



PROGRAMA PARA SOLUÇÃO ESTÁTICA E DINÂMICA DE PÓRTICO TRIDIMENSIONAL

Jean Baptiste Joseph

Paulo Marcelo Vieira Ribeiro

jbluxe40@yahoo.fr

paulo.vribeiro@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Centro de Tecnologia e Geociências

Departamento de Engenharia Civil

Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n, 50740-530, Pernambuco, Recife, Brasil

Abstract. The evolution of technology brings to prospects engineers to carry out projects increasingly complex and subject to detailed analysis of the variables involved. Some examples arise: building platforms "offshore", aerospace and nuclear projects where security is vital. In the case of civil engineering, special problems occur with the construction of bridges, dams and tall buildings in cities with dynamic actions of considerable nature such as winds, earthquakes, impacts and explosions.

Considering the aspects mentioned above this work consists of a computer code based on the Finite Element Method, named EZTOOL with GUI and EZMOBI portability Figure 1 (b), able to perform static analysis, modal and dynamic frame structures. The routines were implemented in MATLAB and OCTAVE, with the preprocessing performed both on its own interface as the GID developed at the Polytechnic University of Catalonia. The code has a version which can be used for Mobile platform. The results obtained are satisfactory. The developed tool shows reliable results and the graphical interface achieved its objectives.

1 INTRODUÇÃO

A evolução da tecnologia traz aos engenheiros perspectivas para a realização de projetos cada vez mais complexos e sujeitos a análises detalhadas das variáveis envolvidas. Alguns exemplos surgem com: construção de plataformas "offshore", projetos aeroespaciais e

nucleares, nos quais a segurança é vital. No caso específico da engenharia civil, problemas especiais ocorrem com a construção de pontes, barragens e de edifícios altos em locais que possuem ações dinâmicas de natureza considerável, tais como ventos, sismos, impactos e explosões.

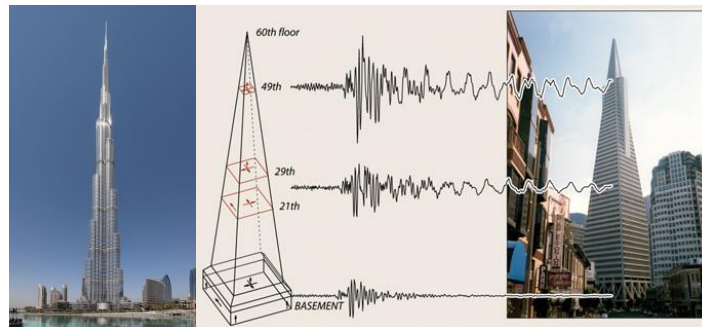


Figura 1 Burj Khalifa em Dubai . Wikipédia

Considerando os aspectos citados acima esse trabalho consiste em um código computacional baseado no Método dos Elementos Finitos, denominado EZTOOL, com interface gráfica e portabilidade EZMOBI figura 4(b), capaz de realizar análises estática, modal e dinâmica de estruturas reticuladas, incluindo a matriz de rigidez completo de Timoshenko. As rotinas foram implementadas em MATLAB e OCTAVE, com o pré-processamento realizado tanto no seu próprio interface quanto no GID desenvolvido na Universidade Politécnica da Catalunha. O código tem uma versão que pode ser utilizado para plataforma Móvel. Na literatura podem ser encontrados trabalhos semelhantes que resolvem eficientemente o problema (Oliveira,2010).outros grupos foram também responsáveis por código semelhantes para estruturas de pórtico tridimensional (S.Gomes , A. Almeida, B. dos Santos,2011). Esse código é uma nova etapa ao projeto SAE (Software de Analise Estrutural) da UFPE.

2 FORMULAÇÃO EM ELEMENTOS FINITOS PARA PÓRTICO 3D

No elemento de pórtico espacial, vários efeitos estão presentes na montagem da matriz de rigidez, temos os efeitos de flexão bidirecional, esforço axial e torção. Temos em total doze graus de liberdade. Vide figura 2

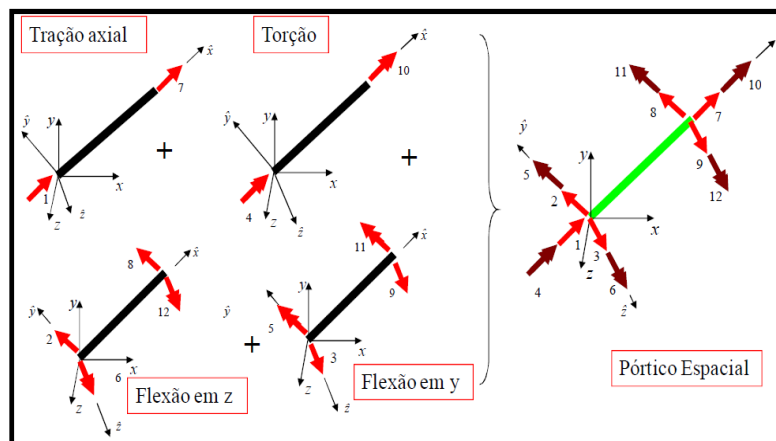


Figura 2 Efeitos e os graus de liberdade na barra de portico espacial.(Oliveira, 2010)

A deformada de uma estrutura submetida a uma força estática é calculada escrevendo

$$Ku = f_{ext} \quad (1)$$

sendo K a rigidez, u o deslocamento e f_{ext} a força.

A matriz de rigidez final do pórtico espacial da figura 3, no modelo de flexão de Timoshenko, pode ser obtida por um conveniente espalhamento considerando as contribuições de cada grau de liberdade da figura 2.

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12m_1}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{6m_1}{L} & 0 & -\frac{12m_1}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{6m_1}{L} \\ 0 & 0 & \frac{12m_2}{L^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{12m_2}{L^2} & 0 & 0 & \frac{6m_2}{L} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GI_p}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GI_p}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (4+3\gamma_y)m_2 & 0 & 0 & 0 & \frac{6m_2}{L} & 0 & (2-3\gamma_y)m_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (4+3\gamma_z)m_1 & 0 & -\frac{6m_1}{L} & 0 & 0 & 0 & (2-3\gamma_z)m_1 \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12m_1}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{6m_1}{L} & 0 & \frac{12m_1}{L^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6m_1}{L} \\ 0 & 0 & -\frac{12m_2}{L^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12m_2}{L^2} & 0 & \frac{6m_2}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GI_p}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GI_p}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6m_2}{L} & 0 & 0 & (4+3\gamma_y)m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (4+3\gamma_z)m_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

simétrica

Figura 3 Matriz do Pórtico Espacial (Oliveira, 2010)

Sendo: $m_1 = \frac{EI_z}{L(1+3\gamma_z)}$; $m_2 = \frac{EI_y}{L(1+3\gamma_y)}$; $\gamma_z = \frac{4EI_z}{\kappa GAL^2}$; $\gamma_y = \frac{4EI_y}{\kappa GAL^2}$ e $\kappa = 5/6$ (O valor de $\kappa = 5/6$ é para seção retangular). Nota-se que $\gamma_y = \gamma_z = 0$ na figura 3, temos a matriz de rigidez do pórtico tridimensional no modelo de Euler-Bernoulli.

Para resolver a equação (1), falta definir o vetor de forças nodais equivalentes dados por:

Carregamento axial p_x e torsor t uniformes ao longo da barra:

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_7 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_1 \end{Bmatrix} \quad \begin{Bmatrix} f_4 \\ f_{10} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} t \\ t \end{Bmatrix} \quad (2,3)$$

$$\text{Sendo } p_1 = \frac{p_x L}{2} \text{ e } t = \frac{tL}{2}$$

- Carregamentos veticais p_y e torsor p_z uniformes ao longo da barra:

$$\begin{Bmatrix} f_2 \\ f_6 \\ f_8 \\ f_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -p_2 \\ -p_3 \\ -p_2 \\ p_3 \end{Bmatrix} \quad \begin{Bmatrix} f_3 \\ f_5 \\ f_9 \\ f_{11} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -p_4 \\ -p_5 \\ -p_4 \\ p_5 \end{Bmatrix} \quad (4,5)$$

$$\text{Com, } p_3 = \frac{p_y L^2}{12}; p_4 = \frac{p_z L}{2} \text{ e } p_5 = \frac{p_z L^2}{12}$$

A equação a seguir que governa o movimento dinâmico de uma estrutura, utilizando o método de superposição modal (Clough, 1993)

$$M_n \ddot{Y}_n(t) + C_n \dot{Y}_n(t) + K_n Y_n(t) = P_n(t) \quad (6)$$

Sendo: $M_n = \phi_n^T m \phi_n$; $K_n = \phi_n^T k \phi_n$; $C_n = \phi_n^T c \phi_n$; $P_n = \phi_n^T p \phi_n$ são respectivamente as matrizes de massa, rigidez, amortecimento e vetor de carga desacoplado. Na matriz ϕ_n contem os n vetores dos modos de vibração da estrutura.

3 CODIGO COMPUTACIONAL DESENVOLVIDO

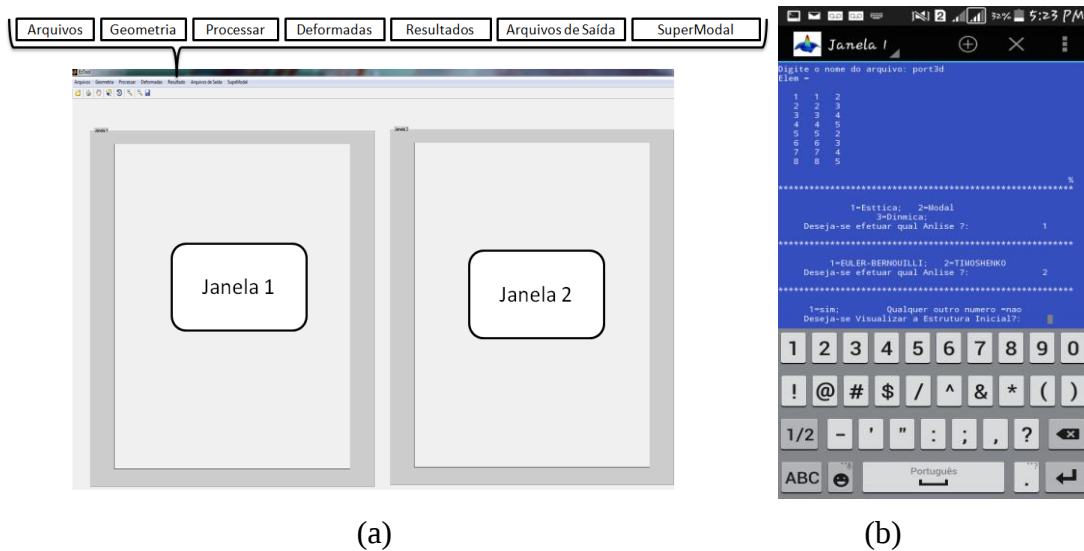


Figura 4 (a) Interface gráfica do software EZTOOL (b) Interface gráfica do EZMOBI

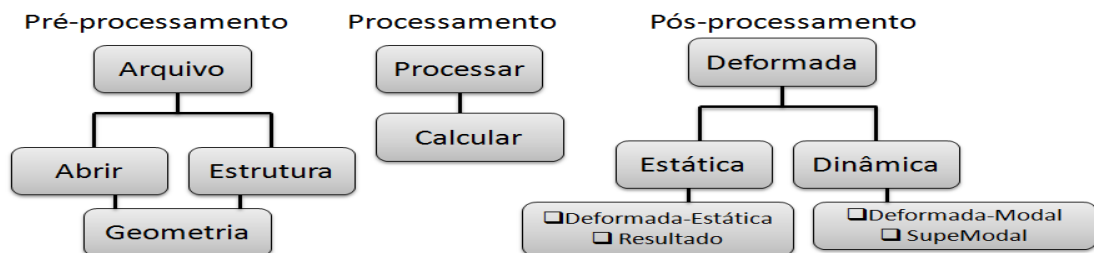


Figura 5 visão geral do programa

Para o pré-processamento, Inicialmente o usuário pode abrir um arquivo já existente acionando o botão 'Arquivo' mostrado na figura 4(a), esse último possui duas sub-funções: 'Abrir' com qual o usuário carrega um arquivo pré-existente ou 'Estrutura' que permite utilizar o próprio gerador de malha do programa, na sequência pode-se acionar o botão 'Geometria' caso deseje visualizar a geometria inicial. Para o processamento, o botão

“Processar” é acionado e em seguida o botão ‘Calcular’. Cinco botões são responsáveis para o pós-processamento, A sequência que deve ser seguida está descrita na figura 5. No caso de um celular de marca GalaxyGran Prime Duos e com o nome do arquivo de dados “port3d”, o caminho a ser seguido está descrito em seguida.

Computador>> Galaxy Gran Prime Duos>>Phone>>GNUOctave>>home>> port3d

4 APLICAÇÃO E VALIDAÇÃO

4.1 Análise Estática

Nesta seção são abordados exemplos de estruturas reticuladas em regime estático, sendo um de pórtico plano com barras inclinadas e retas, um de pórtico espacial.

O pórtico espacial apresentado abaixo tem respectivamente 3 metros de comprimento em x,y e z. Este exemplo é útil na avaliação dos deslocamentos gerados em uma análise estática. Neste exemplo está aplicada duas forças de 100 kN que estão aplicadas respectivamente nas direções x e z.

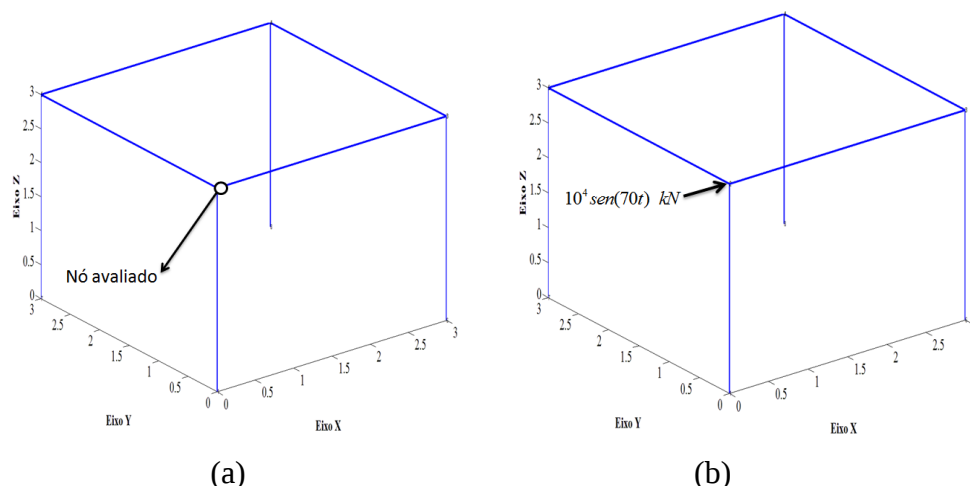


Figura 6 (a) Pórtico 3D inicial (b) Pórtico 3D com carregamento variável no nó avaliado

Tabela 1 Deslocamentos (Com as parcelas de energia de cisalhamento – TIMOSHENKO) monitorados nos Pórticos Bidimensional do SAP2000-FTOOL-EZTOOL

Programa	Nó	Trans X (mm)	Trans Y (mm)	Trans Z (mm)	Rot.X (10^{-4} rad.)	Rot.Y (10^{-4} rad)	Rot.Z (10^{-4} rad)
SAP2000	2	0.2782	0.1719	-0.01382	0.2675	0.6200	1.6150
	5	0.9509	0.1719	0.00427	0.2675	1.8360	-1.6180
EZTOOL	2	0.2782	0.1719	-0.01382	0.2675	0.6200	1.6150
	5	0.9509	0.1719	0.00427	0.2674	1.8360	-1.6180

Pode-se observar que os resultados da análise estática do código EZTOOL apresentaram ótimos resultados comparando com o software SAP2000.

4.2 Análise Modal

Nesta seção serão feitas análises modal e dinâmica dos exemplos 1 e 2 da seção anterior

Tabela 2 Seis primeiras frequências obtidas no programa do SAP2000 e EZTOOL com 1 elemento por barra

	W1 (Rad/s)	W2 (Rad/s)	W3 (Rad/s)	W4 (Rad/s)	W5 (Rad/s)	W6 (Rad/s)
<u>SAP2000</u>	113.30	113.30	124.60	224.26	1378.2	1383.5
EZTOOL	118.10	119.98	146.75	265.68	505.20	605.44
Erro (%)	4.06	5.57	15.09	15.59	63.34	56.24

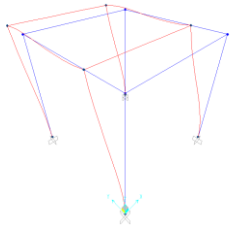
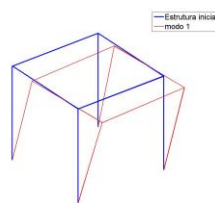
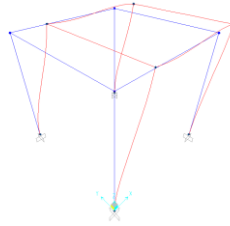
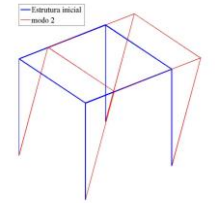
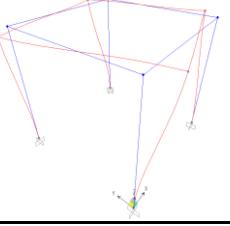
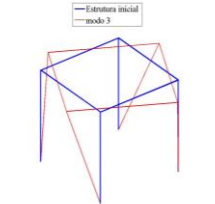
Tabela 3 Resultados das seis primeiras frequências obtidas no programa do SAP2000 e EZTOOL com 3 elementos por barra

	W1 (Rad/s)	W2 (Rad/s)	W3 (Rad/s)	W4 (Rad/s)	W5 (Rad/s)	W6 (Rad/s)
<u>SAP2000</u>	120.13	120.13	149.67	263.45	498.27	580.56
EZTOOL	120.80	121.00	153.30	296.60	532.20	603.2
Erro(%)	0.55	0.72	2.37	11.18	6.38	3.75

O erro relativo apresentado na tabela 2 é expressivo devido a função de interpolação utilizada no SAP2000 para montar a matriz de massa, ou seja, no SAP2000 é utilizada a matriz de massa discreto, portanto no EZTOOL foi empregada matriz de massa consistente. Isto justifica essa grande margem de erro. Pode-se observa na tabela 3 que essa margem de erro diminuir quando as barras foram refinadas em 3 elementos por barra. Na análise dinâmica de estruturas, as matrizes de massa consistentes produzem melhores resultados que as matrizes de massa discretas. Assim requer um menor esforço computacional para atingir um bom resultado. Observa-se no exemplo da figura 8, os resultados do SAP2000 e do EZTOOL ficam bem próximo devido à grande quantidade de barra que contém a estrutura.

4.3 Modos de Vibração

Tabela 4 Autovetores do problema de validação modal

DEFORMADAS MODAIS - AUTOVETORES		
MODO	SAP2000	EZTOOL
1		
2		
3		

4.4 Análise Dinâmica

Foram realizadas simulações utilizando o Método de Superposição Modal e os resultados foram comparados com o software de SAP2000 e os últimos mostram uma concordância entre o código desenvolvido e o SAP2000 validando assim o código desenvolvido.

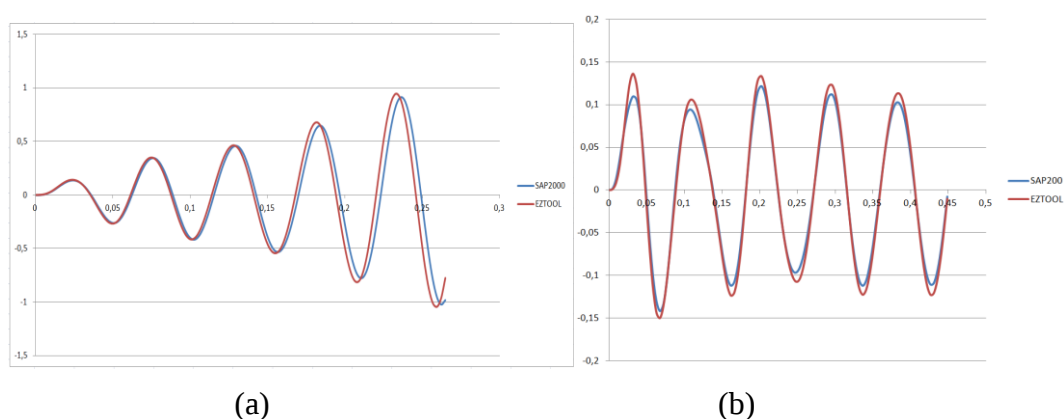


Figura 7 (a) Deslocamento com uma força variável mostrada na figura 6-(b), (b) Deslocamento com uma força variável $10^4 \text{ sen}(60t) \text{ kN}$.

Para a obtenção da resposta dinâmica foi mapeado o ponto em destaque na figura 6(a) e para isso foi analisado os valores de deslocamento referentes ao grau de liberdade na direção x.

4.5 Análise Modal

Neste exemplo será considerado um modelo adaptado do edifício do Centro de Tecnologia e Geociência (CTG) da Universidade Federal de Pernambuco. Nesse modelo o prédio da figura possui 66 pilares uniformemente espaçados de 4 metros tanto na direção x como y. Cada pilar recebe uma carga vertical no eixo z de 500 kN e duas cargas horizontais de 30 kN tanto na direção x como y. Foi adotados pilares e vigas de seção quadrada de 80cmx80, justamente para facilidade a modelagem da estrutura no EZTOOL. As propriedades da estrutura estão indicadas na tabela 5.

Tabela 5 Propriedades mecânicas e geométricas do exemplo da figura 5

Propriedades	E (MPa)	Poisson	Área (m ²)	γ_c (kg / m ³)
Mecânicas	28000	0.2	0.64	2500

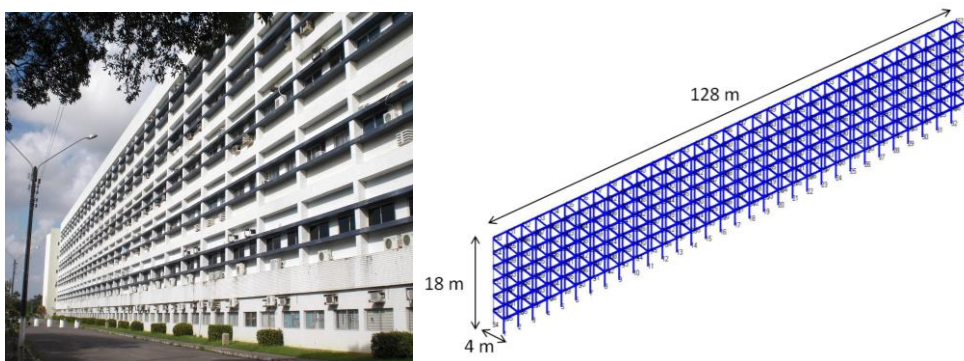


Figura 8 Edifícios do CTG e seu modelo estrutural adaptado

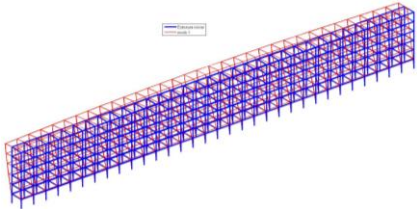
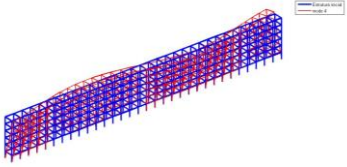
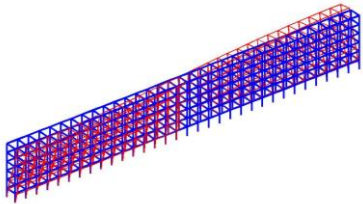
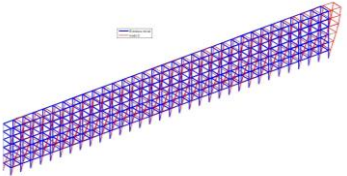
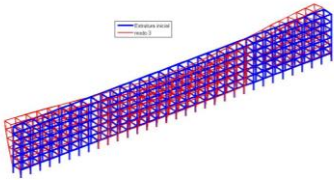
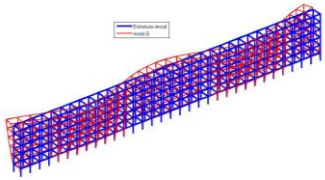
A seguir serão apresentados os resultados das análises modais realizadas. Considerando as mesmas propriedades anteriores da estrutura. Os valores obtidos serão comparados com o SAP2000.

Tabela 6 Comparação entre os resultados das seis primeiras frequências obtidas no programa do SAP2000 com 1 elemento por barra, EZTOOL com elementos por barras (TIMOSHENKO)

	W1 (Rad/s)	W2 (Rad/s)	W3 (Rad/s)	W4 (Rad/s)	W5 (Rad/s)	W6 (Rad/s)
SAP2000	19.80	20.15	21.20	23.94	27.31	28.38
EZTOOL	19.83	20.18	21.25	24.02	27.35	28.49
Erro (%)	0.15	0.15	0.24	0.33	0.15	0.39

4.6 Modos de Vibrações

Tabela 7 Autovetores do problema de validação modal

DEFORMADAS MODAIS – AUTOVETORES - EZTOOL			
MODO		MODO	
1		4	
2		5	
3		6	

4.7 Análise Dinâmica

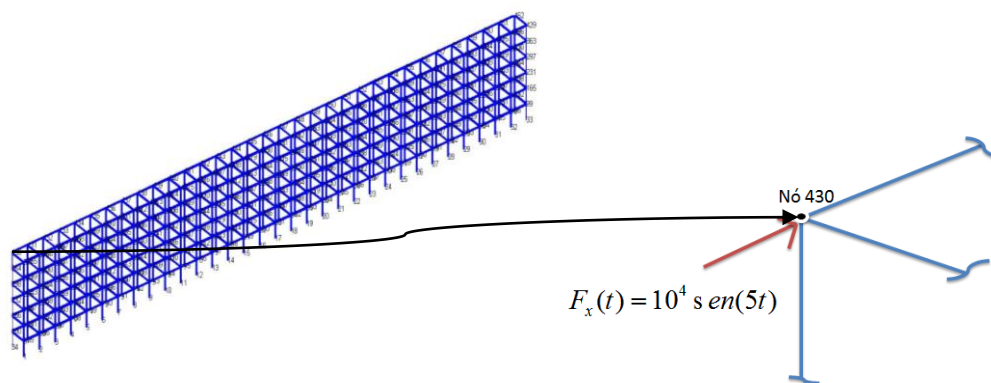


Figura 9 Edifício, destaque do nó analisado para obtenção da respostas dinâmicas.

Nesse exemplo foi localizado o nó 430 da estrutura. Para esse exemplo foi utilizado uma malha com 50 passos de tempo com valor de 0.1256. Na figura 10 mostra os resultados para esse caso. A estrutura possui em total 978 elementos. O valor da força mostrado na figura 9 e está em kN .

Os resultados mostram uma concordância entre o código desenvolvido e o SAP2000 validando assim o código desenvolvido.

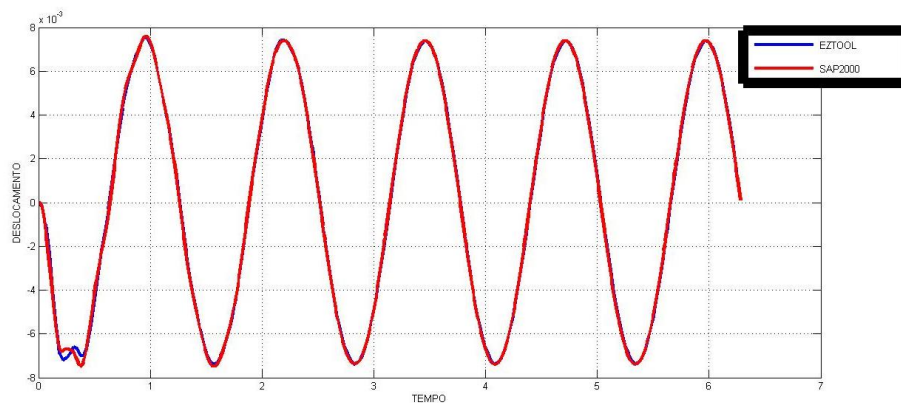


Figura 10 SAP2000 e o EZTOOL - Método de superposição modal com passo de 0.1256 segundos

CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma rápida visão geral dos vários estudos realizados pelo aluno ao longo dos anos de 2014-2015, apresenta de uma maneira geral os métodos de cálculo utilizado no campo de estática e dinâmica de estruturas reticuladas.

O código desenvolvido neste trabalho apresenta resultados satisfatórios, o que foi contado durante a validação do mesmo, comparando os valores obtidos com os resultados da análise e os resultados numéricos dos programas existentes no mercado. O código foi validado para estruturas de grandes dimensões, com um exemplo completo da edificação do CTG-UFPE, demonstrando a sua versatilidade e as excelentes capacidades de pré e pós-processamento acopladas a uma interface gráfica amigável. Do ponto de vista da interface gráfica, os objetivos também foram obtidos com sucesso, o código computacional fica-se mais fácil a ser utilizado, foram criadas ferramentas que deixaram mais versátil o processo de modelagem da estrutura, pode-se destacar a versão feita pelo celular que permite efetuar análises estática, modal e dinâmica de estrutura reticuladas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GiD. (s.d.). Fonte: <http://www.gidhome.com/>

Logan, D. L. (2012). *A First Course in the Finite Element Method*. Stamford: Cengage Learning.

MathWorks. (s.d.). *MATLAB The Language of Technical Computing*. Fonte: MathWorks Accelerating the pace of engineering of science: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>

Soriano, H. d. (Introdução à Dinâmica das Estruturas). *Introdução à Dinâmica das Estruturas*. Elsevier.

Clough, R. W. (1993). *Dynamics of Structures*. McGraw-Hill

Paulo, C. Queiroz. (2010). *Análise estática e dinâmica de estruturas reticuladas: Ambiente de simulação em java*.