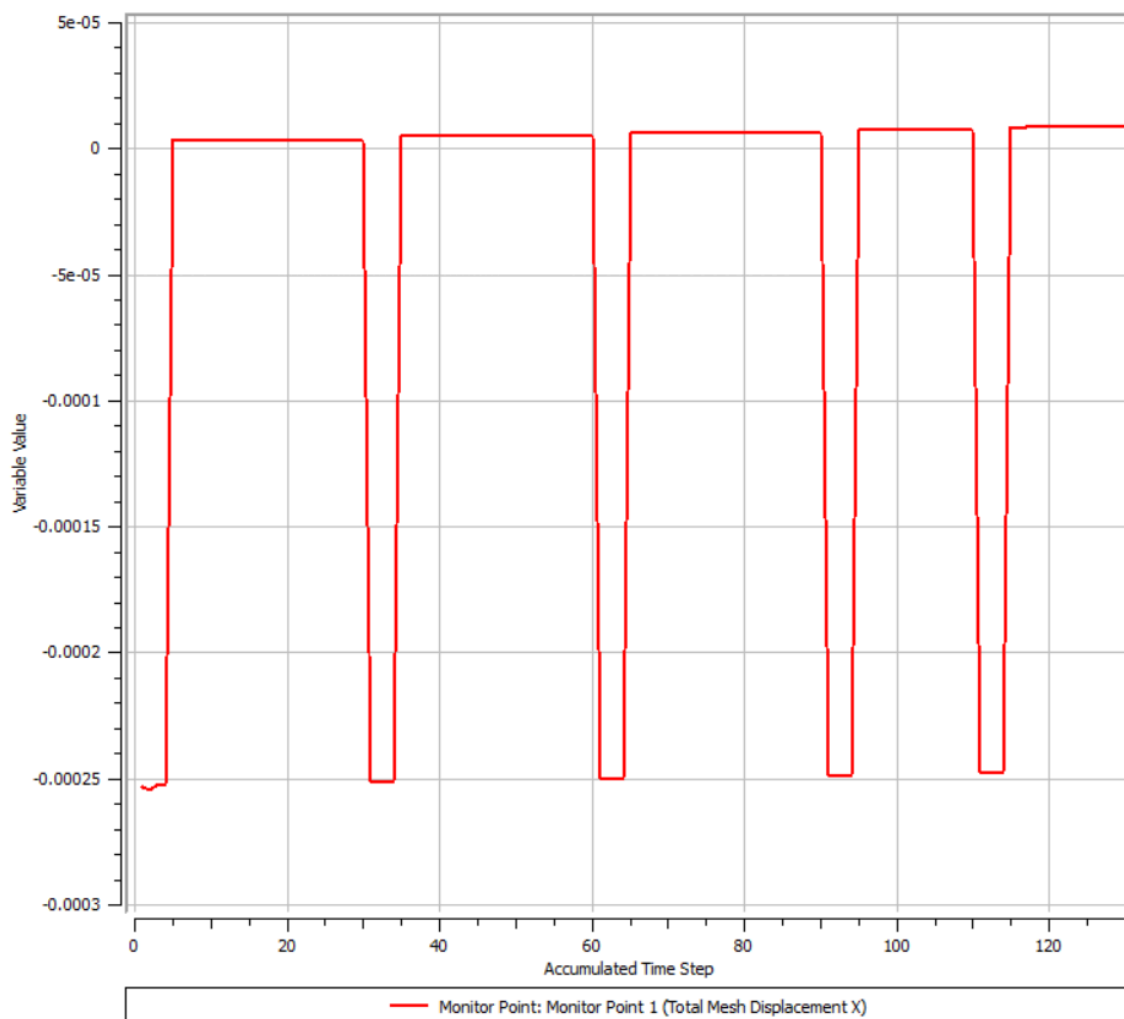


Figura 29. Gráfico da variação dos pontos definidos pelo usuário, relativos aos parâmetros de deformação total da malha em X, em função do passo de tempo acumulado.

Fonte: Autor.

A Figura 30 apresenta o gráfico da variação dos parâmetros do *Solver*, em função das iterações acumuladas.

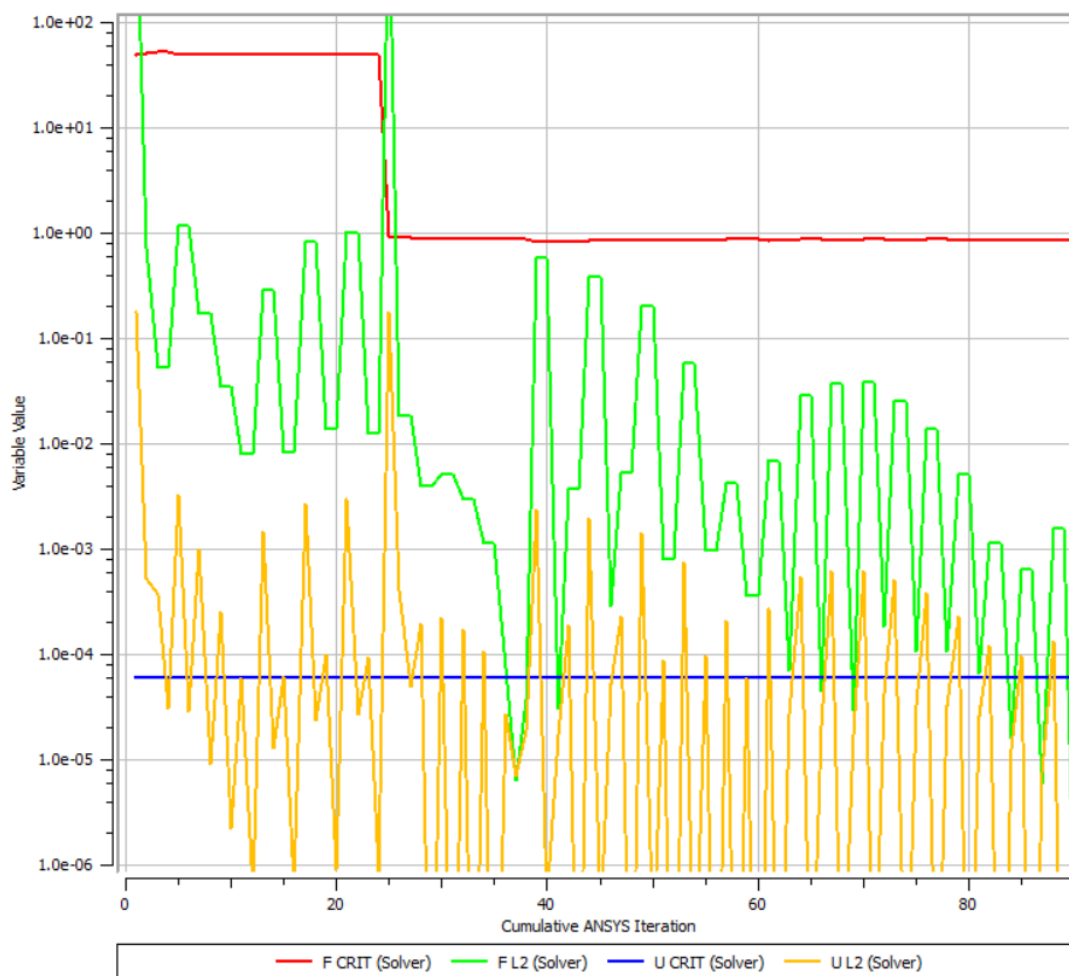


Figura 30. Gráfico da variação dos parâmetros do Solver, em função das iterações acumuladas.

Fonte: Autor.

A Figura 31 apresenta o gráfico da variação das cargas na Interface, em função das iterações acumuladas.

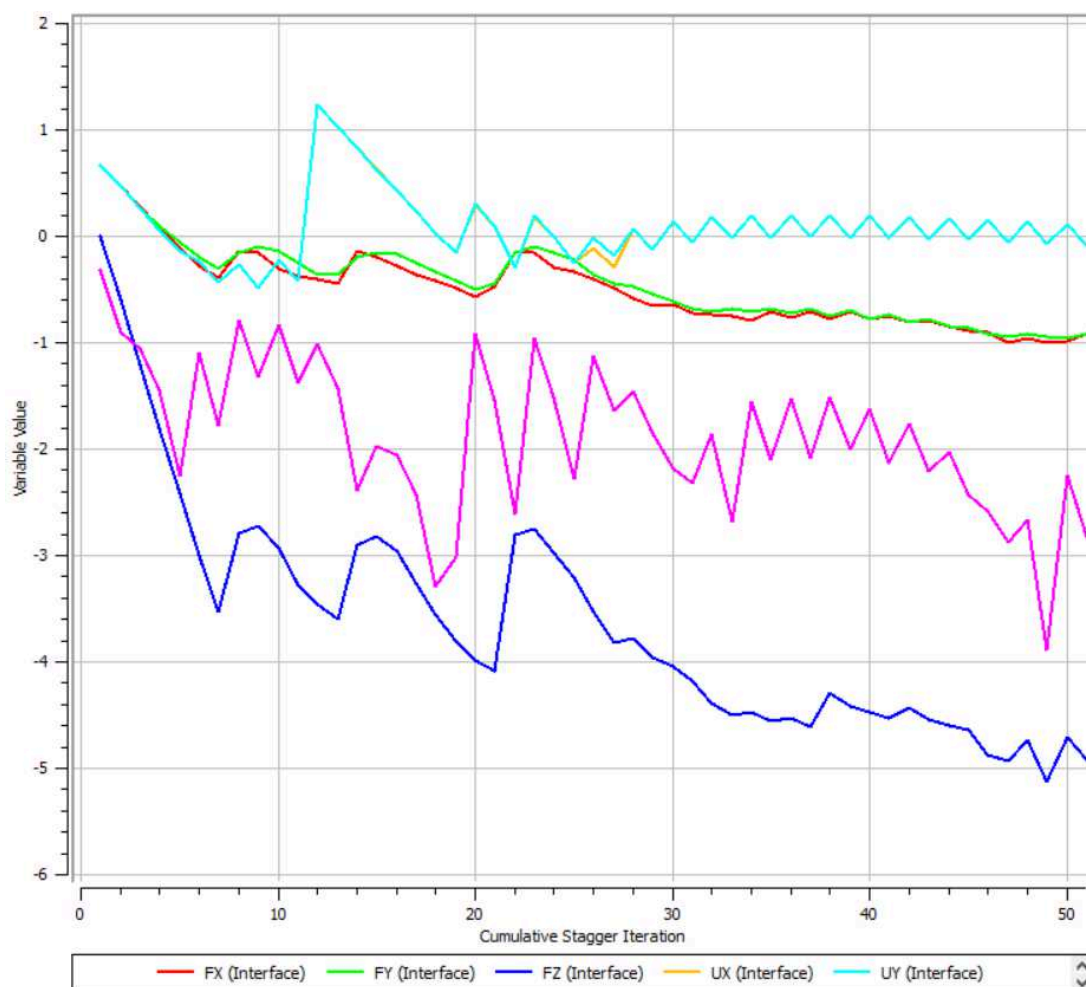


Figura 31. Gráfico da variação das cargas na Interface, em função das iterações acumuladas.

Fonte: Autor.

Os gráficos obtidos apresentam as curvas com aspecto esperado, ou seja, mantém uma tendência que representa convergência dos resultados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Resultados da análise estrutural - Modelo de cinco barras

Os resultados das tensões de Von Mises obtidas estão apresentados na Figura 32. Os resultados apresentados são referentes a um intervalo de tempo igual a 0,4 segundos. A máxima tensão calculada foi de 41,87 MPa, exatamente na região próxima ao engastamento.

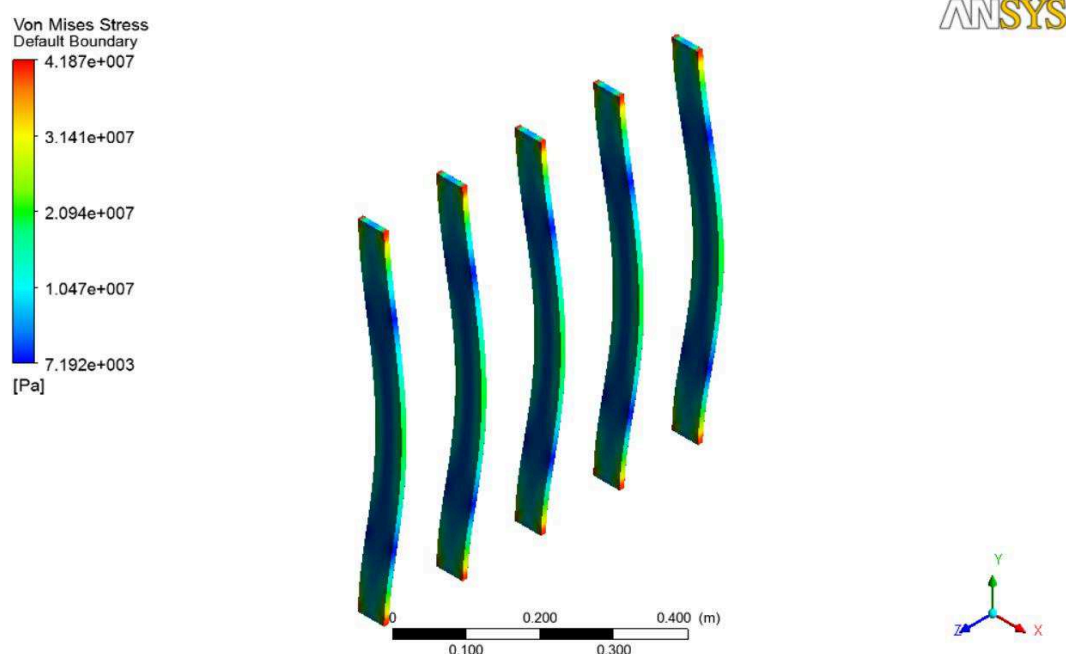


Figura 32. Tensões de Von Mises nas barras verticais.

Fonte: Autor.

Os mínimos valores de tensão encontrados estão localizados na região onde o momento fletor é zero. Ou seja, a uma distância do engastamento de 0,2113 vezes o comprimento da viga, que representa aproximadamente 137,35 mm dos apoios. A Figura 33 apresenta uma vista lateral da barra vertical afim de identificar a região com as tensões mínimas. A tensão mínima neste modelo 0,007192 MPa, ou seja, praticamente zero.

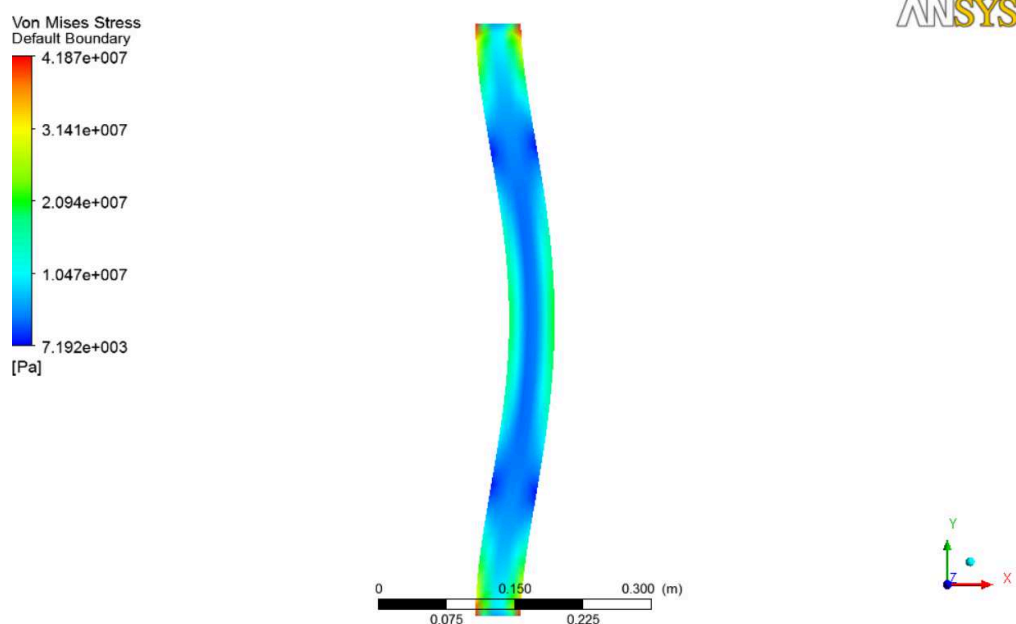


Figura 33. Tensões de Von Mises nas barras verticais (vista lateral).

Fonte: Autor.

Os resultados das deformações na direção do eixo X obtidas na análise estão apresentados na Figura 34. Os resultados apresentados são referentes a um intervalo de tempo igual a 0,4 segundos. As máximas deformações em na direção X estão localizadas na região central das barras, que coincide com a solução analítica do problema. As deformações mínimas estão localizadas na região dos apoios, pois se trata de engastamento perfeito.

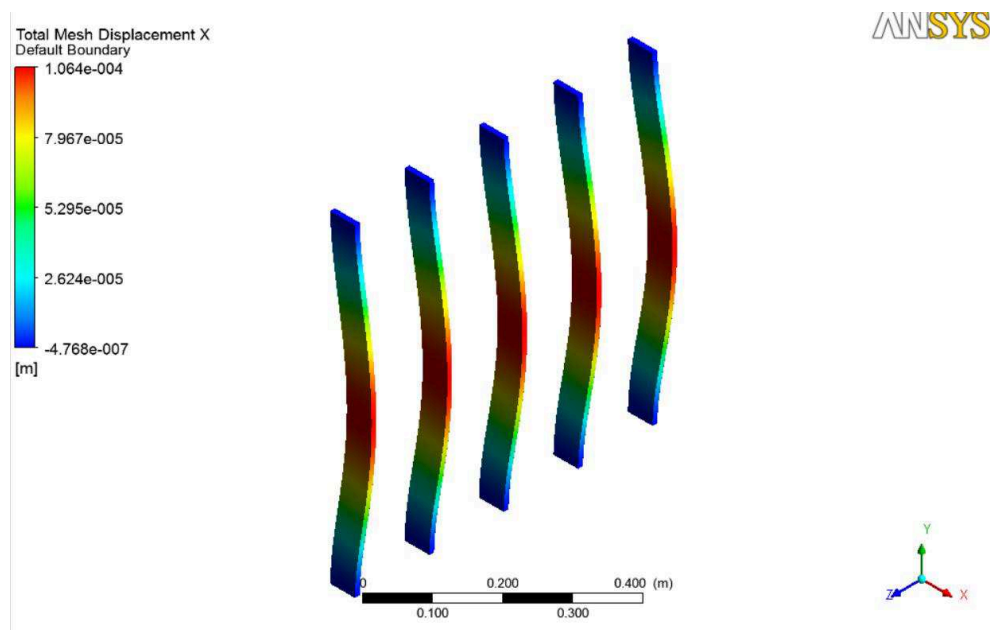


Figura 34. Deformações na direção do eixo x nas barras verticais.

Fonte: Autor.

Os resultados das deformações na direção do eixo z obtidas na análise estão apresentados na Figura 35. Os resultados apresentados são referentes a um intervalo de tempo igual a 0,4 segundos. A máxima deformação calculada na direção Z foi de 0,01046 mm, na região central da primeira barra lateral. As mínimas deformações na direção Z estão localizadas nas extremidades das barras, ou seja, onde foi definido como condição de contorno de deslocamento igual a zero.

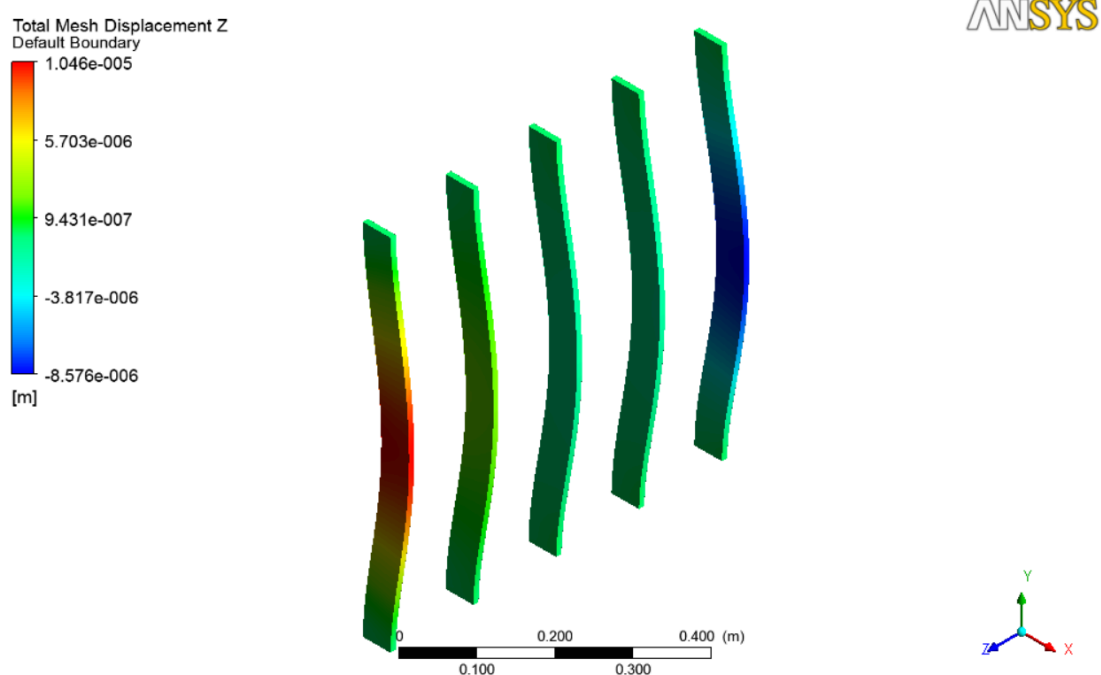


Figura 35. Deformações na direção do eixo z nas barras verticais.

Fonte: Autor.

5.2. Resultados da análise de dinâmica dos fluidos - modelo de cinco barras

Os resultados das velocidades estão apresentados na Figura 36. Foi definido um plano ZX para visualização do perfil de velocidades. A Figura 30 apresenta o perfil de velocidades resultantes da análise de dinâmica dos fluidos computacional. A máxima velocidade calculada foi localizada na região próxima do canto vivo a montante da seção transversal das barras verticais. Esta velocidade possui a intensidade de 4,231 m/s. A região laranja da Figura identifica a formação dos vórtices. Estes vórtices são a principal fonte de vibração nas grades.

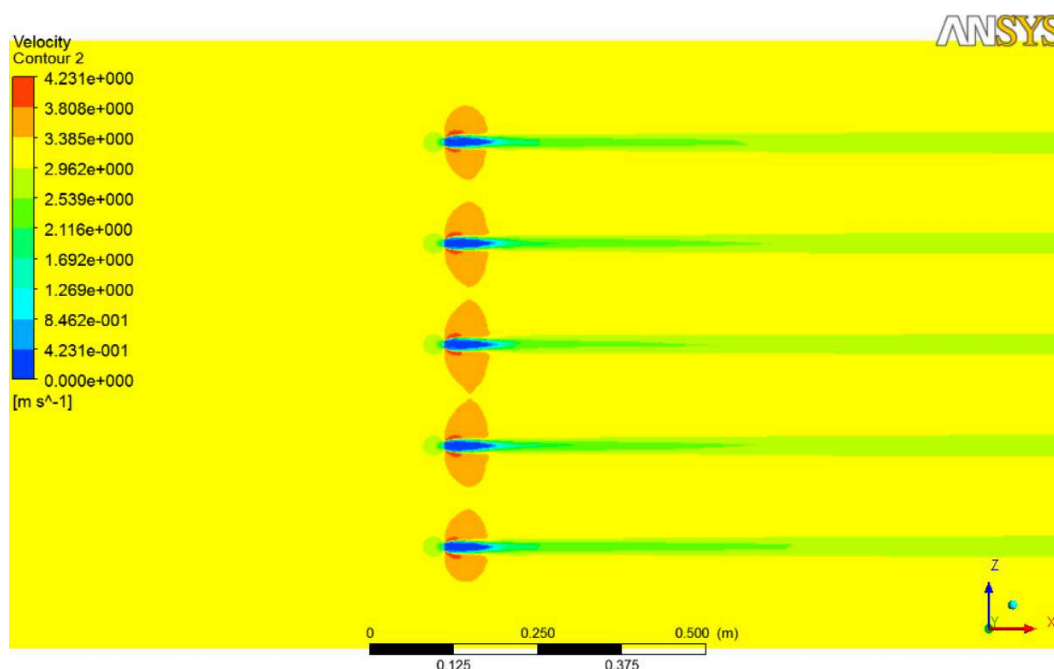


Figura 36. Perfil de velocidades da análise de dinâmica dos fluidos (plano XZ localizado a 300 mm da origem – *offset* em y).

Fonte: Autor.

A Figura 37 apresenta o detalhe dos vetores de velocidades resultantes da análise de dinâmica dos fluidos computacional. É possível notar na Figura 37 que o vetor da máxima velocidade ocorre a um ângulo de aproximadamente 30 graus com a horizontal. A mínima velocidade calculada está localizada exatamente sobre a parede da estrutura da barra vertical.

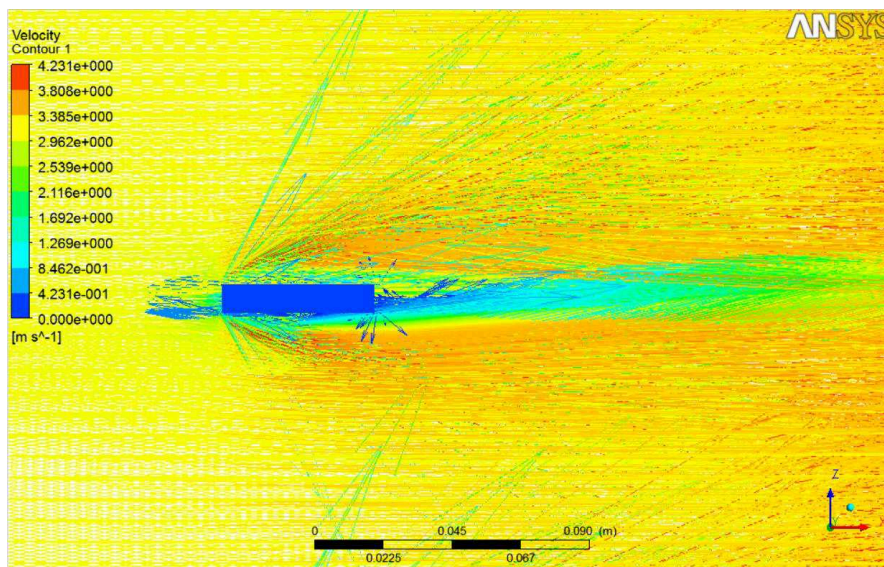


Figura 37. Detalhe dos vetores de velocidades da análise de dinâmica dos fluidos.

Fonte: Autor.

A Figura 38 mostra um zoom na região de interesse, ou seja, apresenta o detalhe das linhas de corrente quando o escoamento passa por uma barra vertical. No detalhe, é possível identificar a formação dos vórtices.

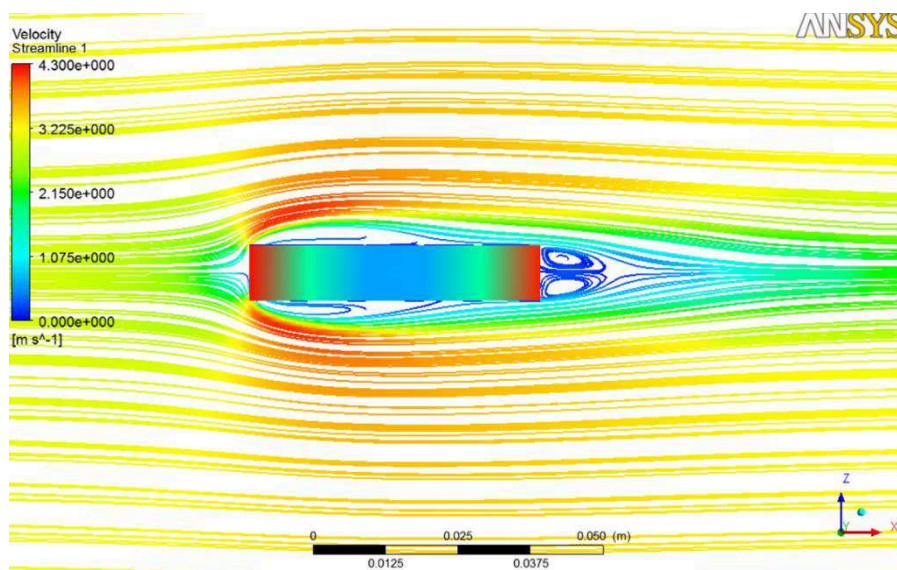


Figura 38. Detalhe das linhas de corrente de velocidade da análise de dinâmica dos fluidos.

Fonte: Autor.

A Figura 39 apresenta o detalhe da distribuição de pressões na barra vertical devido ao escoamento. A Figura 39 apresenta a máxima pressão que ocorre na face da barra em contato com a água. Segundo o cálculo o valor da máxima pressão é de 5.442 Pa. A mínima pressão calculada foi de -6.090 Pa. A pressão mínima ocorre na

região próxima aos cantos vivos a montante. Ou seja, devido ao descolamento da camada limite neste ponto, formam-se vórtices que provocam uma região de sucção ou pressão negativa.

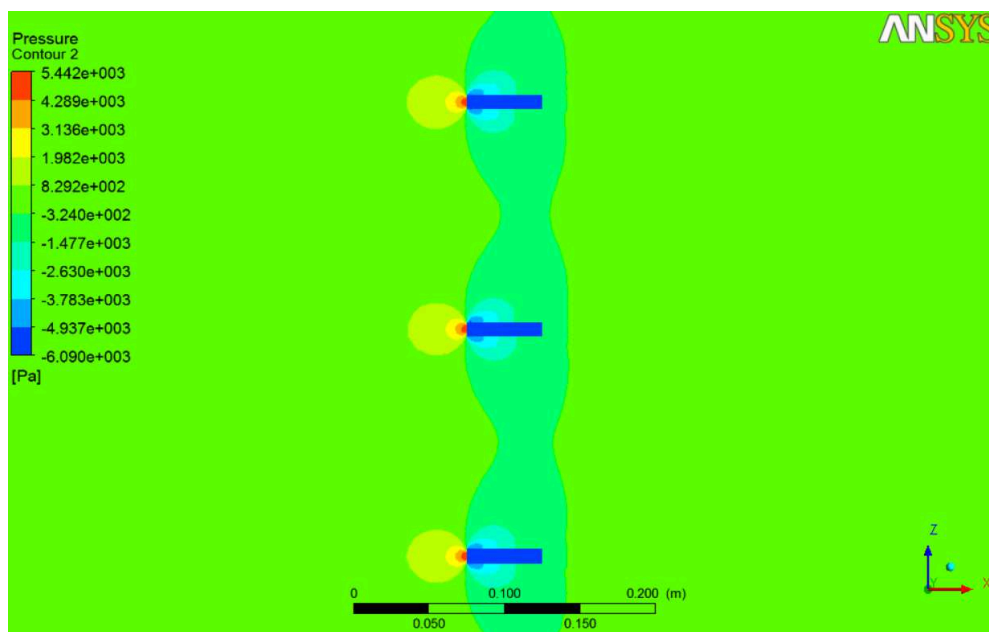


Figura 39. Detalhe do perfil de pressões da análise de dinâmica dos fluidos.

Fonte: Autor

5.3. Verificação dos resultados do modelo numérico comparando com os dados experimentais da bibliografia

Considerando o modelo estrutural simplificado de cinco barras verticais, este pode ser verificado, sob o ponto de vista estrutural. Sabendo-se que a solução analítica da viga bi-engastada estática é conhecida, pode-se comparar os resultados obtidos numericamente e analiticamente. A tensão pode ser calculada considerando uma viga bi-engastada submetida a um carregamento distribuído devido à perda de carga de 3 metros de coluna d'água. A diferença entre os resultados obtidos da tensão de Von Mises foi de 6,51%. Esta diferença se deve a contribuição da tensão dinâmica gerada pelo escoamento. Também pode-se atribuir esta diferença a geometria. A região onde está localizada esta tensão é um canto vivo, ou seja um concentrador de tensão.

Sob o ponto de vista de análise de interação fluido estrutura, o seguinte procedimento foi elaborado de modo a validar o modelo numérico. Primeiramente,

calculou-se a velocidade reduzida crítica, ou seja a velocidade U onde a frequência de excitação é igual a frequência natural. Com o valor desta velocidade, inseriu-se no modelo tal velocidade e verificou-se a deformação em z da barra. Repetiu-se o procedimento para 7 velocidades e montou-se um gráfico conforme a Figura 39.

As dimensões das barras são: 650 x 50 x 9,5 mm. Portanto, a relação c / d é de 5,26, que significa que a barra é classificada como Grupo II.

A Tabela 7 apresenta os principais resultados obtidos para os parâmetros de verificação do modelo numérico.

Tabela 7 - Resultados obtidos para os parâmetros de verificação do modelo.

Parâmetro	Valor	Unidade
$E_{\text{aço}}$...Módulo de elasticidade	2141404	[kgf/cm ²]
s... Espaçamento entre barras (centro a centro)	145	[mm]
c... Largura da barra	50	[mm]
d... espessura da seção transversal	9,5	[mm]
ρ ...densidade da água	0,997	[kg/dm ³]
$\rho_{\text{aço}}$...Densidade do aço	7,85	[kg/dm ³]
M...Coeficiente de modo	3,565	[1]
h...Comprimento da barra vertical	650	[mm]
n...Frequência natural da barra	99,76	[Hz]
S... Número de Strolhal	0,113	[1]
f... frequência de excitação	36,87	[Hz]
$U_{\text{crítica}} =$	8,850	[m/s]
$V_{\text{crítica}} =$	8,387	[m/s]

(Fonte: Autor)

Onde $U_{\text{crítica}}$ e $V_{\text{crítica}}$ são respectivamente a velocidade reduzida e a velocidade crítica.

Afim de verificar o modelo numérico para análise de interação fluido-estrutura, elaborou-se um gráfico de amplitude de vibração por espessura da seção transversal (a/d) versus a velocidade reduzida U. Neste gráfico, é possível visualizar a região onde existe ressonância, ou seja, a frequência de excitação é igual a frequência natural. Neste caso, a partir deste valor de velocidade, a amplitude de vibração tende a ser majorada. Conforme apresentado na Figura, a amplitude de vibração começa a aumentar consideravelmente após a velocidade reduzida atingir o valor igual a $1/S$, que indica ressonância, conforme Figura 5(b). Foram elaboradas 7 análises com diferentes velocidades para se obter o gráfico da Figura 40. A Tabela 8 apresenta os dados que foram utilizados na confecção do gráfico.

Tabela 8 - Resultados obtidos para a elaboração do gráfico a/d versus U ($t=0,4$ s).

Simulação No.	V [m/s]	U	Uz [mm]	a / d
1	3,100	3,271	1,96E-03	2,07E-04
2	4,100	4,326	2,85E-03	3,00E-04
3	4,966	5,240	4,21E-03	4,44E-04
4	6,000	6,331	1,07E-02	1,13E-03
5	8,387	8,850	2,26E-02	2,37E-03
6	12,000	12,663	4,55E-02	4,79E-03
7	14,000	14,773	3,33E-02	3,51E-03

Os resultados dos deslocamentos das barras para as sete análises com as respectivas velocidades estão apresentados no gráfico da Figura 40.

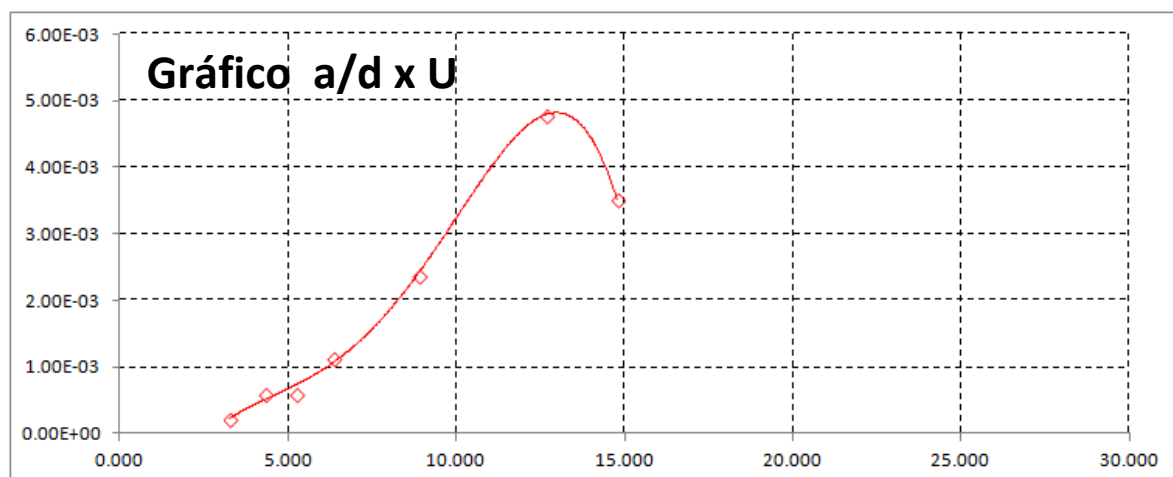


Figura 40. Gráfico de velocidade reduzida versus amplitude de vibração.

Fonte: Autor.

5.4. Análise Modal de uma barra bi-engastada

Com o objetivo de avaliar a resposta obtida através da Equação (19), foi elaborada um análise modal de uma barra vertical sem a presença do fluido. As mesmas dimensões e condições de contorno foram consideradas. Foi obtida uma frequência de 117,47 Hz para o primeiro modo de vibração, flexão na direção z. Os resultados desta análise modal foram obtidos através do software comercial ANSYS Workbench. Os resultados estão de acordo com o esperado porque sabe-se que a presença do fluido diminui o valor da frequência natural.

Utilizando a Equação (19), a frequência natural de uma barra vertical na água é de 99,76 Hz. Portanto, a diferença da primeira frequência natural calculada entre as barras verticais com e sem a presença de fluido é de aproximadamente 15%.

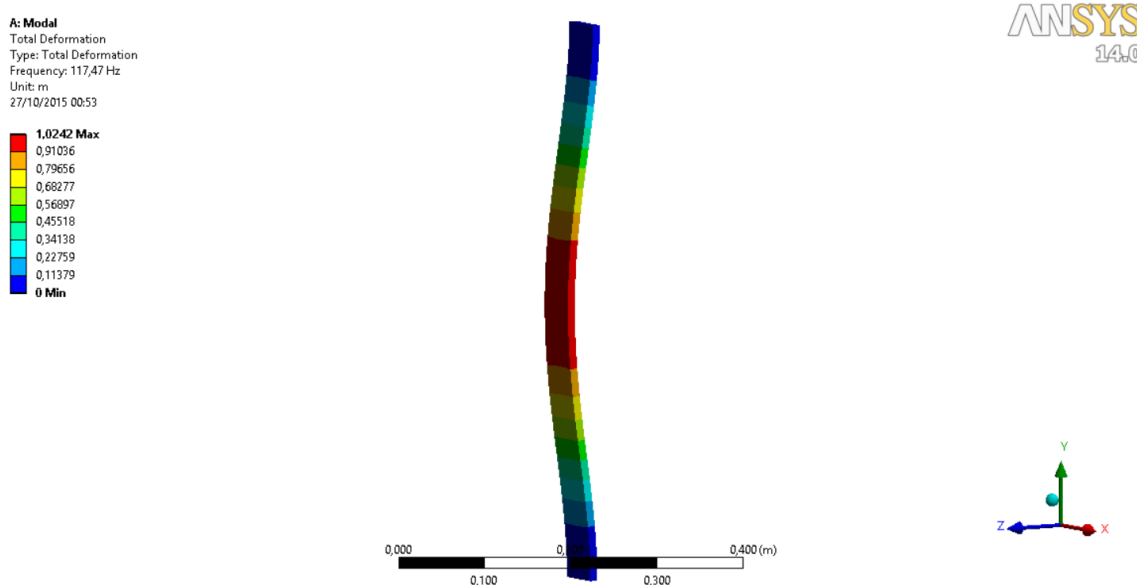


Figura 41. Análise Modal de uma Barra Vertical.

Fonte: Autor.

5.5. Resultados da análise estrutural - Modelo de duas barras verticais inclinadas

Os resultados das tensões de Von Mises obtidas estão apresentados na Figura 42. Os resultados apresentados são referentes a um intervalo de tempo igual a 0,4 segundos. As máximas tensões de Von Mises são de 199,4 MPa e ocorrem na região do engastamento das barras. A mínimas tensões de Von Mises são de 0,00219 MPa e ocorrem na região da barra horizontal.

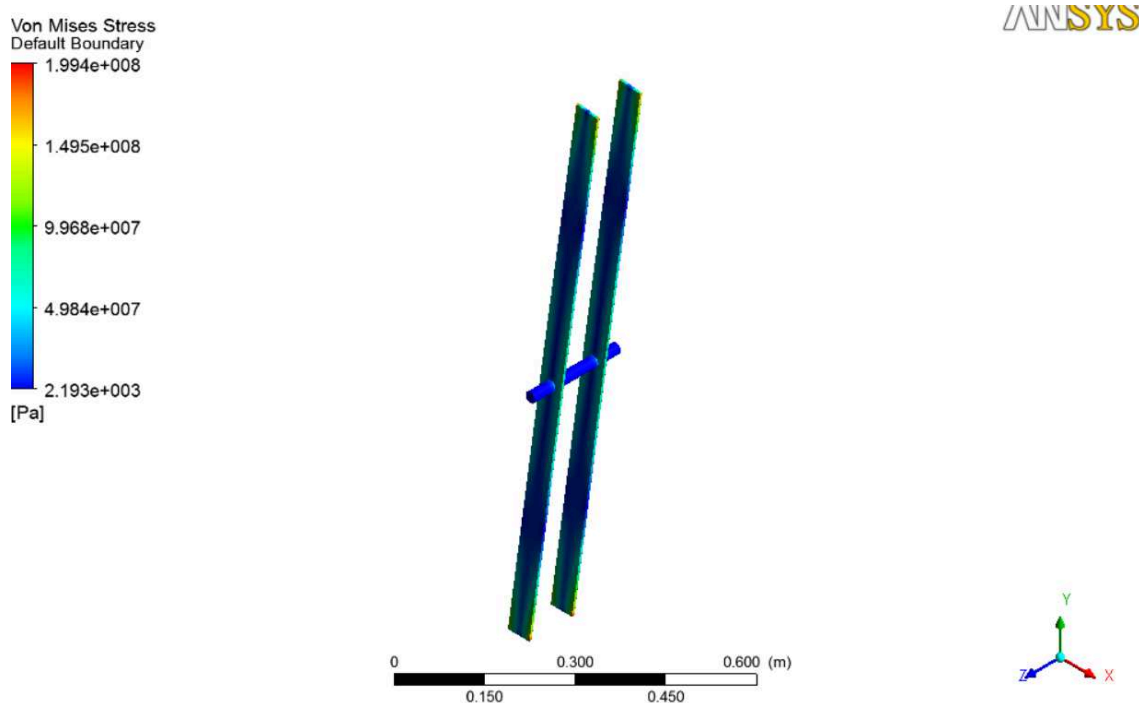


Figura 42. Tensões de Von Mises nas barras verticais.

Fonte: Autor.

Devido a condição de maior rigidez da estrutura devido a barra horizontal, apenas as tensões de Von Mises foram analisadas.

5.6. Resultados da análise de dinâmica dos fluidos - modelo de duas barras verticais inclinadas

Os resultados das velocidades estão apresentados na Figura 43. Primeiramente, foi definido um plano XY para visualização do perfil de velocidades. A Figura 43 apresenta o perfil de velocidades resultantes da análise de dinâmica dos fluidos computacional.

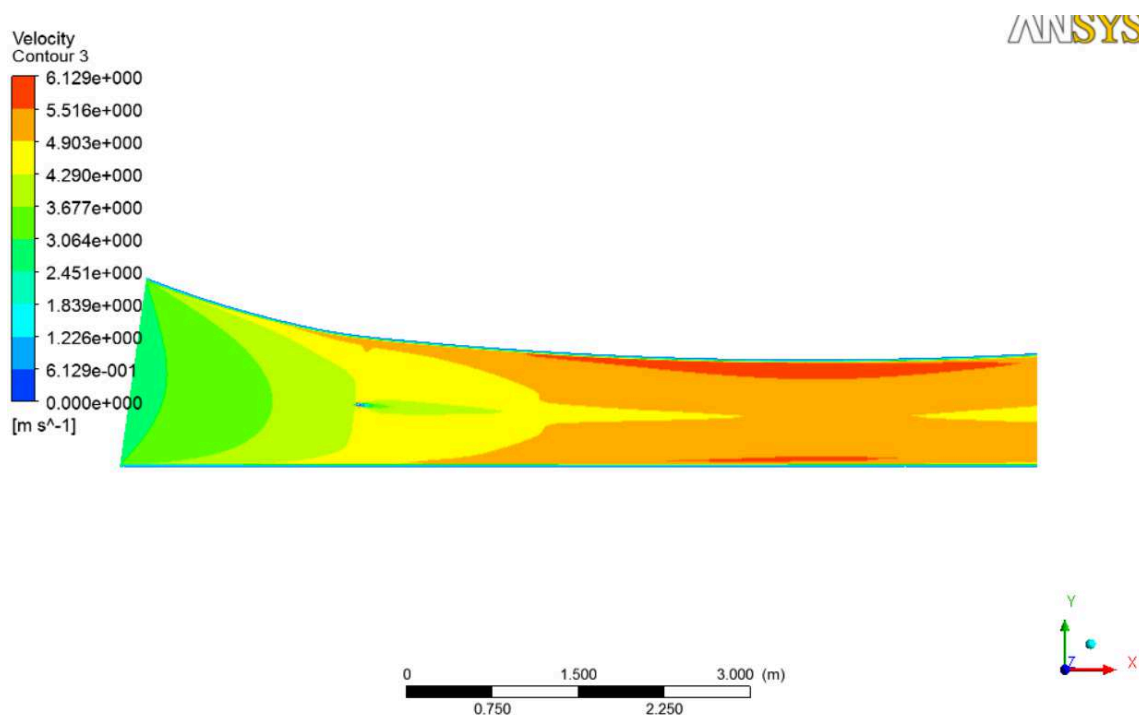


Figura 43. Perfil de velocidades da análise de dinâmica dos fluidos (plano XY localizado sobre o plano XY na origem).

Fonte: Autor.

A Figura 44 apresenta o detalhe do perfil de velocidades resultantes da análise de dinâmica dos fluidos computacional. Tal figura apresenta as regiões onde se formam os vórtices a jusante da grade. Estes vórtices são os principais tipos de excitação induzidas pelo fluxo. Estes são gerados devido ao aumento da velocidade e geometria das barras, que produzem descolamento da camada limite.

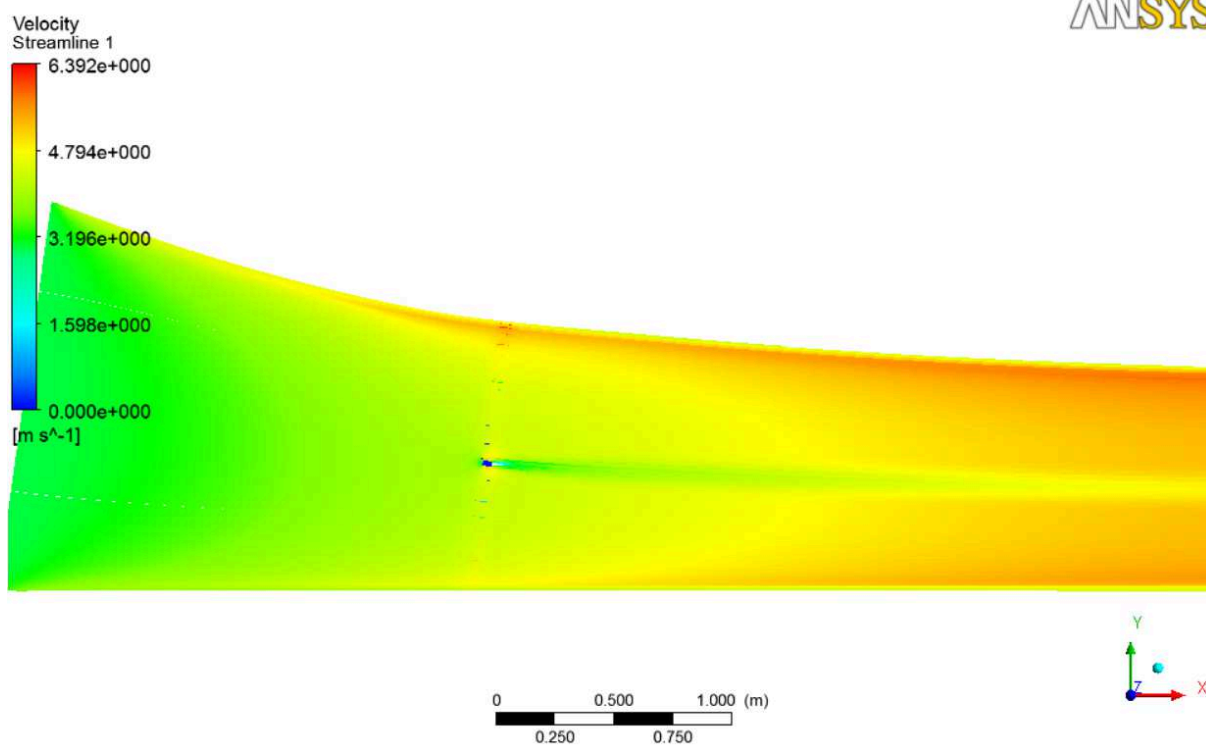


Figura 44. Detalhe do perfil de velocidades da análise de dinâmica dos fluidos (formação de vórtices na região próxima da barra).

Fonte: Autor.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para efeito de verificação, verificaram-se as tensões e deformações da grade. Devido à rigidez da barra no sentido paralelo ao fluxo, pode-se concluir que o projeto atende bem os requisitos de projeto seguro contra vibração induzida pelo fluxo.

A utilização do software de elementos finitos ANSYS comprova a eficiência em obter resultados de análise de estruturas de forma precisa e rápida. Ou seja, garantir que as estruturas resistam as cargas aplicadas.

A seguir apresentam-se as conclusões do trabalho.

6.1. Conclusões

Os resultados obtidos estão de acordo com o esperado. Ou seja, os resultados de tensões se aproximaram com os cálculos analíticos.

Considerando a pressão estática de 3 m.c.a., atuando em uma viga bi-engastada, a tensão exata é de 39,13 MPa, nos apoios. O cálculo numérico apresentou uma tensão máxima de 41,86 MPa em $t = 0,4$ s, na região engastada. Os resultados de tensão da análise numérica apresentaram uma variação de 6,51% a mais em relação à teórica devido ao fato de que a análise numérica considera, além da pressão devido à perda de carga de 3,0 m.c.a., a influência da pressão dinâmica exercida pelo escoamento. Além disto, a máxima tensão, ocorre em uma região de canto vivo.

Com relação a análise fluido estrutura, os resultados foram bastante satisfatórios. Uma vez que foi identificada no gráfico de velocidade reduzida versus amplitude de vibração uma região de grande aumento da amplitude de vibração em função da velocidade. Este aumento da amplitude de vibração pode ser explicada pelo mecanismo de retroalimentação gerado pelos vórtices. Foram elaboradas sete análises com diferentes velocidades. É importante salientar que apesar do projeto da grade apresentar uma boa rigidez estrutural, principalmente na direção paralela ao fluxo, se as velocidades forem muito altas, a grade pode falhar devido às

deformações na direção z. É essencialmente importante verificar a relação entre a frequência natural a frequência de excitação das barras. De acordo com as análises elaboradas neste trabalho, a amplitude de vibração aumenta muito quando a frequência de excitação é igual a frequência natural, que é o princípio da ressonância. Segundo a norma ABNT NBR 11213, a frequência natural deve ser maior que 1,5 vezes a frequência excitação. No caso do presente trabalho a frequência natural calculada é 99,76 Hz. A frequência de excitação calculada é de 36,87 Hz.

Assim, foi possível, através do software comercial ANSYS CFX 14, realizar-se uma simulação computacional com o objeto de avaliar quantitativamente a influência das velocidades dos fluidos de um escoamento de água interagindo com as barras verticais utilizando as técnicas de dinâmica de fluidos computacional (CFD), para um regime turbulento, modelo k- ϵ . O estudo mostrou que a simulação fluidodinâmica é uma importante ferramenta a ser utilizada na elaboração de projetos mais complexos envolvendo interação fluido-estrutura.

6.2. Trabalhos futuros

Propõe-se como trabalhos futuros, a elaboração de análises considerando o fluxo oblíquo incidindo sobre as barras.

Devido a condição de carregamento cíclico devido aos vórtices de Karman, a verificação das barras quanto a fadiga também se torna um assunto de extrema importância. Ou seja, calcular a vida em fadiga para assegurar a integridade da estrutura.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 11213. **Grade de Tomada d'Água para Instalação Hidráulica - Cálculo**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2001.

ANSYS CFX. **User Manual**, ANSYS-CFX 14. 2011.

BEHRING, A, G.; YEH, C. H. **Flow-induced trashrack vibration**. Harza Engineering Company, Chicago, Illinois, 1980.

BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E.N. **Fenômenos de Transporte**, LTC editora, 2a edição, Rio de Janeiro. 2004.

BLEVINS, R. D. **Flow-induced vibration**. 1st Ed., Van Nostrand Reinhold Company, New York, N. Y. 1977.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T.; PRITCHARD, P.J.; **Introdução À Mecânica Dos Fluidos** - 8ª Ed. LTC. 2014.

GHAMRY, H.; KATOPODIS, C. **Numerical Investigation Of Turbulent Flow Through Bar Racks In Closed Conduits**. 9th ISE 2012. Vienna.

HRIBERNIK, A.; FIKE, M.; HRIBERNIK, T. M. **Economical Optimization of a Trashrack Design for a Hydropower Plant**. University of Maribor, Faculty of Economics and Business Razlagova 14, Maribor, Slovenia. 2013.

HUANG, X.; VALERO, C.; EGUSQUIZA, E.; PRESAS, A.; GUARDO, A. **Numerical and experimental analysis of the dynamic response of large submerged trash-racks**. ELSEVIER. Computers & Fluids 71 (2013) 54–64.

KERENYI, K.; DROBIR, H.; STAUBLI, T.; DORRER, G.; HEJL, N. **Flow-Induced Multiple-Mode Vibrations of Lightly Damped Rectangular Trashrack Prisms**.

Institut für Konstruktiven Wasserbau, Technische Universität Wien, A-1040 Wien, Austria. 1997.

KOLKMAN, P. A.; JONGELING, T. H. G. **Dynamic behaviour of hydraulic structures - Part A - Structures in flowing fluid.** Delft Hydraulics. 2007.

NASCIMENTO, L. P.; SILVA, J. B. C.; GIUNTA, V. **Model of Hydroelectric Power Plant Trashracks including Fluid-Structure Interaction**, 17th International Congress of Mechanical Engineering, 2003. São Paulo-SP.

Naudascher, E. (Ed.), **Flow-Induced Structural Vibrations**, Iutam / Jahr Symposium Karlsruhe 1972. 360 figs. XX, 774 pages. Berlin-Heidelberg-New York. Springer-Verlag. 1974.

NGUYEN, T. D.; NAUDASCHER, E., FELLOW. **Vibration of beams and Trash Racks in Parallel and Inclined Flows.** J. Hydraul. Eng., 10.1061/(ASCE)0733-9429(1991)117:8(1056), 1056-1076. 1991.

NOVAK, M. **Galloping and vortex-induced oscillations of structures.** Proc. Third Int. Conf. on Wind Effects on Bldgs. and Struct., Sailcon Co.; Ltd., Tokyo, Japan, 799-809. 1971.

PARKINSON, G. V.; **Mathematical models of flow-induced vibrations of bluff bodies.** Proc. Symp. on Flow-Induced Vibrations of Bluff Bodies, Int. Assoc. for Hydraulic Research and Int. Union of Theoretical and Applied Mechanics, 81-127. 1974.

PATANKAR, S.V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow.** New York: Hemisphere. 1980.

SADRNEJAD, S. A. **Hydrodynamics Induced Vibration to Trash-racks.** Department of Civil Eng., K. N. Toosi University of Tech., Teheran, Iran. 2002.

SCHNEIDER, F.A.; MASLISKA, C.R.; **Uma Formulação em Volumes Finitos Usando Malhas Não-Estruturadas.** SINMEC – Lab. de Simulação Numérica em Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica. 1999.

SCHEUMANN, T. M. **A Failure Analysis Case Study of the Fluid-Structural Interactions on Trashracks.** A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. University of Washington. 2012.

SHIRAISHI, N.; MATSUMOTO, M. **On classification of vortex-induced oscillation and its application for bridges structures.** "Proc. Int. Conf. on Wind Engineering, TechnischeHochschule, Aachen, West Company, 418-430. 1983.

TIMOSHENKO, S. **Vibrations Problems in Engineering.** Part I, Second Edition, 1937.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method.** England: LongmanScientific&Technical. 1995.