



MODELAGEM E SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UMA ESTRUTURA TENSEGRITY 3D

Palavras-Chaves: Tensegrity, Método dos Elementos Finitos, Análise Modal.

Autores:

VITOR ORSOLI VIEIRA SOARES, FCA - UNICAMP
Prof. Dr. JAIME HIDEO IZUKA (Orientador), FCA - UNICAMP

1. INTRODUÇÃO

O Tensegrity é um sistema que vem ganhando destaque nos estudos de várias áreas, como Arte, Arquitetura, Biologia e Engenharia (FULLER, 1975). Um dos primeiros estudiosos, Buckminster Fuller, definiu o conceito de “Tensegrity” como a junção de “tensão” e “integridade” (SKELTON, 2009).

Este sistema mantém o equilíbrio e estabilidade, além de ter a capacidade de sofrer perturbações externas e voltar ao seu estado original. Isto é possível pela junção de corpos rígidos que sofrem compressão que são conectados por cordas que são tracionados (Skelton, 2009), sendo influenciadas pelas propriedades de resistência do material, mais especificamente a capacidade de tracionamento e da elasticidade (Matan et al,1997; Lee et al.; 2020) . Tendo a Figura 1 como um exemplo simples desse tipo de estrutura, composta de 3 barras e 9 cabos que seguem as configurações descritas anteriormente.

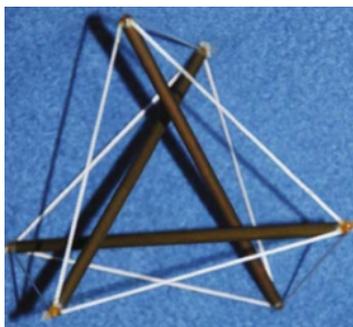


Figura 1 - Estrutura Tensegrity - Fonte: Skelton, 2009.

Já passando por exemplos de engenharia complexos e utilizados na realidade, temos a ponte de Kurilpa na Austrália (Figura 2), na qual é formada de vários elementos fundamentais do conceito abordado que como consequência é possível aguentar o peso de vários carros em movimento e tenha estabilidade.



Figura 2 - Ponte Kurilpa, Austrália -

Fonte: <https://www.ansys.com/blog/design-floating-structures-tensegrity>

Em projetos de estruturas Tensegrity é importante realizar análises estruturais para determinar tanto o formato da configuração quanto às frequências naturais. Esta etapa é fundamental para a posterior construção de um protótipo físico e consequentemente fazer análises experimentais.

As frequências naturais podem ser definidas como a taxa de oscilação livre da estrutura, ou o quanto a estrutura vibra quando não há força aplicada sobre ela. Uma estrutura possui diversas frequências naturais agindo em diversas direções, sendo que cada uma delas tem um modo de vibrar diferente, o modo de vibrar pode ser exemplificado como a forma que a estrutura vibra. Porém dentre todas as frequências naturais adquiridas pela análise modal, a mais importante é a primeira, também chamada de frequência natural fundamental e também a menor dentre todas, sendo que ela é a mais influenciadora ao movimento oscilatório, tornando as outras insignificantes em comparação a fundamental (Bolina, 2015).

2. METODOLOGIA

Com a finalidade de determinar as frequências fundamentais de uma estrutura Tensegrity, optou-se por realizar o cálculo por meio de um método numérico em um ambiente virtual do Scilab juntamente com o método dos elementos finitos (MEF) realizado pelo software computacional *Ansys Mechanical APDL* para validar o resultado encontrado no primeiro método. Para iniciar o processo utilizou-se um protótipo já modelado por Victor Paiva (2018) para servir de auxílio no desenvolvimento da pesquisa, pois nas duas metodologias é preciso especificar os números de elementos, propriedades de tais (Tabela 1) e as coordenadas de cada nó (Tabela 2). Os corpos rígidos foram feitas de plástico ABS construídas no software de modelagem Fusion 360 e impressa na impressora 3D e interligadas por borracha com ganchos, assim adquirindo estabilidade e elasticidade.

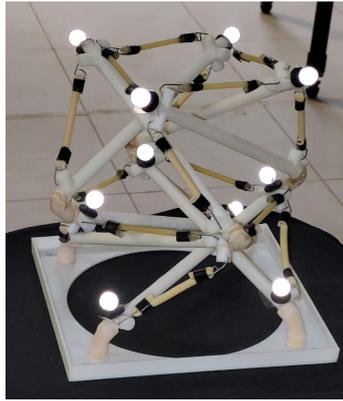


Figura 3 - Protótipo Tensegrity - Fonte: Paiva, 2019.

Propriedades da estrutura - Propriedade x Elemento		
	Barra	Cabo
Material	Plástico ABS	Borracha
Densidade [kg/m ³]	1060	930
Área [m ²]	7,8e-5	7,065e-6
Módulo de Young [Pa]	2,2e9	3e6
Número de elementos	24	
Número de nós	12	

Tabela 1 - Propriedades da estrutura.

O primeiro método, como dito antes, utiliza um ambiente virtual com a linguagem do software *Scilab* e foi necessário a criação de uma série de etapas nas quais o computador deverá seguir. Para isso é necessário a entrada de algumas variáveis, sendo elas as coordenadas dos nós, a conectividade entre elas e que elemento elas formam, propriedades mecânicas dos materiais já expostas na tabela 1 e por último a pretensão que os elementos irão sofrer. Posteriormente o programa desenvolvido seguirá algumas etapas para encontrar as frequências naturais, para isso seguirá os conceitos de Bang e Kwon (2000), onde demonstram os conceitos básicos da análise modal, sendo assim necessário o cálculo da matriz de rigidez local e matriz de massa local de cada elemento e auxiliada pela matriz transformada será possível encontrar a matriz de rigidez global e matriz de massa global e por fim foi possível a chegada de valores das frequências naturais do sistema.

Já o segundo método por ser feito em um software ele já é pré programado para rodar uma análise modal, então somente devemos inserir as variáveis igualmente no método anterior e escolher o tipo de análise. Tendo em vista que o software utiliza o MEF, se trata de um método que faz cálculos analíticos em vários elementos divididos por uma malha, porém foi escolhido que cada barra e cabo será um elemento para ser compatível com o outro método e ter um processamento computacional mais rápido. Por fim, será plotado o resultado final que ele o *Ansys Mechanical APDL* calculou e comparou-se o que foi obtido nos dois métodos .

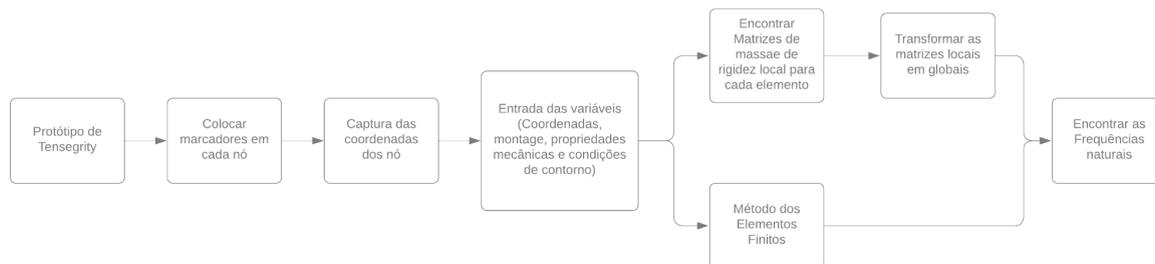


Figura 4 - Fluxograma da metodologia utilizada

3. Resultados

Com o auxílio dos marcadores foi possível encontrar as coordenadas de cada nó. Foi escolhido um dos nós da base como a origem e as outras tiveram coordenadas obtidas em relação a essa primeira.

Coordenada dos nós - Plano cartesiano x Nó												
Nó	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X[cm]	0	0	12	12	-1	8	13	4	0	13	10	-3
Y[cm]	0	12	0	12	7	13	4	1	13	9	-1	1
Z[cm]	0	0	0	0	6	6	6	6	16	16	16	16

Tabela 2 - Coordenada dos nós.

Seguindo a metodologia apresentada foi possível encontrar resultados satisfatórios com uma leve discrepância entre os valores obtidos, essas informações estão expostas na tabela a seguir para melhor comparação. Foram feitos testes até o sexto modo de vibrar, pois o primeiro modo, também chamado de frequência natural fundamental, é o mais importante e os outros cinco servem a fim de comparação.

Frequência Natural - Modo de Vibrar x Metodologia			
	Scilab [Hz]	Ansys Mechanical APDL [Hz]	Erro
Modo 1	0,2156	0,2149	0,323%
Modo 2	3,8954	3,8828	0,324%
Modo 3	5,2127	5,1959	0,323%
Modo 4	5,5984	5,5807	0,317%
Modo 5	6,8582	6,8359	0,325%
Modo 6	16,6610	16,6050	0,336%

Tabela 3 - Resultados da Frequência Natural.

Os resultados apresentados na tabela 3 acima consideraram uma abordagem sem pretensão com o intuito de validar o código implementado. Para o modelo final, será implementado esse requisito e novamente será comparado/validado aos resultados do software comercial

4. Conclusão

O protótipo de tensegrity foi construído através de barras impressas em material polimérico (ABS) e cabos de borracha, alcançando assim uma estrutura que apresenta estabilidade e flexibilidade. Este protótipo é utilizado como base para definir os modelos numéricos baseados em MEF. Foram definidos dois modelos, um utilizando a programação scilab e outro, um software comercial.

Os resultados numéricos obtidos através do programa próprio e comercial foram comparados, resultando em uma boa aproximação.

5. Bibliografia

BANG, H.; KWON, Y. W. **The finite element method using MATLAB**. Second Edition. Índia: Taylor & Francis, 2000.

BOLINA, C.C.; PALECHOR, E. U. L.; VÁSQUEZ, M. P. R.; Vibrações: As frequências naturais estimada e experimental de uma estrutura . **Anais do Congresso Nacional de Matemática Aplicada à Indústria**, v.1, n.1, p. 186-194. São Paulo: Blucher, 2015.

FULLER, R.B.; APPLEWHITE, E.J.. **Synergetics: Explorations in the Geometry of Thinking**. Macmillan, 1975.

LEE, H.; JANG, Y.; CHOE, J.; LEE, S.; SONG, H.; LEE, J.; LONE, N.; KIM, J. 3D-printed programmable tensegrity for soft robotics. **Science Robotics**, v. 5, n. 45, 2020.

MATAN, Ofer J.; NOURBAKHS, Illah R. **Deformable and elastic tensile-integrity structure**. U.S. Patent n. 5,688,604, 18 nov. 1997.

NASCIMENTO, L. A. **Análises estática e modal em treliças plana e espacial através do método dos elementos finitos**. Mato Grosso do Sul: Universidade Federal da Grande Dourados, 2018.

PAIVA, V.; KURKA, P.; IZUKA, J. Kinematics and dynamics of a tensegrity structure in expansion. **31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences**. 2018.

SKELTON, R.; DE OLIVEIRA, M. **Tensegrity Systems**. 1ª edição. Nova York: Springer, 2009.