

ANÁLISE COMPUTACIONAL DINÂMICA DOS MODOS DE VIBRAÇÃO EM VIGAS DE CONCRETO.

WESTEMAIER, Estela Luiza da Silva¹;

FIGUEIREDO, Filipe Bittencourt ²;

Discente do curso de Engenharia Civil, UFGD, estelaluiza1@hotmail.com¹;

Docente do curso de Engenharia Civil, UFGD, filipefigueiredo@ufgd.edu.br²

RESUMO - Devido aos acidentes provocados nos últimos anos por vibrações excessivas em construções, faz-se necessário um estudo que descreve o comportamento de estruturas quando submetidas a esta ação. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo a análise dinâmica de controle de vibrações aplicadas à uma viga de concreto. Para validar a metodologia de análise com os resultados encontrados no ABAQUS® utilizou-se uma viga metálica engastada livre desenvolvida numericamente por Menão (2014). Posteriormente, foi definido as características para uma viga de concreto e submetida a análise dos seus cinco primeiros modos de vibração. O primeiro modo de vibração da viga de concreto analisada apresentou um valor aproximado de 4,34 Hz o que pode apresentar instabilidade e insegurança para os usuários quando comparadas aos valores estabelecidos na NBR6118/2014.

Palavras-chave: Simulação. Estrutura. Viga.

ABSTRACT - Due to the accidents caused by excessive vibrations over the years, a study looking at the behaviour of structures under vibration loading is required. The worked presented here in concerns with the dynamic control of vibrations applied to a concrete beam. To validate the analysis methodology of the results obtained via ABAQUS®, the study used a non expandable steel beam that was generated numerically by Menao (2014). Subsequently, the characteristics for a concrete beam were defined and subjected to analysis of its first five modes of vibration. The first vibration mode of the concrete beam analyzed presented an approximate value of 4.34 Hz, which may present instability and insecurity for users when compared to the values established in NBR6118/2014.

Keywords - Simulation. Structure. Beam.

1. INTRODUÇÃO

A análise de estruturas é uma área de grande importância para a construção civil, nela pode-se observar que as estruturas são capazes de receber e transmitir esforços como em pontes, edifícios e antenas. As estruturas em geral têm a necessidade de suportar as solicitações que são postas ao decorrer de sua vida útil (SORIANO e LIMA, 2006), portanto faz-se necessário análise e estudos de ações nas quais as estruturas de concreto estão submetidas, como por exemplo as vibrações.

O estudo da vibração está diretamente associado aos movimentos oscilatórios de corpos e as forças que lhes convém. Todos os corpos estão sujeitos à vibração, logo, a maior parte de estruturas e máquinas estão suscetíveis a uma quantia de vibração e o seu projeto exige em alguns casos um estudo do seu comportamento oscilatório (THOMSON, 1978).

Estudando os tipos de vibrações é possível citar alguns exemplos que podem gerar em estruturas de concreto, como: tráfego rodoviário e ferroviário, abalos sísmicos, frequência natural, ações dinâmicas, entre outras.

Logo, faz-se necessário desenvolver uma metodologia de análise de estruturas de concreto submetidas à vibração para se conhecer quais os comportamentos esperados, a fim de se evitar desastres provenientes desses eventos e, com isso, utilizar softwares capazes de simular situações reais e práticas das construções aumentando a segurança e consequentemente reduzindo os riscos inerentes à sua execução.

Dentre as análises que são possíveis realizar nesses softwares destaca-se a simulação e recuperação de estruturas submetidas a vibrações, que tem sido alvo de pesquisas por todo o mundo, com a finalidade de se prever o comportamento das estruturas sobre o efeito da vibração. Entre alguns programas desenvolvidos, o ABAQUS® vem se destacando pela sua capacidade de simular o comportamento de elementos estruturais (CALDAS, 2008).

2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo a análise dinâmica de controle de vibrações aplicadas à uma viga de concreto.

São objetivos específicos deste trabalho:

- Criar uma metodologia numérica de análise de vibração para elementos estruturais através do software ABAQUS®;
- Validar a metodologia de análise com os resultados encontrados no ABAQUS® com o software CREO® utilizado por Menão (2014);

- Analisar o comportamento de vigas de concreto submetidos a vibrações e apresentar seus modos de vibração.

3. JUSTIFICATIVA

Após relatos de catástrofes ocorridas pelo mundo, o estudo sobre vibrações em estruturas sob a ação de carregamentos dinâmicos, vem se destacando por ser um tema que pode ocorrer em qualquer situação, trazendo grandes perdas materiais e vidas humanas.

Neste sentido, o domínio de software de análise estrutural é essencial para poder solucionar ocorrências de vibrações excessivas e indesejáveis, pois esse fenômeno pode causar estragos nas estruturas devido ao elevado valor dos esforços solicitantes ocasionados, sendo assim seu estudo é de grande importância para a construção civil.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Tipo de Vibrações

De acordo com Thomson (1978), as vibrações podem ser classificadas em não linear e linear, livre, forçada, aleatória, amortecida e não amortecida e determinística. O Quadro 1 descreve o comportamento dos tipos de vibrações.

Quadro 1– Comportamento das vibrações.

| Vibrações | |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Linear | Neste elemento existe uma relação de equilíbrio entre as forças da transposição e mola, a aceleração, velocidade, força de inércia e o amortecimento. |
| Não linear | Os elementos não se comportam uniformemente, tendo seu término em relação entre um ou mais componentes do sistema. |
| Livre | Quando um sistema varia sob a sua própria força e na falta de uma força externa. |
| Forçada | As forças externas ocorrem sob a movimentação do sistema, sendo obrigatória a vibrar na frequência desse movimento. |
| Aleatória | O movimento de suas características não pode ser antecipado em um determinado tempo. |
| Amortecida e | Possui um sistema que capacita dissipar a energia no decorrer do tempo. |
| Não amortecida | Seu movimento vibratório é definido como permanente ao decorrer do tempo, conseqüentemente sua energia vibratória não desaparece. |
| Determinística | Antecipa as características de oscilação a qualquer instante de tempo. |

Fonte: Thomson adaptado, (1978).

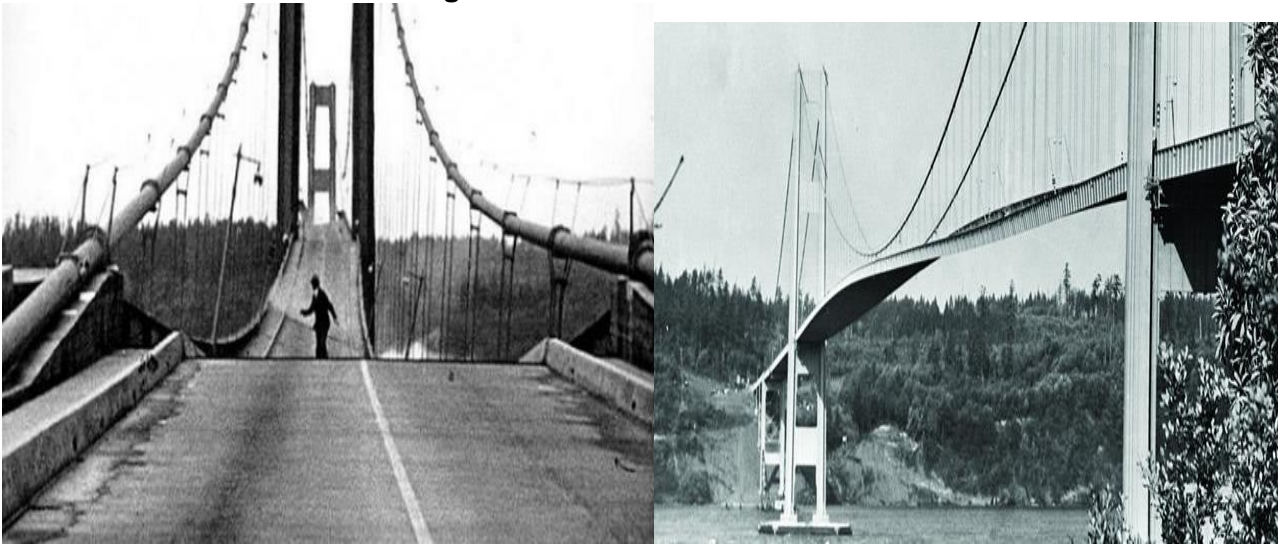
4.2 Vibrações em estruturas de concreto

A ponte de Tacoma do tipo pênsil, construída em 1940, localizada na cidade Washington, teve seu colapso no mesmo ano, e com isso ocorreu algumas hipóteses sobre

Análise computacional dinâmica dos modos de vibrações em vigas de concreto.

o acidente, como: Devido a sua geometria, segundo Figueiredo (2016), a ponte teria vigas sólidas, que não permitia a passagem de ventos e com isso era forçada para suportar a força de arrasto das rajadas de vento. Outra teoria acredita-se que os grandes movimentos foram causados devido ao fenômeno de ressonância, mas essa teoria foi descartada e o colapso foi causado pelo fenômeno de flutter aero elástico. A Figura 1 apresenta a ponte sofrendo o colapso.

Figura 1- Ponte Tacoma Narrows.



Fonte – Site AEC web.

A ponte de Erasmus do tipo estaiada, localizada na cidade Roterdã, não sofreu colapso, mas teve vibrações excessivas devido à passagem de bondes elétricos e a combinação do vento. A Figura 2 retrata a ponte Erasmus atualmente.

Figura 2-Ponte Erasmus Bridge.



Fonte – Site Mega engenharia, 2012.

4.3 . Método dos Elementos Finitos (MEF)

Por sua alta aptidão em moldar diversos tipos de materiais e situações que sejam lineares e não lineares, dinâmica e estática, o Método dos Elementos Finitos (MEF), tornou-se de grande importância para solucionar problemas com diversos números de variáveis e sistemas, apresentando resultados satisfatórios em problemas da engenharia (CHANDRUPATLA e BELEGUNDU, 2014).

Atualmente com estudos e o avanço da tecnologia, é possível modelar problemas complexos, entretanto, é preciso conhecer alguns conceitos aplicáveis ao método, na qual analisa regiões complexas transformando formas geométricas diretas, chamadas de elementos finitos (CHANDRUPATLA e BELEGUNDU, 2014).

4.4 . Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118/2014.

A análise em vibrações é realizada para assegurar a estrutura diante ao seu comportamento de regime linear. Para assegurar que uma estrutura possa estar estável e não apresente instabilidade para seus usuários, o elemento estrutural deve apresentar a sua frequência própria da estrutura maior que 1,2 vezes a frequência crítica.

As ações dinâmicas cíclicas que originam as vibrações em estruturas, pode ser alterados os seus fatores, como: aumento do seu perfil de amortecimento, ações dinâmicas e frequência natural (massa em vibração e alteração da sua rigidez estrutural).

Em alguns casos específicos na qual as prescrições anteriores não são atendidas e na falta de valores determinados experimentais, adota-se os valores dados pelo Quadro 2 para a frequência crítica.

Quadro 2 - Frequência crítica para vibrações verticais para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas.

| Caso | f_{crit} Hz |
|--------------------------------------------------|------------------|
| Ginásio de esportes e academias de ginástica | 8,0 |
| Salas de dança ou de concerto sem cadeiras fixas | 7,0 |
| Passarelas de pedestres ou ciclistas | 4,5 |
| Escritórios | 4,0 |
| Salas de concerto com cadeiras fixas | 3,5 |

Fonte: ABNT/NBR 6118, (2014).

5. METODOLOGIA

5.1 Viga Metálica

Para a criação de uma metodologia numérica de análise de vibração para elementos estruturais por meio do software ABAQUS®, através de pesquisas na literatura, encontrou-se informações e critérios necessários para modelagem e por meio de trabalhos desenvolvidos com softwares semelhantes disponíveis no mercado, foi possível chegar em um roteiro numérico de implementação de elementos estruturais submetidos a ação dinâmica de vibrações eficiente.

Para validar a metodologia de análise com os resultados encontrados no ABAQUS® utilizou-se uma viga metálica de engaste livre desenvolvida numericamente por Menão (2014). Para a análise foram adotadas as características físicas e geométricas descritas por Menão (2014) que utilizou-se para submetê-la no software CREO® conforme o Quadro 3:

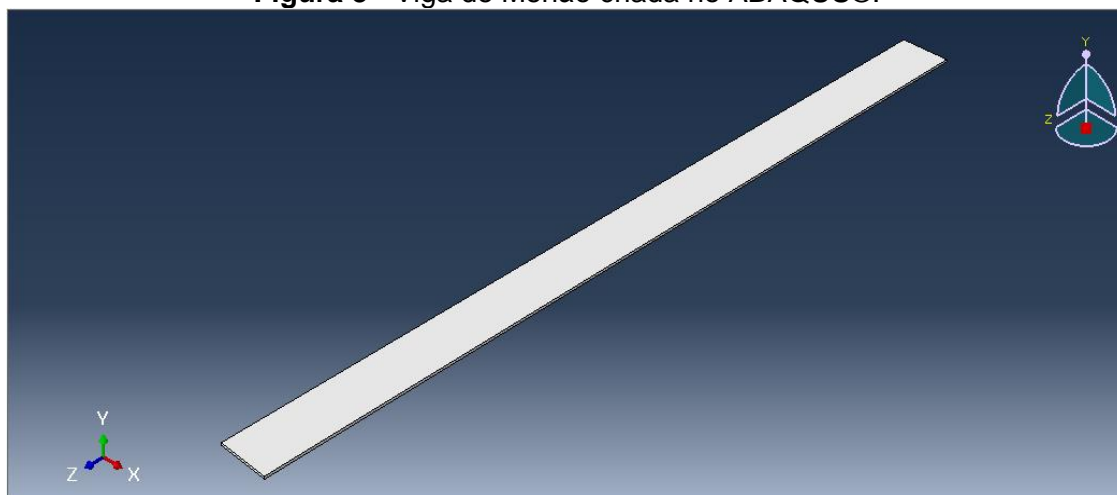
Quadro 3 – Características físicas e geométricas da viga de Menão.

| Seção transversal | |
|-----------------------------------------|--------------------------|
| Tipo | Retangular |
| Espessura (e) | 0,00121m |
| Largura | 0,024m |
| Massa da viga | 0,08866m |
| Área da seção transversal | 0,00002905m ² |
| Momento de inércia da seção transversal | 3,543e-12m ⁴ |
| Material | |
| Descrição | Aço NBR 6655 LN 28 |
| Densidade | 7850 kg/m ³ |
| Módulo de elasticidade | 210 GPa |
| Viga | |
| Comprimento livre (L) | 0,38m |

Fonte: Menão adaptado, (2014).

A Figura 3 mostra a viga de Menão que foi desenvolvida no software ABAQUS®.

Figura 3 - Viga de Menão criada no ABAQUS®.



Fonte: Autor, (2019).

Para analisar as frequências naturais de uma viga de concreto, o elemento estrutural foi submetido a alguns parâmetros e analisados a qual se aproximava a frequência crítica estabelecida pela NBR 6118/2014. A Norma certifica que a frequência da estrutura será 1,2 vezes maior que a frequência crítica, na qual depende da edificação, porém, quando não há valores determinados experimentais para a frequência crítica, a norma estabelece dados para vibrações em estruturas causadas por pessoas, mostradas no Quadro 2.

5.2 Viga de Concreto

A viga de concreto com características geométricas e físicas foi efetuada computacionalmente de forma tridimensional no ABAQUS®, o Quadro 4 refere-se as características da viga de concreto.

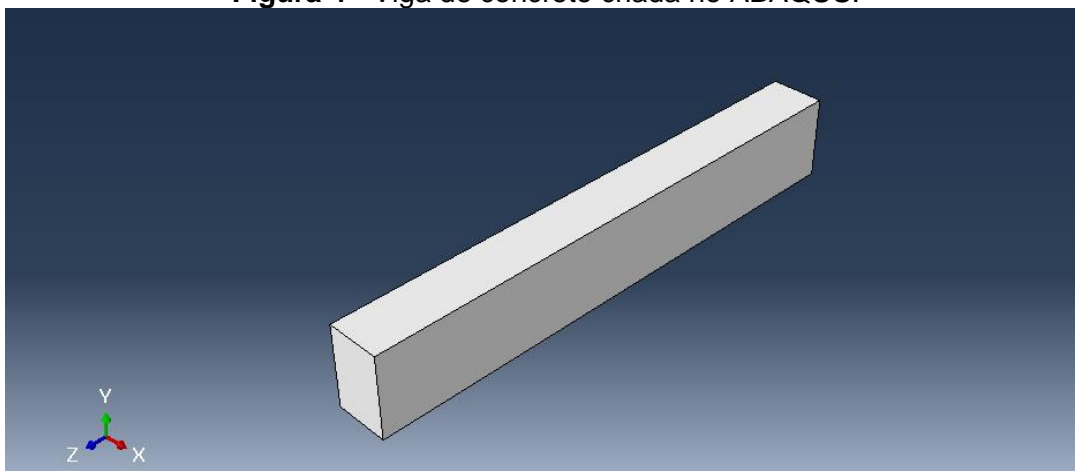
Quadro 4 – Características físicas e geométricas para a viga de concreto.

| Seção transversal | |
|---------------------------|------------------------|
| Tipo | Retangular |
| Espessura (e) | 0,30 m |
| Largura | 0,20 m |
| Coefficiente de poisson | 0,2 |
| Área da seção transversal | 0,06 m ² |
| Material | |
| Descrição | Concreto |
| Densidade | 2400 kg/m ³ |
| Módulo de elasticidade | 30 GPa |
| Viga | |
| Comprimento livre (L) | 3,00 m |

Fonte: Autor, (2019).

A Figura 4 mostra como a viga de concreto foi desenvolvida tridimensionalmente no software ABAQUS®.

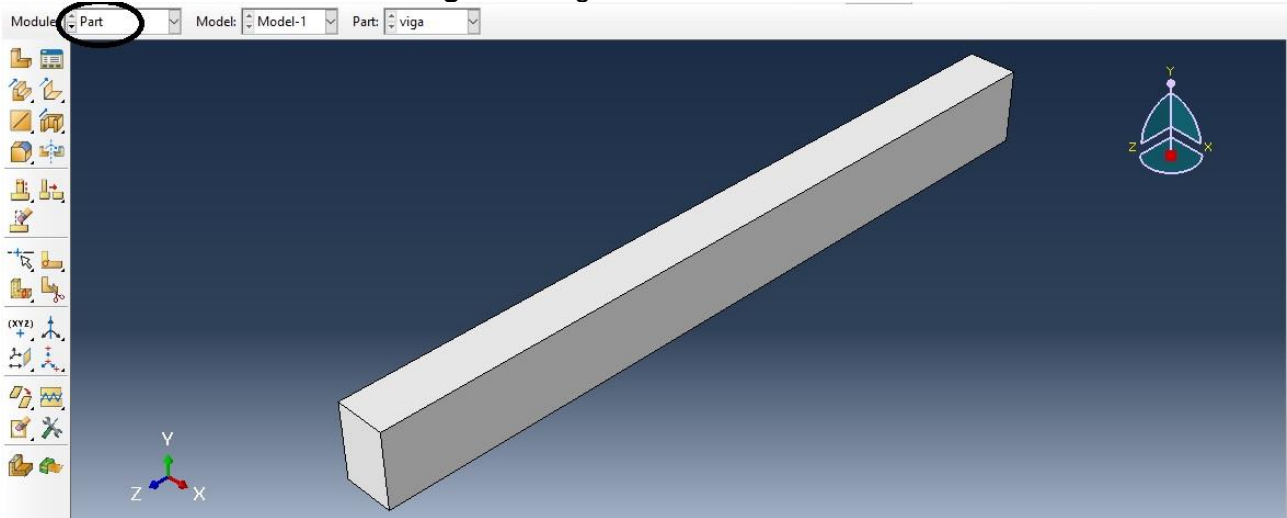
Figura 4 - Viga de concreto criada no ABAQUS.



Fonte: Autor, (2019).

Para a modelagem da viga de concreto no ABAQUS® foram efetuadas as seguintes etapas:

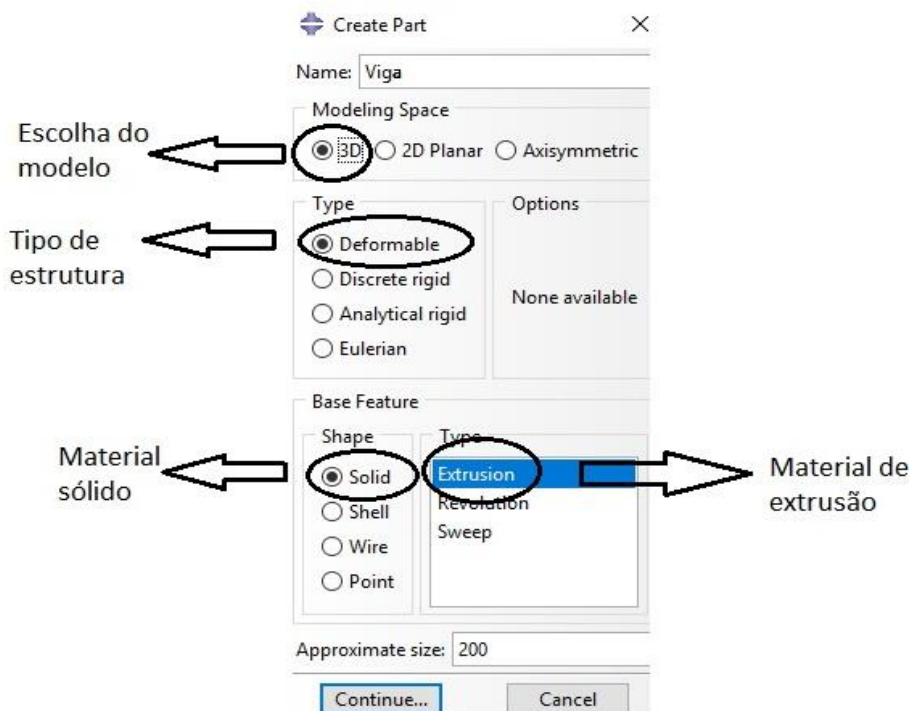
Figura 5- Viga de concreto em 3D.



Fonte: Autor, (2019).

- 1) Em *Part* cria-se a estrutura em 3D, deformável de extrusão do tipo sólida.

Figura 6 – Escolha dos parâmetros para a estrutura.

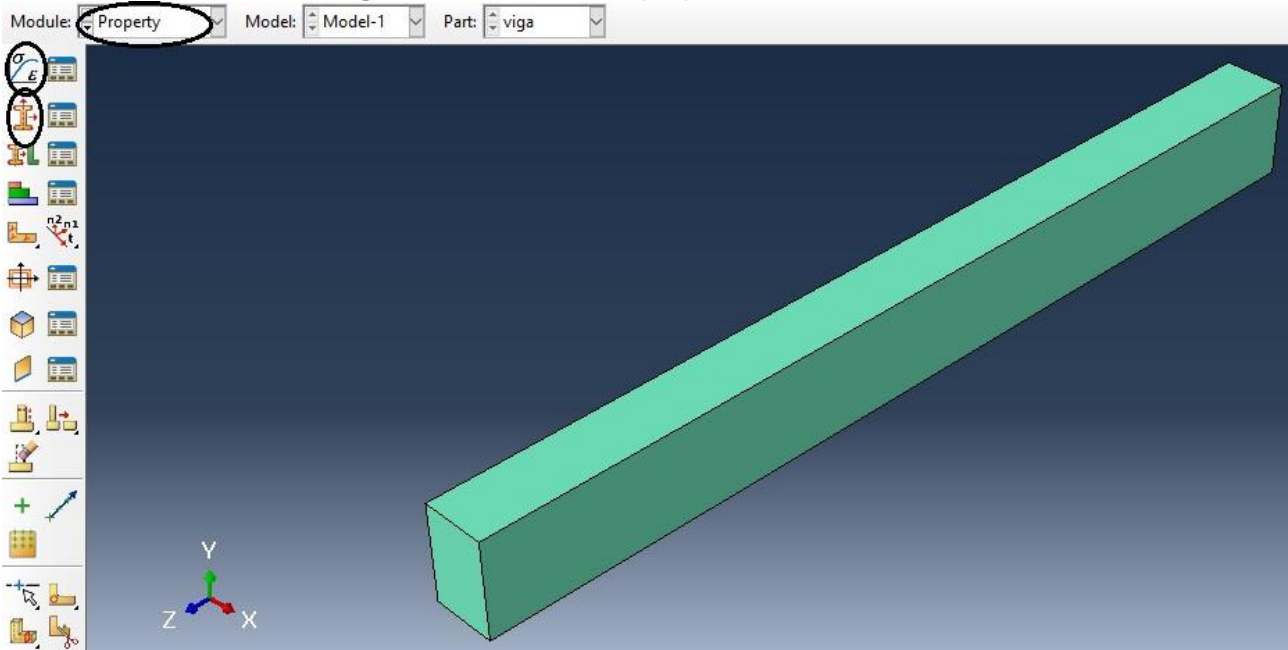


Fonte: Autor, (2019).

Análise computacional dinâmica dos modos de vibrações em vigas de concreto.

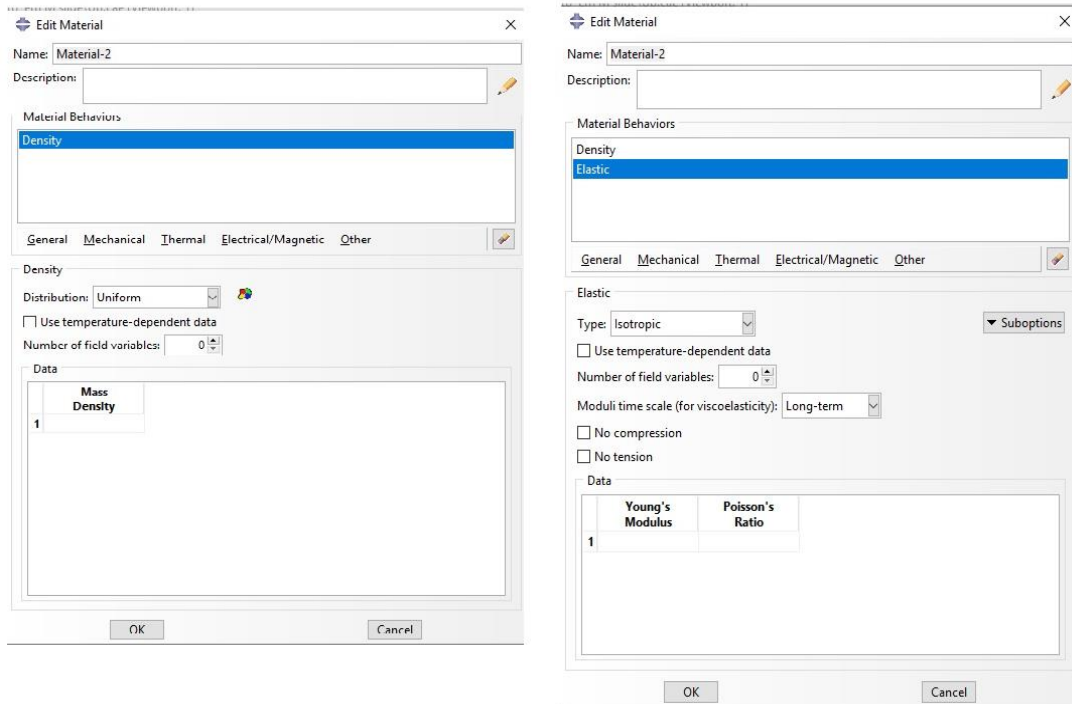
2) Em *property* adiciona-se as propriedades do material utilizado, como: Densidade, Módulo de Elasticidade e coeficiente de *Poisson*.

Figura 7 – Interface da propriedade do material.



Fonte: Autor, (2019).

Figura 8- Propriedades do material.

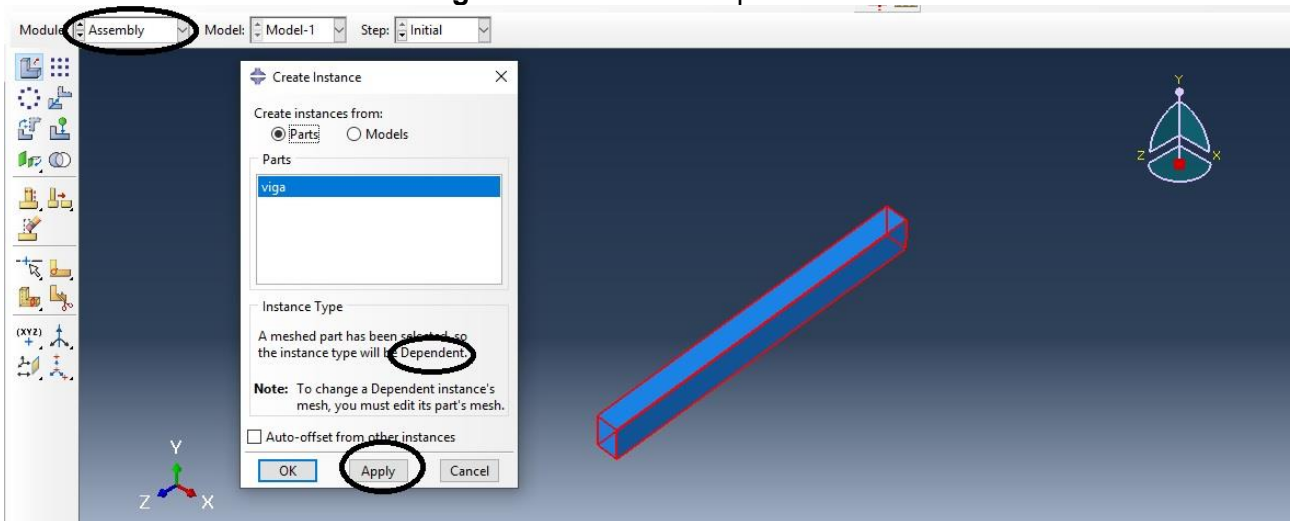


Fonte: Autor, (2019).

Análise computacional dinâmica dos modos de vibrações em vigas de concreto.

- 3) Em *Assembly* altere o elemento para dependente, selecione a estrutura e aplique *apply* e por fim *ok*.

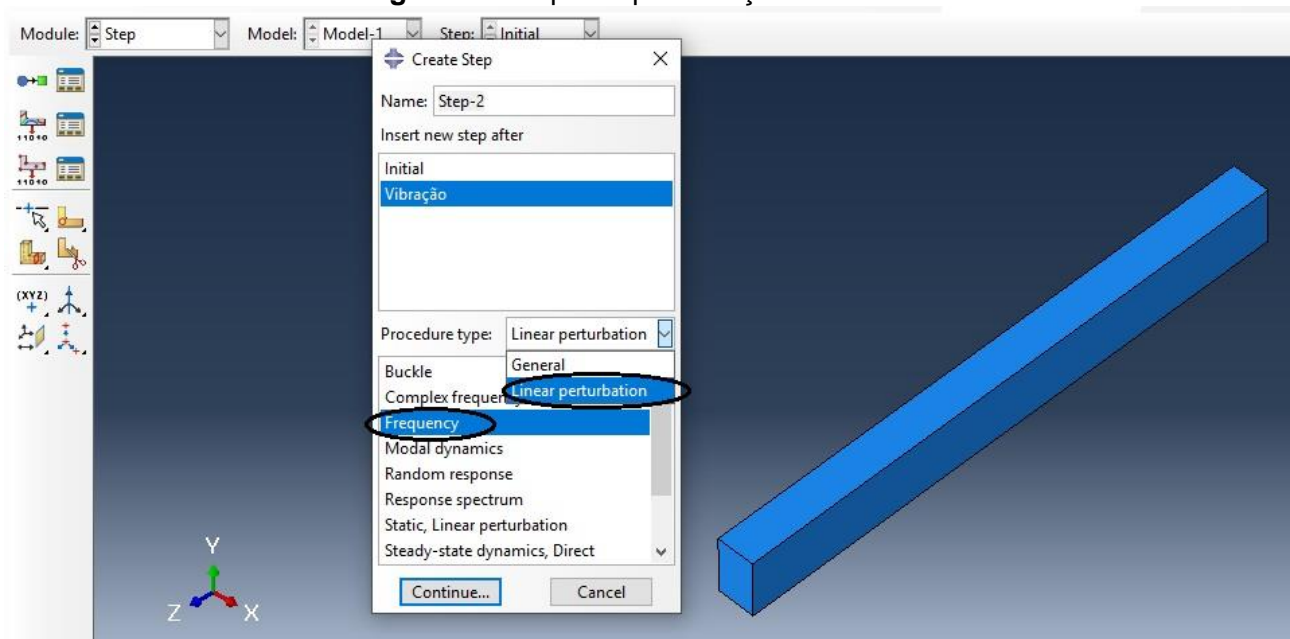
Figura 9 – Elemento dependente.



Fonte: Autor, (2019).

- 4) Em step conduza a análise do tipo *linear perturbation* e após selecione *Frequency*. Em *Edit Field Output Request* informe o modelo da análise.

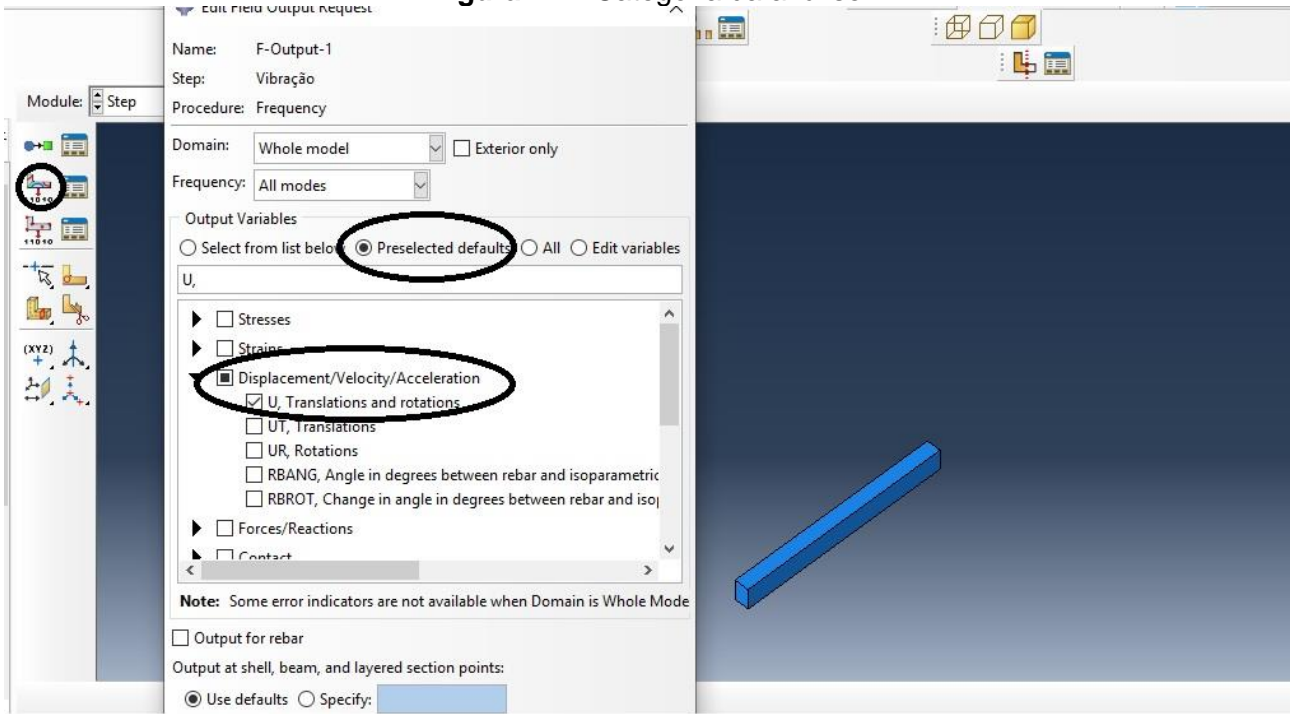
Figura 10 – Tipo da perturbação analisada.



Fonte: Autor, (2019).

Análise computacional dinâmica dos modos de vibrações em vigas de concreto.

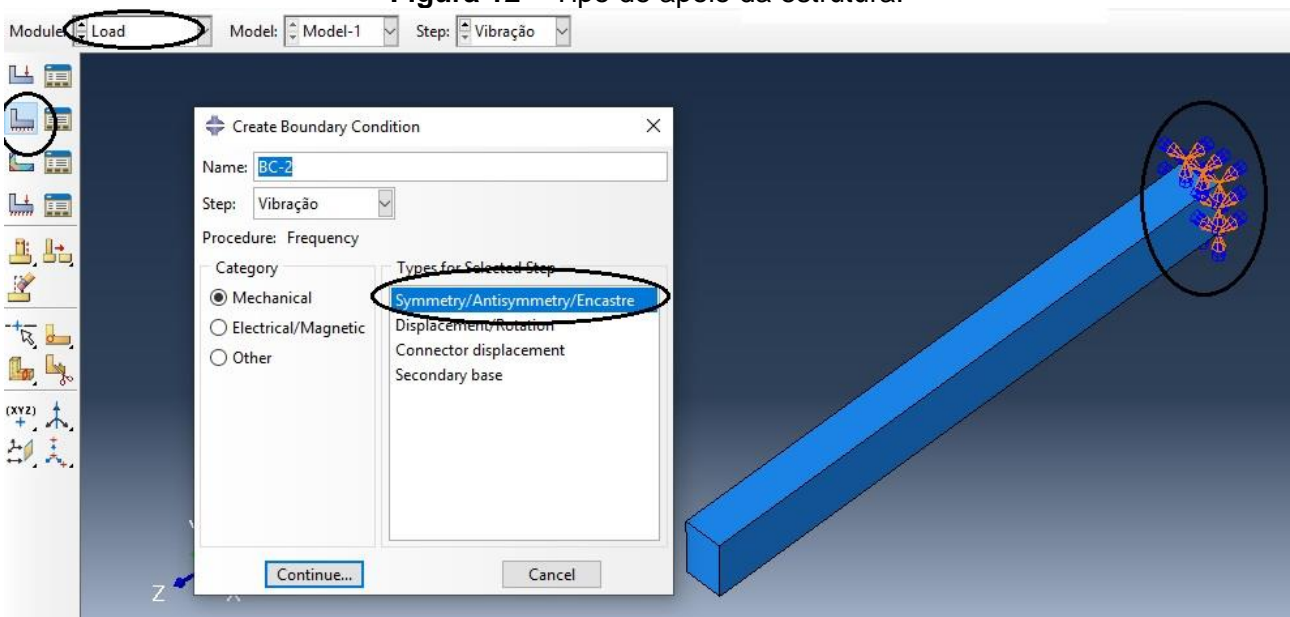
Figura 11 – Categoria da análise



Fonte: Autor, (2019).

5) Em Load crie a condição de apoio do elemento

Figura 12 – Tipo de apoio da estrutura.

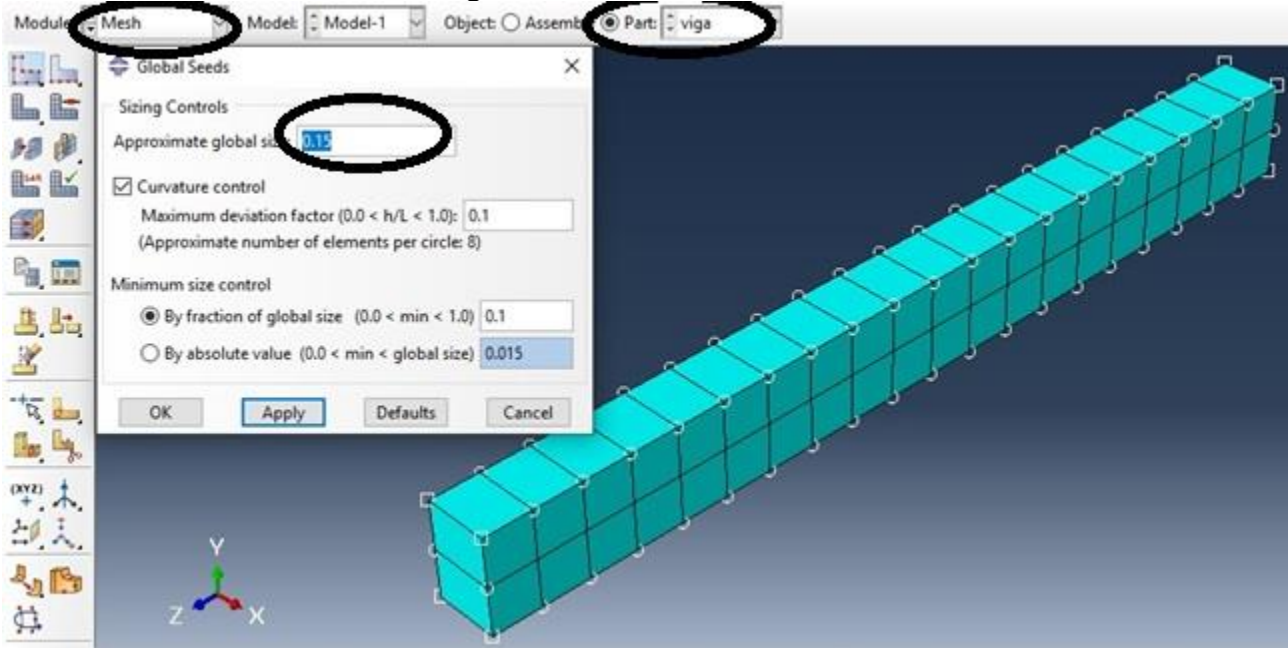


Fonte: Autor, (2019).

6) Em Mesh crie a malha na qual deseja-se trabalhar. Na opção *approximate global size* escolha o número de elementos finitos, e por fim aplique *Mesh Part* para que a estrutura proceda os cálculos.

Análise computacional dinâmica dos modos de vibrações em vigas de concreto.

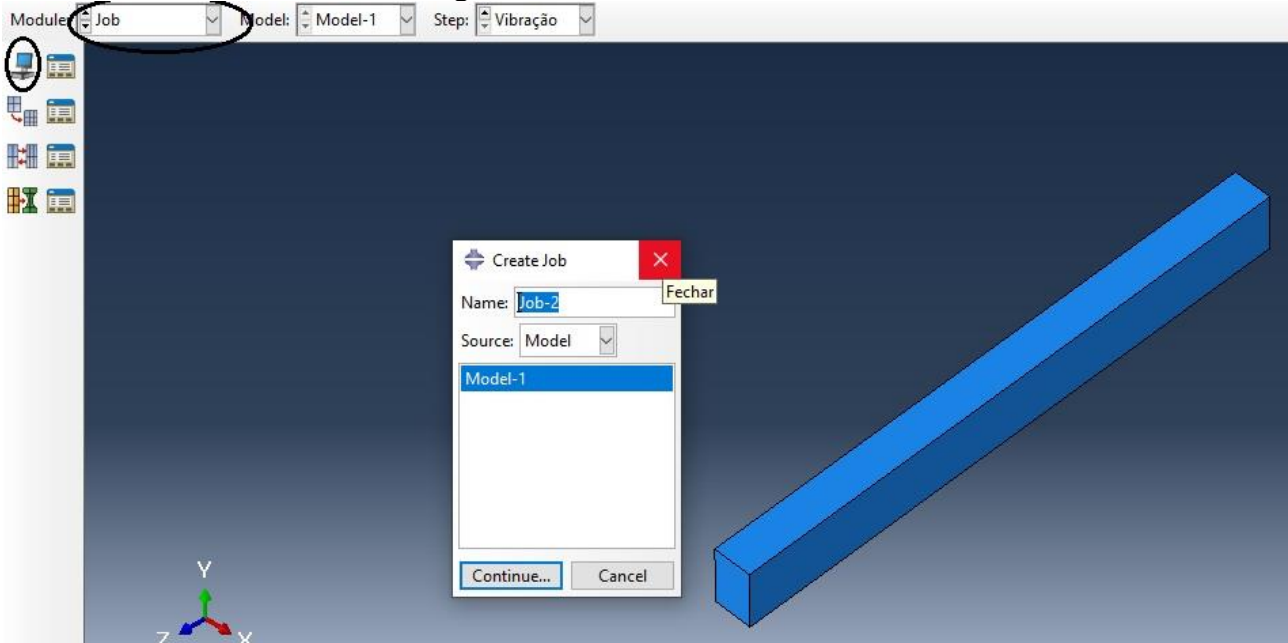
Figura 13– Malha do elemento.



Fonte: Autor, (2019).

7) Em seguida com todas as etapas inseridas, aplique *Job* e submeta a estrutura para que possa apresentar os resultados.

Figura 14 – Análise dos cálculos.



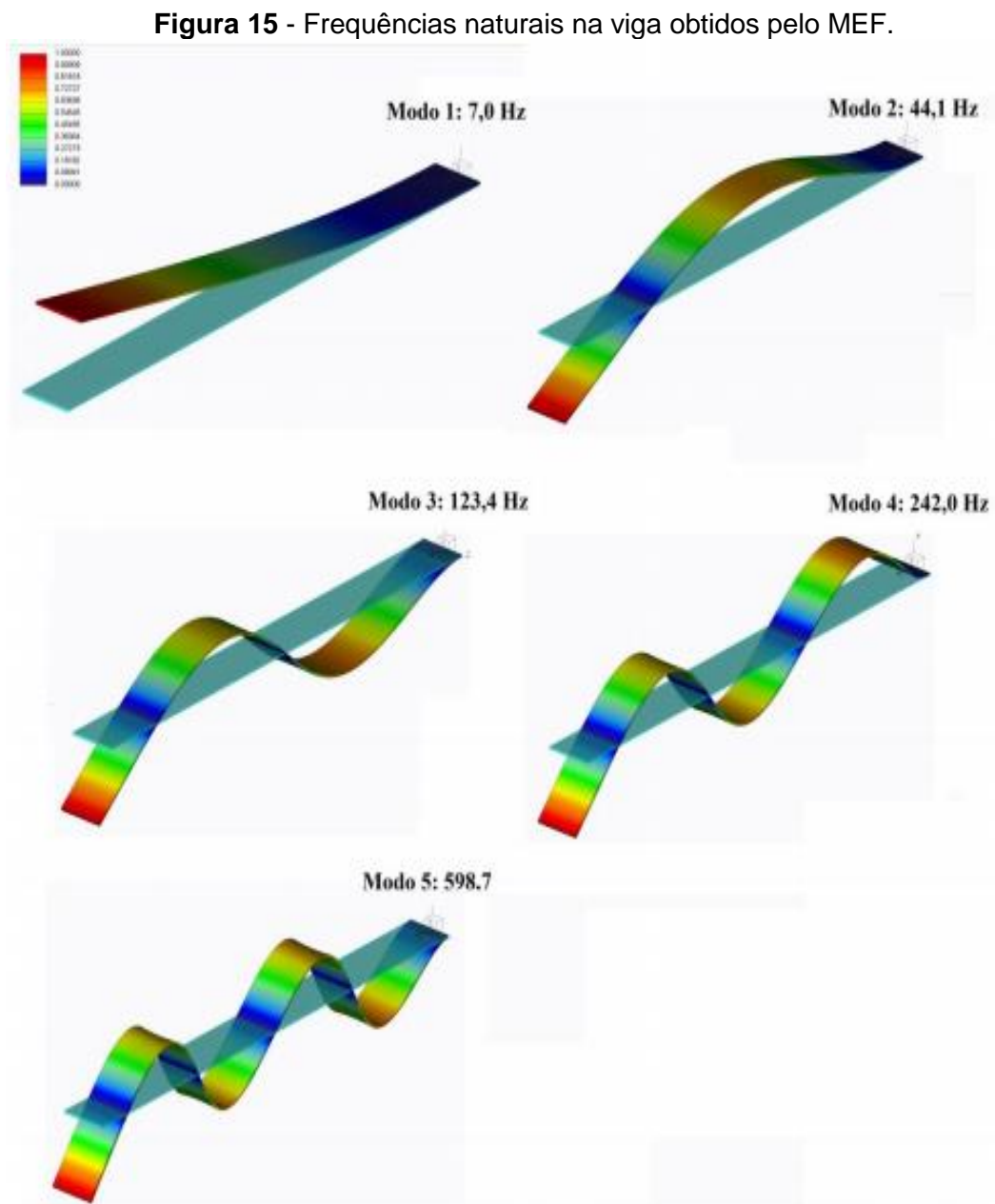
Fonte: Autor, (2019).

Realizadas as simulações os resultados foram discutidos e analisados comparando com os parâmetros da norma NBR 6118/2014 a fim de mostrar o modo de vibração e a frequência natural da viga.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

5.1. Viga Metálica

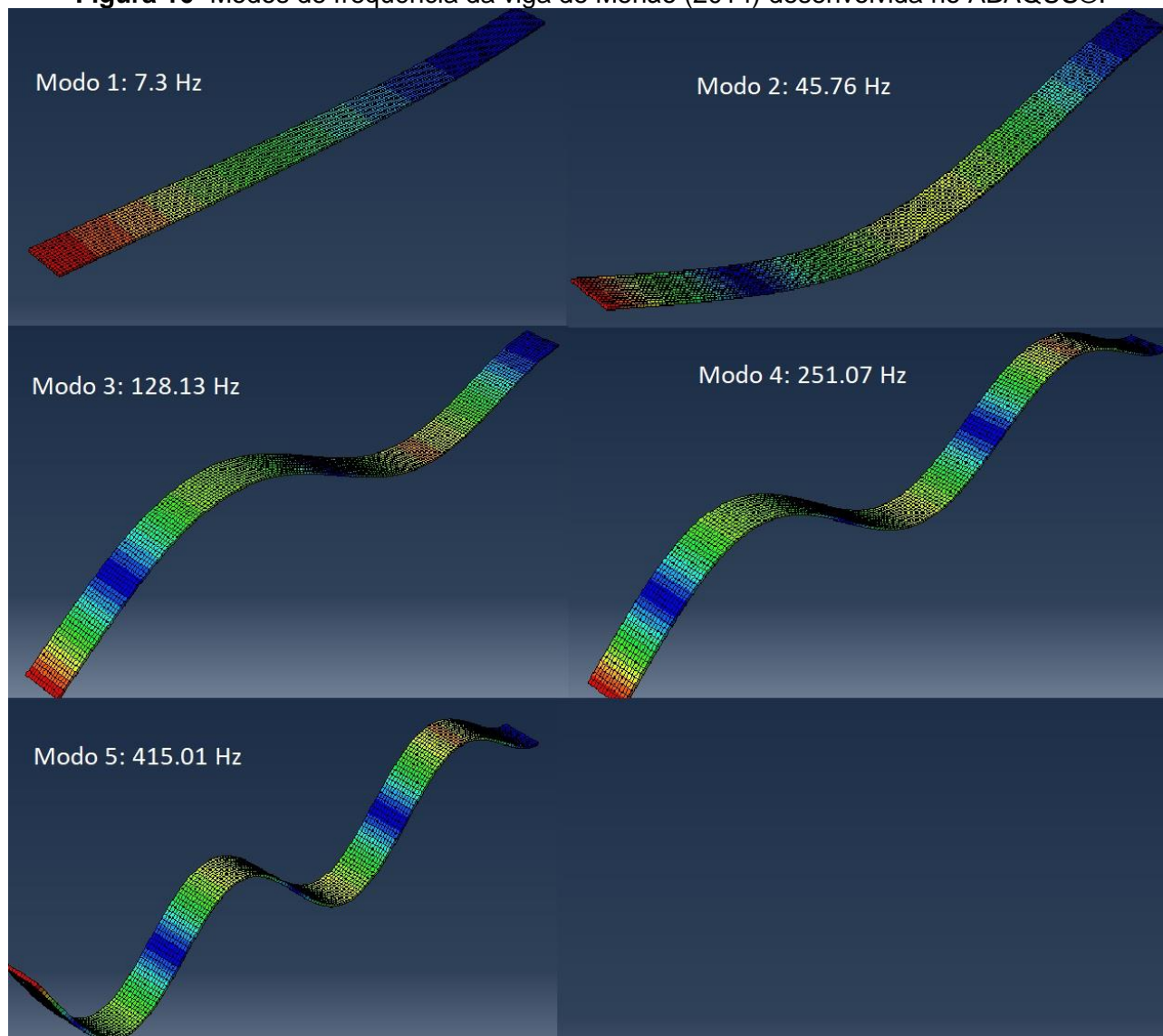
A Figura 15 mostra o comportamento da viga submetida no software CREO® realizada por Menão (2014).



Fonte: Menão, (2014).

A Figura 16 mostra as frequências e o modos de vibrações que foram encontrados nesta simulação.

Figura 16- Modos de frequência da viga de Menão (2014) desenvolvida no ABAQUS®.



Fonte: Autor, (2019).

Pode-se fazer um comparativo entre as figuras de ambos os programas que obtiveram resultados próximos. O Quadro 5 apresenta a frequência e a porcentagem de diferença do ABAQUS® e o CREO® entre parênteses.

Quadro 5 – Frequências naturais encontradas em ambos os softwares.

| Frequências naturais. | Fn (Hz) MEF de Menão (2014). | Fn (Hz) MEF ABAQUS®. |
|-----------------------|------------------------------|----------------------|
| Frequência 1 | 7,00 | 7,30 (4.3%) |
| Frequência 2 | 44,1 | 45,76 (3.8%) |
| Frequência 3 | 123,4 | 128,13 (3.8%) |
| Frequência 4 | 242,0 | 251,07 (3.8%) |
| Frequência 5 | 400,4 | 415,01 (3.8%) |

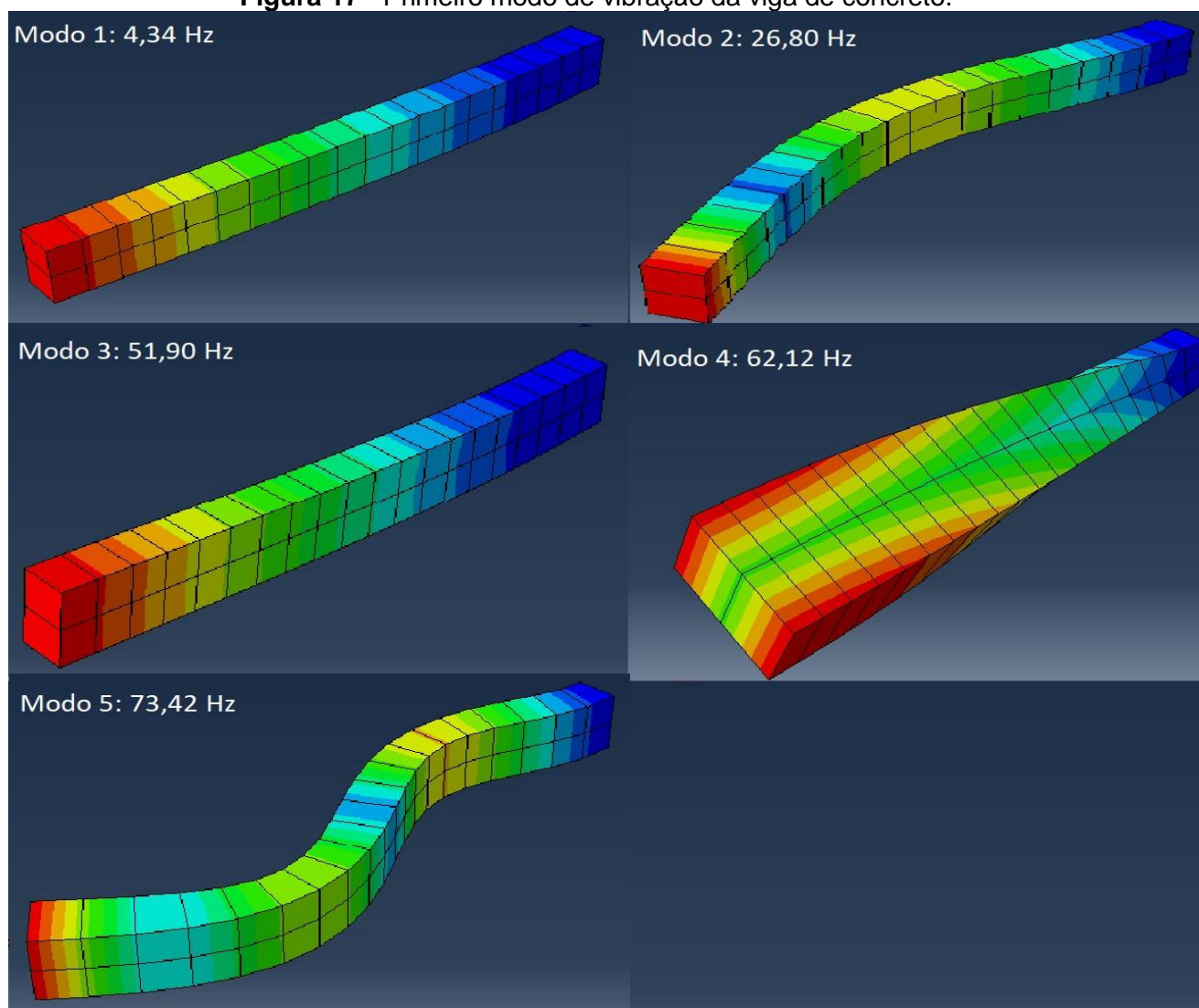
Fonte: Autor, (2019).

No Quadro 5 é possível observar os resultados do ABAQUS®, que apresentou uma pequena diferença de porcentagem em seus resultados, considerado insignificante, tanto para seu modo de vibração, quanto para sua frequência.

5.3 Viga de Concreto

Os resultados do ensaio numérico da viga de concreto com o apoio de engaste-livre, submetido no software ABAQUS®, estão apresentados na Figura 17, exibindo seu modo de vibração.

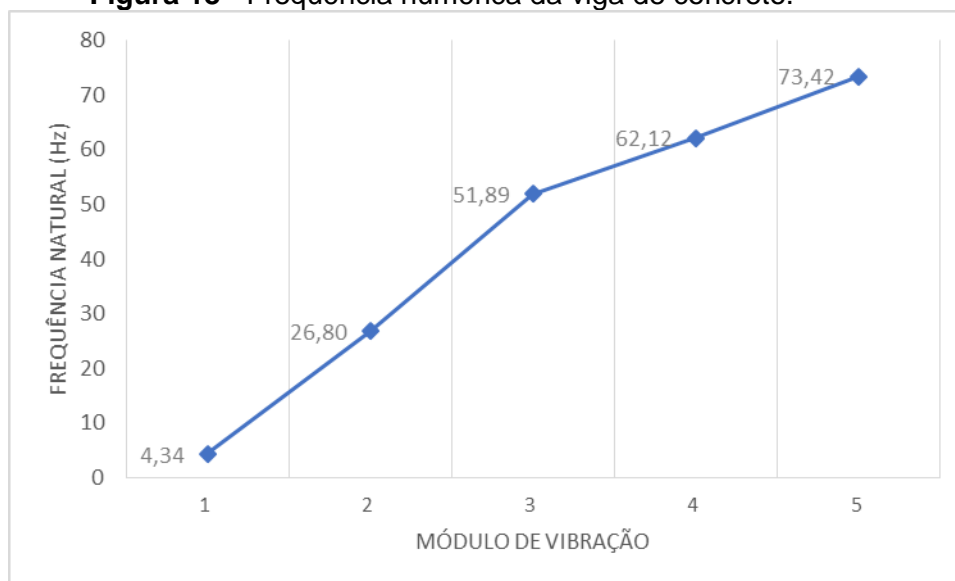
Figura 17 - Primeiro modo de vibração da viga de concreto.



Fonte: Autor, (2019).

Os valores do modo de vibração foram plotados em um gráfico para mostrar o comportamento natural da estrutura, em que a ordenada é a frequência e a abscissa é o modo de vibração na Figura 18.

Figura 18 - Frequência numérica da viga de concreto.



Fonte: Autor, (2019).

Observando os dados da simulação na viga de concreto, foi possível verificar que o primeiro modo de vibração não está de acordo com a NBR 6118/2014, para a viga manter-se estável a mesma deve apresentar os requisitos do Quadro 2 para ter uma estabilidade e segurança aos seus usuários, ou seja, a NBR 6118/2014 estabelece que, a frequência crítica provocada por pessoas nas estruturas alterne entre 3,5 Hz à 8 Hz, com os 20% de proporção, sendo assim, o primeiro modo de vibração de 4,34 Hz da viga de concreto não se encaixa nesses requisitos.

6. CONCLUSÃO

Após analisar os dados e resultados, conclui-se que a modelagem no software ABAQUS® comparando com a mesma situação aplicada no software CREO® tiveram resultados satisfatórios, visto que apresentou uma diferença de aproximadamente 3,8% entre os valores, atestando que a modelagem adotada para análise dinâmica dos modos de vibração através do método dos elementos finitos foi confiável podendo ser aplicado para outros elementos estruturais com diferentes propriedades e materiais.

Assim, a partir da viga de concreto apresentada com uma condição de engaste-livre, tendo cinco modos de vibração, e, analisando os resultados encontrados, foi possível comparar e avaliar como o elemento estrutural se comporta a partir da frequência natural, realizando uma comparação com a NBR 6118/2014 de modo a verificar se as condições de segurança são atendidas. A modelagem estrutural mostrou que o primeiro modo de vibração da viga apresentou um valor aproximado de 4,34 Hz e a NBR 6118/2014

estabelece que a frequência esteja em $2,9 \text{ Hz} > f_n$ ou $f_n > 9,6 \text{ Hz}$, ou seja, o primeiro modo de vibração está entre a frequência crítica provocada por pessoas podendo apresentar instabilidade e insegurança para os usuários.

Neste contexto para evitar acidentes futuros, deve ser feita algumas mudanças, como o aumento na seção transversal da viga, ou um acréscimo maior no número de malhas, para que possa estar entre os valores estabelecidos pela NBR 6118/2014.

Portanto, graças a simulação do software, situação como essa pode ser evitada, pois o ABAQUS® apresentou análise e resultados satisfatórios na modelagem em estruturas de concreto.

Para trabalhos futuros sugere-se aplicar a mesma metodologia em vigas de concreto armado, para verificar se a armadura proporciona diferença no seu modo de vibração e frequência.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por não ter me deixado desistir, e ter me dado forças para continuar no curso e conseguir concluir este trabalho.

Agradeço aos meus pais que sempre me apoiaram e fizeram de tudo para que eu pudesse ter tido uma estabilidade tanto financeira quanto emocional. Agradeço também aos meus irmãos, principalmente ao Eduardo que aguentou meu mau humor, choros e estresse durante os anos morando juntos, e aos meus primos Jean Luz e Marcos Luz.

Agradeço aos meus amigos, João Victor Barbosa Bianchi, Bruno Aparecido Moreira Gonçalves, João Gabriel da Silva Menezes, e, em especial, à Luana Ely Farias de Souza que esteve comigo durante todos esses anos de faculdade, foi o meu alicerce nos meus momentos de angústia e felicidade, e que me ajudou a concluir este artigo.

Agradeço também ao meu orientador Prof. Msc. Filipe Bittencourt Figueiredo, pela compreensão e não desistência em me ajudar, sabendo que se não fosse por sua ajuda eu não teria conseguido.

Por fim, agradeço a todos os professores do Curso de engenharia civil, por terem transmitido seus conhecimentos e terem participado do meu crescimento profissional.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118. **Projeto de estruturas de concreto – procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

AEC WEB. **Você se lembra da queda da ponte tacoma narrows**. Disponível em: <<http://blogaecweb.com.br/blog/voce-se-lembra-da-queda-da-ponte-tacoma-narrows/>> Acesso em: 01 Novembro 2019.

CALDAS, Rodrigo Barreto. **Análise numérica de estruturas de aço, concreto e mistas em situação de incêndio**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2008.

CHANDRUPATLA, Tirupathi R.; BELEGUNDU, Ashok D. **Elementos Finitos**. 4.ed. São Paulo, PEARSON, 2014.

FIGUEIREDO, Filipe Bittencourt. **Análise dinâmica da frequência natural de uma viga em concreto armado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, 2016.

MEGA ENGENHARIA, 2012. **Erasmus-bridge-roterda**. Disponível em:<
<https://megaengenharia.blogspot.com/2012/03/erasmus-bridge-roterda.html>> Acesso em:
01 Novembro 2019.

MENÃO, Mauro Cesar. **Controle ativo de vibrações em vigas utilizando controle de Edforward e Elemento espectrais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica) - Universidade Federal de Bauru, Bauru, SP, 2014.

SORIANO, Humberto Lima; LIMA, Silvio de Souza. **Análise de Estruturas: Método das forças e Método dos Deslocamentos**. Ciência Moderna. 2º Edição. Rio de Janeiro, 2006.

THOMSON, William T. **Teoria da vibração: com aplicações**. 2º ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1978.