

**CONSULTORIA PARA UTILIZAÇÃO DO PRÉ-
PROCESSADOR GMSH EM ATIVIDADES DE
FURNAS
(GMSH+SLAE+PARAVIEW+INSTALAÇÃO) –
TC 8000012851**

**RELATÓRIO DOS SERVIÇOS/FORNECIMENTO EXECUTADOS
04/05/2023**

ESPER Engenharia de Projetos

Av. Dep. Jamel Cecílio esq. com Av. Eng. Eurico Viana, Metropolitan Mall, Torre
Tokyo, 2690, sala 1417, Jardim Goiás. Goiânia – GO – CEP: 74.815-457



Sumário

1. DESCRITIVO DO OBJETO	2
2. TABELA DOS RELATÓRIOS DE ENTREGAS	2
3. PROVA DE CONCEITO DA MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO.....	2
4. CONCLUSÃO	17



1. DESCRITIVO DO OBJETO

Neste relatório, em cumprimento às cláusulas do Termo contratual nº: 8000012851, apresentamos o relatório técnico de entregas parciais e/ou serviços executados.

O objeto do presente relatório em análise trata-se de uma implementação, validação e consultoria de integração computacional para análise estrutural de radier estaqueado em atividades de FURNAS.

2. TABELA DOS RELATÓRIOS DE ENTREGAS

Entrega	Data	Assunto	Autor
01	24/03/23	Definições dos itens: do cronograma físico financeiro, do SLAE a ser utilizado na análise linear, da geometria e suas parametrizações, dos carregamentos aplicados, das análises a serem implementadas e do pós-processamento. Demonstração da capacidade de implementação computacional.	Jonathas
02	04/05/23	Prova de conceito da modelagem	Jonathas

3. PROVA DE CONCEITO DA MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO

Conforme discutido na reunião que definiu a entrega do relatório R01, foi implementado uma rotina automatizada para geração da geometria de uma estrutura de concreto parametrizada, como mostra a Figura 1.

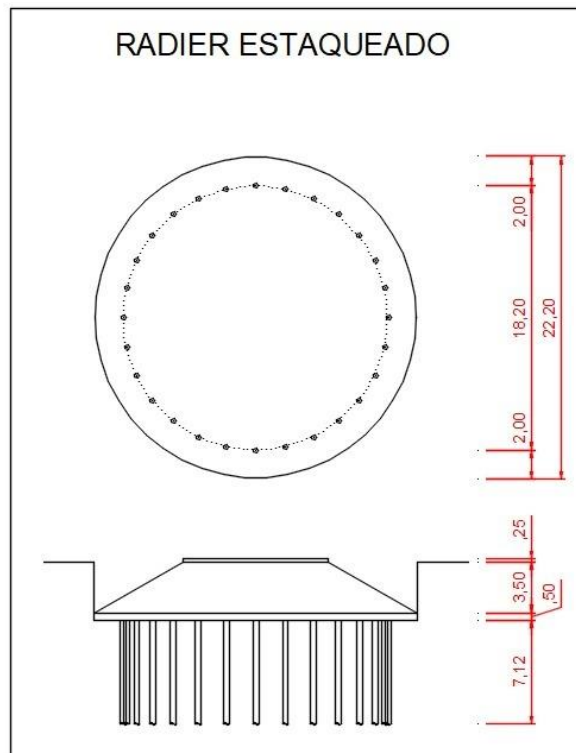


Figura 1: Imagem da tipologia do radier-estaqueado para parametrização.

O arquivo de entrada com as informações a serem processadas pela rotina computacional implementada está no formato (.txt) e segue a formatação de dados no estilo TOML (<https://toml.io/en/>). Na Figura 2 são mostrados os dados que foram considerados para controlar a geometria paramétrica.

```
1 # Documento formatado em TOML
2 # https://toml.io/en/
3 #
4 # Autores: Jonathas Kennedy Alves Pereira / Phablo Verissimo Inácio Dias
5 # Data: 12/02/2022
6 # Assunto: modelo de arquivo de configuração de radier estaqueado
7
8 titulo = "Radier Estaqueado"
9
10 # ----- DADOS DO RADIER ----- #
11 # ----- DADOS DO RADIER ----- #
12 # ----- DADOS DO RADIER ----- #
13 [geometria]
14
15     diam_base = 2220      # diametro da base do radier (cm)
16     diam_topo = 900      # diametro do topo do radier (cm)
17     h_base = 50          # altura da base (cm)
18     h_cone = 350         # altura do tronco de cone (cm)
19     h_topo = 25          # altura do topo (cm)
20
21     mod_E = 210000e6     # modulo de elasticidade (Pa)
22     poi = 0.3            # coeficiente de Poisson
23     den = 7800           # densidade (kg/m³)
24
25 # ----- dados referentes a geometria das estacas ----- #
26 # ----- dados referentes a geometria das estacas ----- #
27 # ----- dados referentes a geometria das estacas ----- #
28 [estacas]
29
30     num_est = 15         # numero de estacas
31     diam_est = 30        # diametro das estacas (cm)
32     h_est = 712          # altura das estacas (cm)
33     cob_est = 200        # distancia da face de concreto ao eixo das estacas (cm)
34
35 # ----- DADOS PARA ANALISE ----- #
36 # ----- DADOS PARA ANALISE ----- #
37 # ----- DADOS PARA ANALISE ----- #
38
```

Figura 2: Imagem da tipologia do radier-estaqueado para parametrização.



Como visto na imagem acima, além de controlar a geometria paramétrica o arquivo de entrada também permite o controle dos materiais dela, sendo que, todas as informações relativas as unidades de medidas estão acompanhando cada um dos critérios quando se faz necessário. Tais informações constam após o grifo de comentário do padrão TOML, que é dado pelo caractere '#’.

Nas imagens a seguir, serão demonstradas as capacidades paramétricas da rotina implementada. Os valores utilizados não indicam algum tipo de restrição, sendo apenas colocados como forma de evidenciar as funções de controles dos parâmetros.

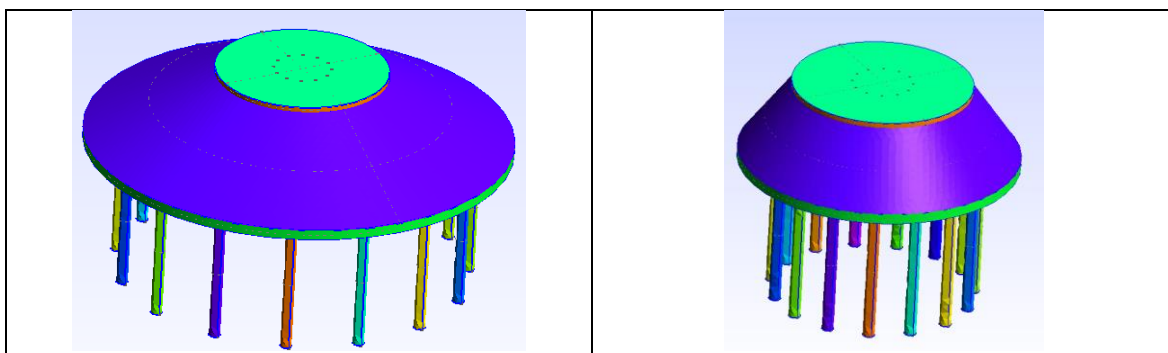


Figura 3: Variação do diâmetro da base: 2220 cm (esq.), 1400 cm (dir.).

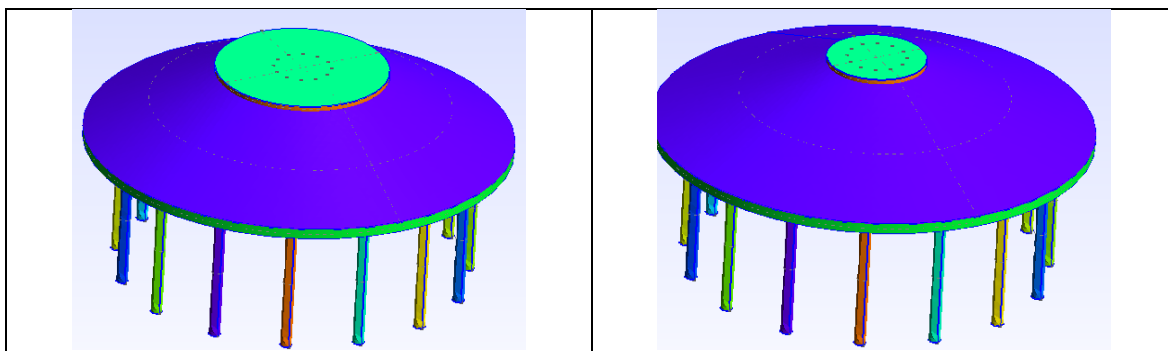


Figura 4: Variação do diâmetro do topo: 900 cm (esq.), 500 cm (dir.).

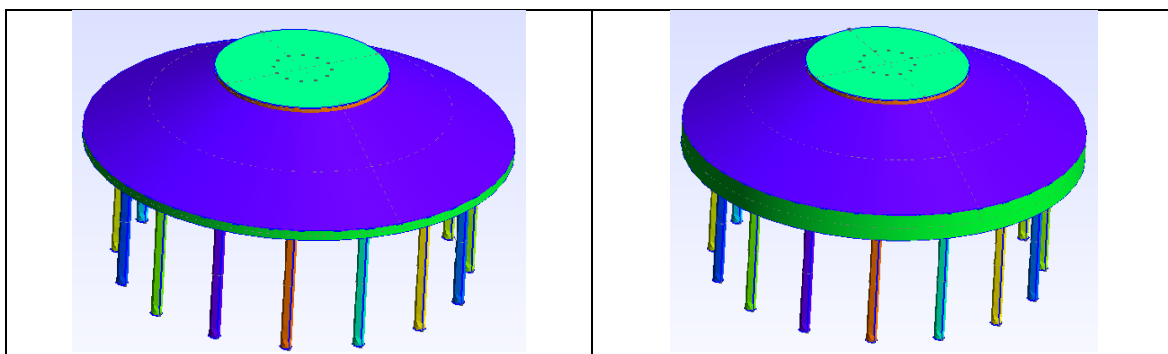


Figura 5: Variação da altura da base: 50 cm (esq.), 150 cm (dir.).

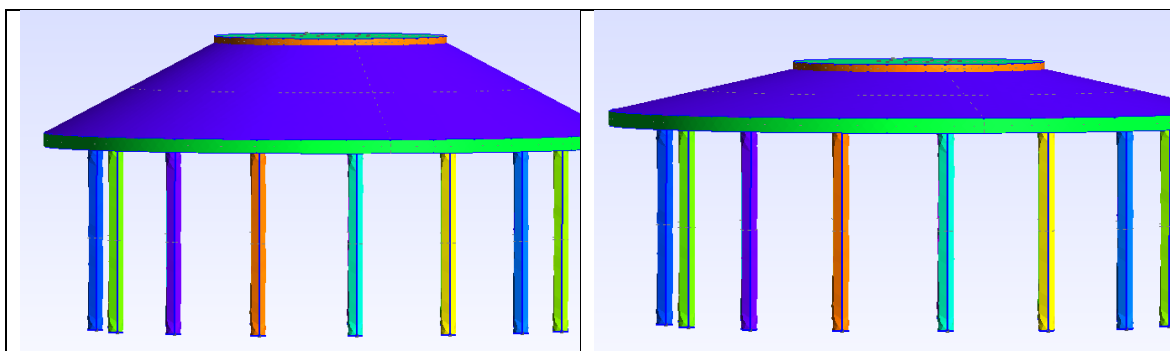


Figura 6: Variação da altura do tronco de cone: 350 cm (esq.), 150 cm (dir.).

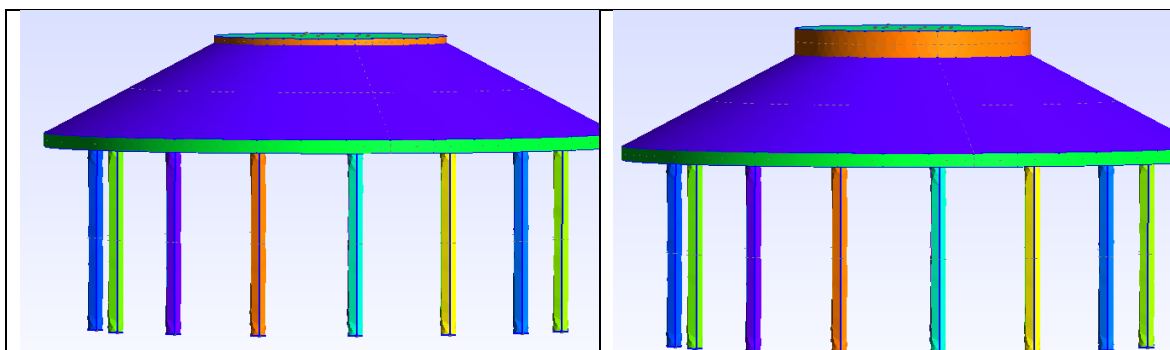


Figura 7: Variação da altura do topo: 25 cm (esq.), 100 cm (dir.).

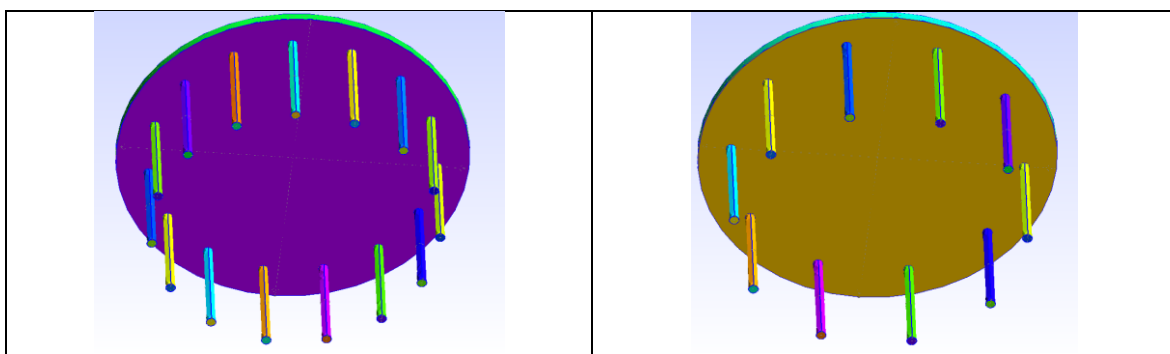


Figura 8: Variação do número de estacas: 15 (esq.), 10 (dir.).

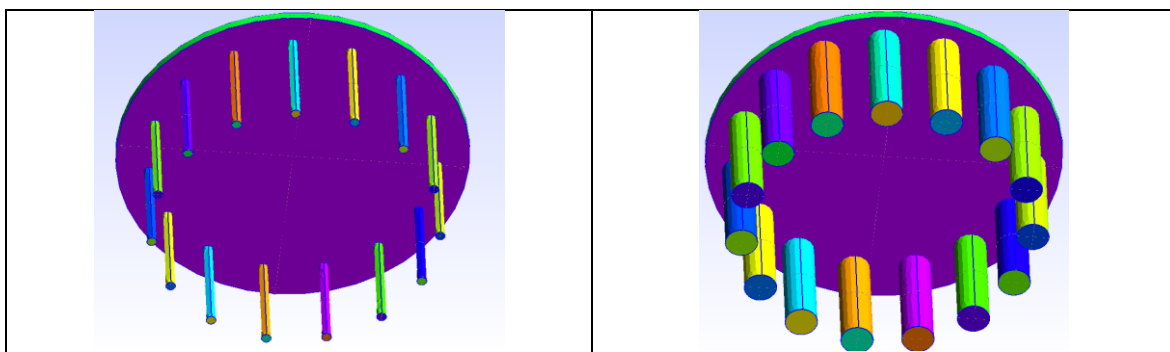


Figura 9: Variação do diâmetro das estacas: 30 cm (esq.), 100 cm (dir.).

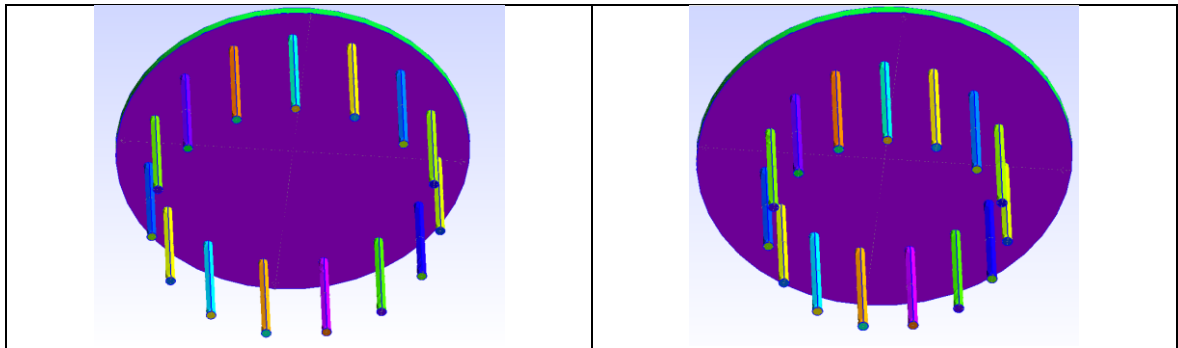


Figura 10: Variação da distância da face externa da base até o eixo das estacas: 200 cm (esq.), 400 cm (dir.).

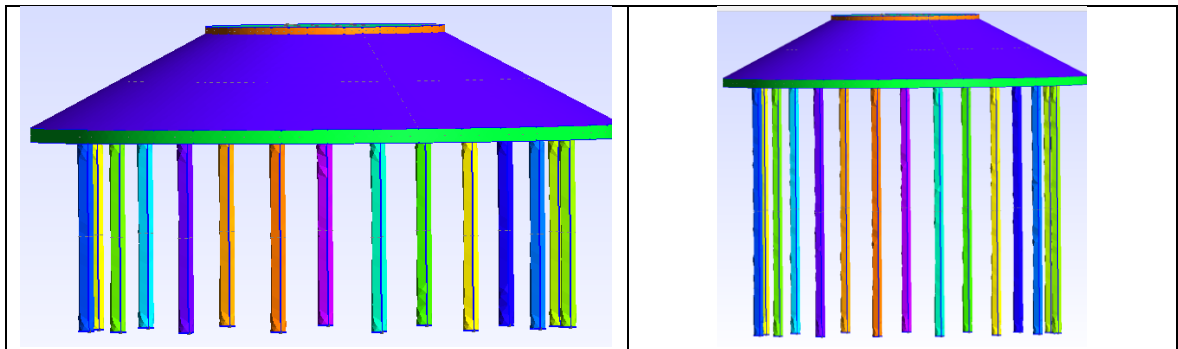


Figura 11: Variação da altura das estacas: 712 cm (esq.), 1512 cm (dir.).

Atendendo ao item 2.2.2 do APENSO A, foi implementando uma geração de malha composta com um elemento tetraédrico 3D (C3D4) de 4 nós e 1 ponto de integração, como mostrado na Figura 12. Para o total cumprimento deste item resta-se ainda a implementação do solo envolvente. Também é exemplificado os pontos de aplicação dos carregamentos.

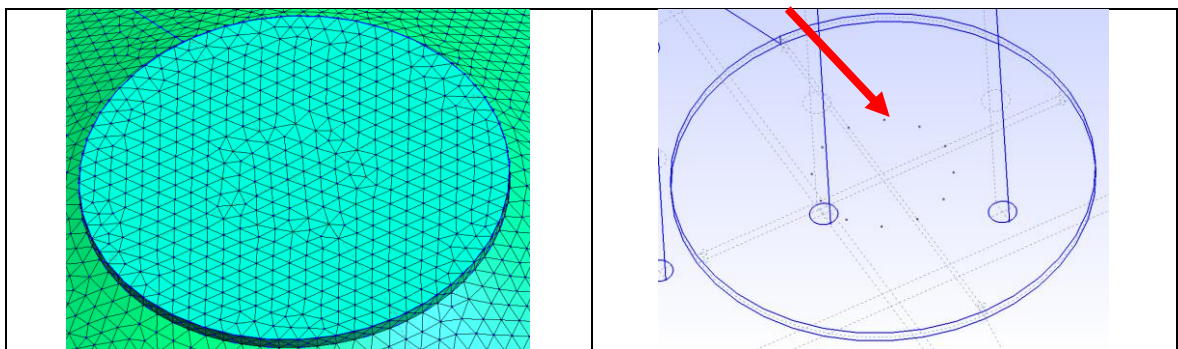


Figura 12: Elemento tetraédrico implementado: GMSH (esq.), pontos de aplicação da carga dinâmica (dir.).



Atendendo ao item 2.2.3 do APENSO A, foi implementando um controle de malha contendo a dimensão mínima, e máxima, do elemento além de um multiplicador global da dimensão característica do elemento. Esse fator age da seguinte forma: é computado de forma local o melhor tamanho de malha que atenda cada um dos vários elementos da geometria (estacas, radier e futuramente o solo envolvente), então estes valores são restritos pelos tamanhos de malha mínimo e máximos, sendo então, multiplicados pelo fator de malha que age de forma global. Na figura 13 está apresentado o local de entrada para estes controle no arquivo txt.

```
35 # -----  
36 # ----- DADOS PARA ANALISE -----  
37 # -----  
38 # -----  
39 # -----  
40 # ----- gerais -----  
41 # -----  
42 [geral]  
43 gravidade = 9.81 # aceleração da gravidade m/s²  
44 FatorDeMalha = 1 # multiplicador geral do tamanho da malha  
45 MalhaMin = 0.4  
46 MalhaMax = 0.4  
47  
48 # ----- vibração livre -----  
49 # -----  
50 [freq_natural]  
51
```

Figura 13: Controle global da malha.

Atendendo ao item 2.2.4 do APENSO A, a rotina computacional está exportando um arquivo “XXXXXX_mesh.inp”. Este arquivo está estruturado no padrão ‘.inp’ que é entendido pelo SLAE escolhido (Calculix), mas também pode ser aberto pelo em editor de texto escolhido e que interprete o padrão UTF-8 (ASCII), normalmente qualquer editor de texto que abra um arquivo ‘.txt’ é capaz de interpretar este documento.

A estrutura do arquivo “XXXXXX_mesh.inp” se dá da forma descrita a seguir:

*NODE = descrição dos números dos nós e as suas coordenadas seguindo o padrão (nº do nó, coord. X, coord. Y, coord. Z)

```
1 *Heading  
2 C:\Users\Jonathas\Downloads\teste\teste_mesh.inp  
3 *NODE  
4 1, 4.25, 1.5, 0  
5 2, 4.25, 1.299038, 0.75  
6 3, 4.25, 0.75, 1.299038  
7 4, 4.25, 0, 1.5  
8 5, 4.25, -0.75, 1.299038  
9 6, 4.25, -1.299038, 0.75  
10 7, 4.25, -1.5, 0  
11 8, 4.25, -1.299038, -0.75  
12 9, 4.25, -0.75, -1.299038  
13 10, 4.25, 0, -1.5
```




Figura 14: Estrutura do *NODE.

*NODE = descrição dos números dos nós e as suas coordenadas seguindo o padrão (nº do nó, coord. X, coord. Y, coord. Z)

```
1 *Heading
2 C:\Users\Jonathas\Downloads\teste\teste_mesh.inp
3 *NODE
4 1, 4.25, 1.5, 0
5 2, 4.25, 1.299038, 0.75
6 3, 4.25, 0.75, 1.299038
7 4, 4.25, 0, 1.5
8 5, 4.25, -0.75, 1.299038
9 6, 4.25, -1.299038, 0.75
10 7, 4.25, -1.5, 0
11 8, 4.25, -1.299038, -0.75
12 9, 4.25, -0.75, -1.299038
13 10, 4.25, -0, -1.5
```

Figura 14: Estrutura do *NODE.

*ELEMENT, type=C3D4 = descrição dos números dos elementos e os quatro nós que o compõe segundo a sequência da figura 15.

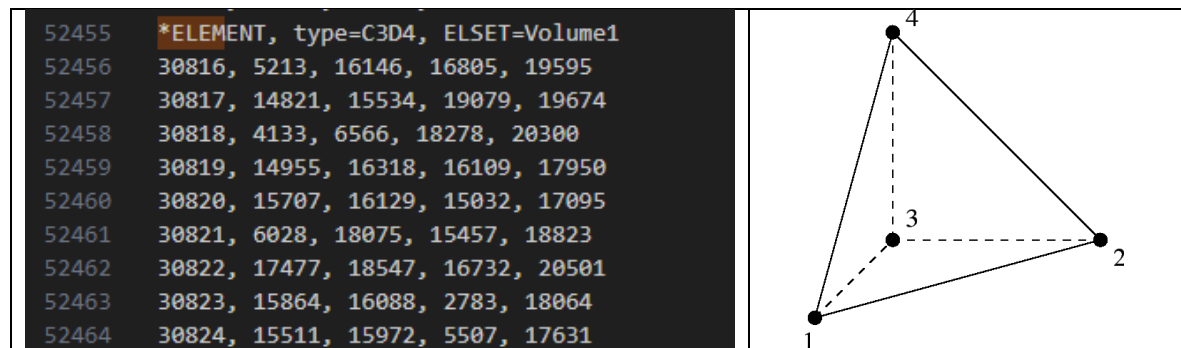


Figura 15: Estrutura do *ELEMENT. (esq.), elemento C3D4 (dir.).

*NSET = descrição do grupo de nós utilizados para alguma condição de contorno. Composto pelo número dos nós.

```
126576, 126577, 126578, 126579, 126580, 126581, 126582, 126583,
126586, 126587, 126588, 126589,
*NSET, NSET=nos_carga
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10,
11, 12,
*NSET, NSET=LatEstacas
13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22,
23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32,
33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42,
47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56,
57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66,
67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76,
77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86,
87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96,
97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106,
107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116,
117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126,
```

Figura 16: Estrutura do *NSET.



*ELSET = descrição do grupo de elementos utilizados para alguma aplicação de material ou condição de contorno, se necessário. Composto pelo número dos elementos.

```
158209 *ELSET,ELSET=bloco
158210 30816, 30817, 30818, 30819, 30820, 30821, 30822, 30823, 30824, 30825,
158211 30826, 30827, 30828, 30829, 30830, 30831, 30832, 30833, 30834, 30835,
158212 30836, 30837, 30838, 30839, 30840, 30841, 30842, 30843, 30844, 30845,
158213 30846, 30847, 30848, 30849, 30850, 30851, 30852, 30853, 30854, 30855,
158214 30856, 30857, 30858, 30859, 30860, 30861, 30862, 30863, 30864, 30865,
158215 30866, 30867, 30868, 30869, 30870, 30871, 30872, 30873, 30874, 30875,
158216 30876, 30877, 30878, 30879, 30880, 30881, 30882, 30883, 30884, 30885,
158217 30886, 30887, 30888, 30889, 30890, 30891, 30892, 30893, 30894, 30895,
158218 30896, 30897, 30898, 30899, 30900, 30901, 30902, 30903, 30904, 30905,
```

Figura 17: Estrutura do * ELSET.

Atendendo ao item 2.2.3.1 do APENSO A e conforme definido em reunião, a rotina computacional está exportando para visualização no software Paraview os seguintes resultados: deslocamentos e tensões devido à carregamento estático, ver figuras 18 à 25.

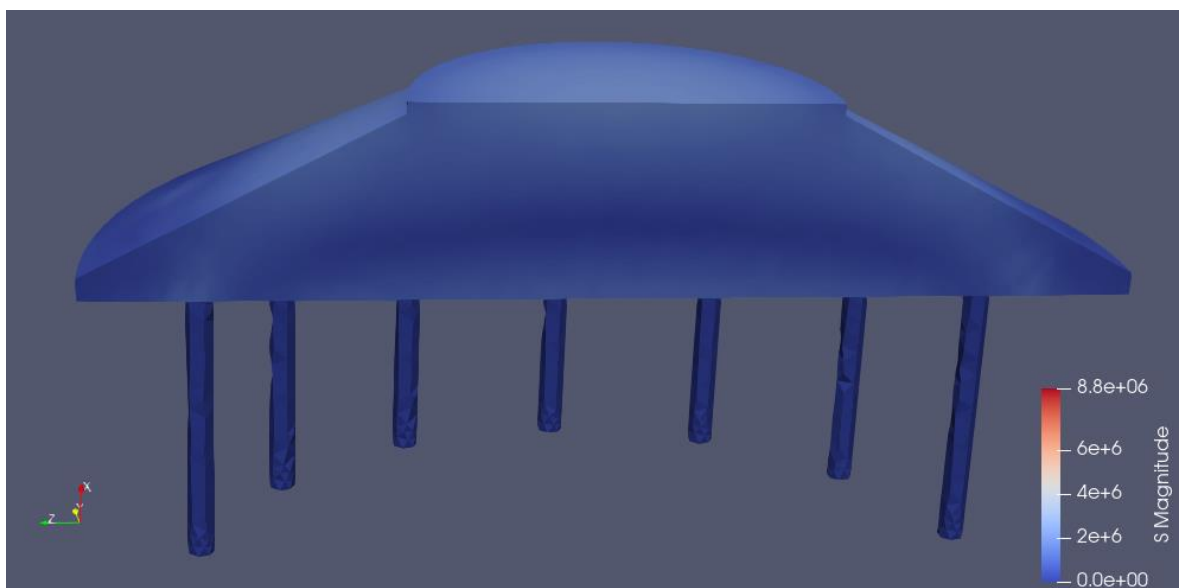


Figura 18: Tensões Magnitude.

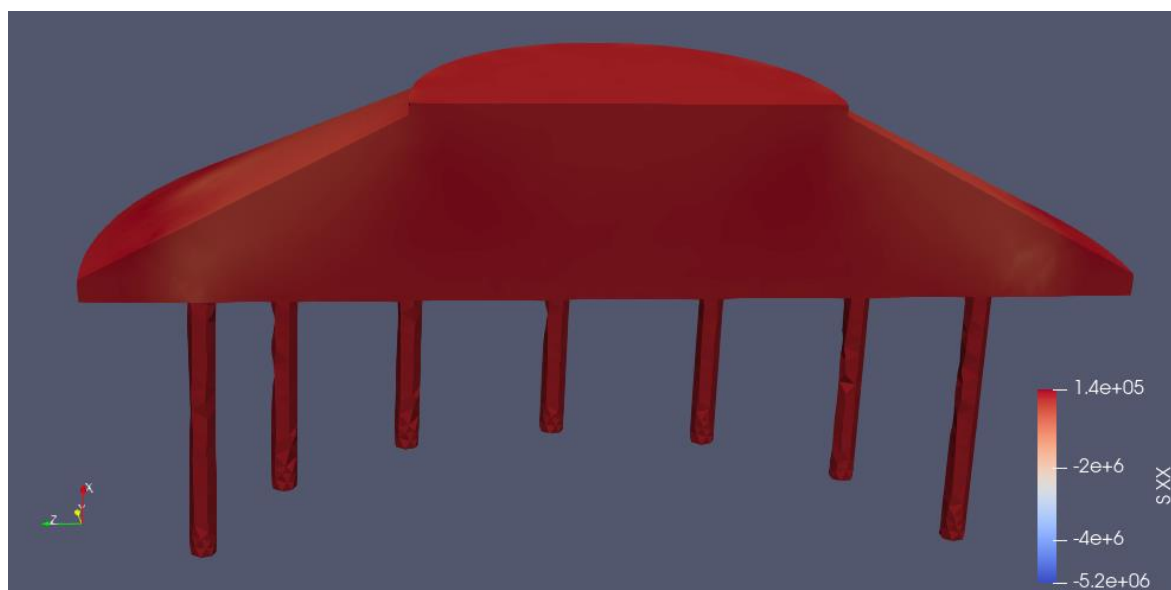


Figura 19: Tensões normais σ_{xx} .

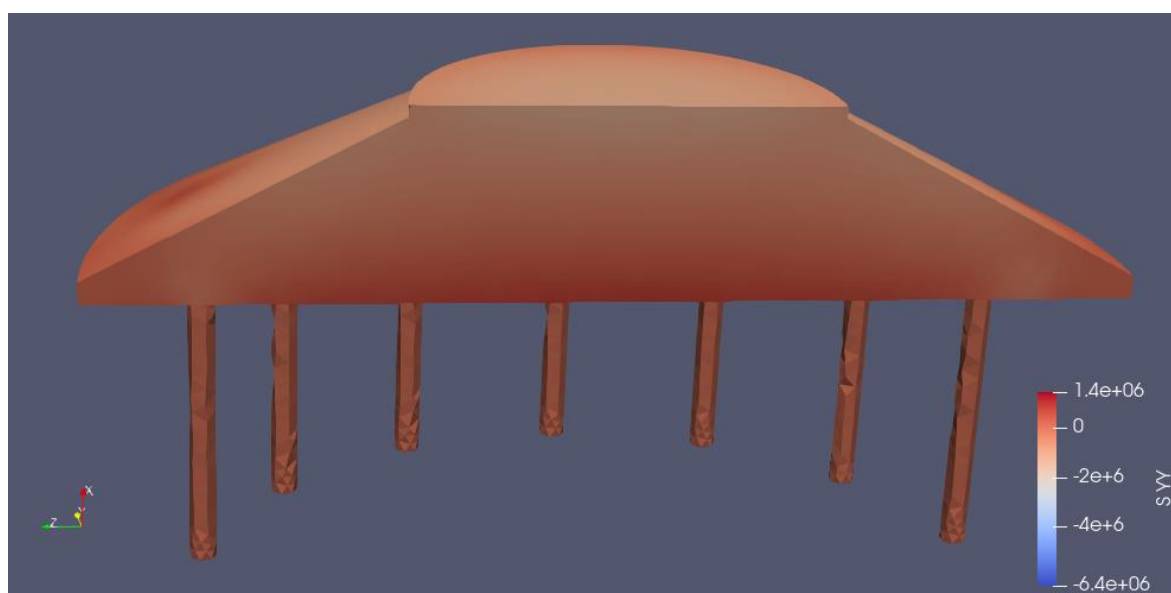


Figura 20: Tensões normais σ_{yy} .

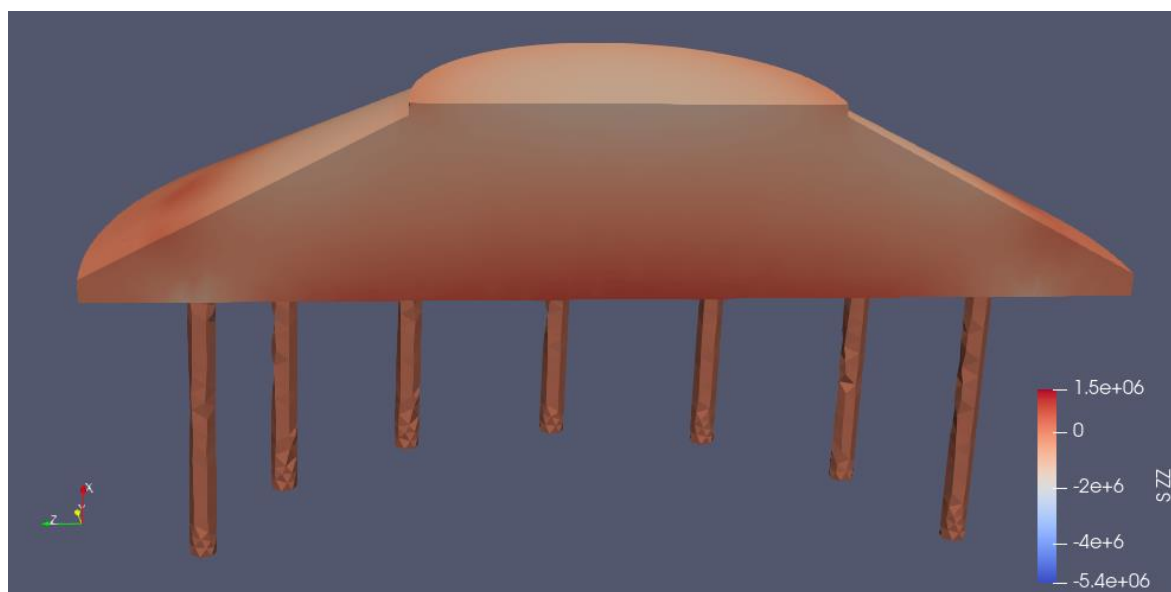


Figura 21: Tensões normais σ_{zz} .



Figura 22: Tensões cisalhantes σ_{xy} .

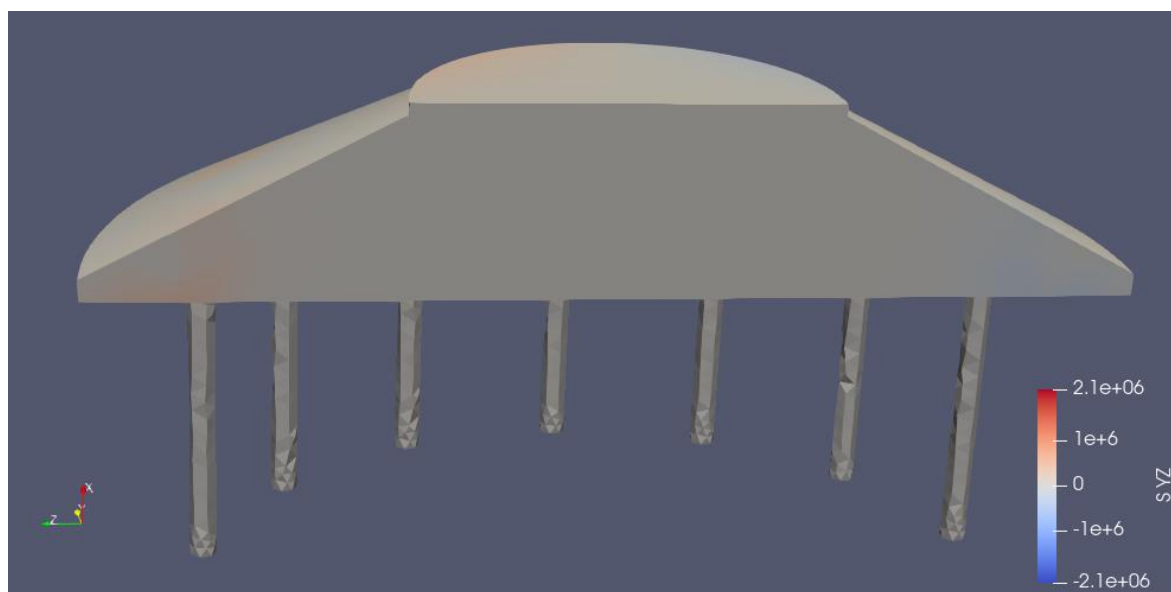


Figura 23: Tensões cisalhantes σ_{yz} .

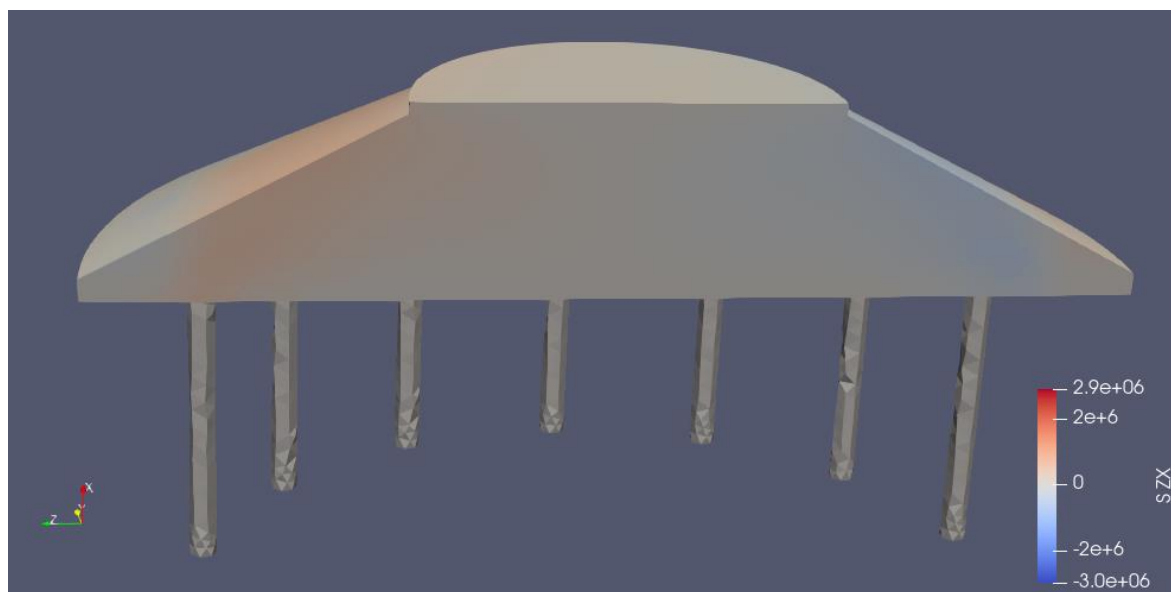


Figura 24: Tensões cisalhantes σ_{xz} .

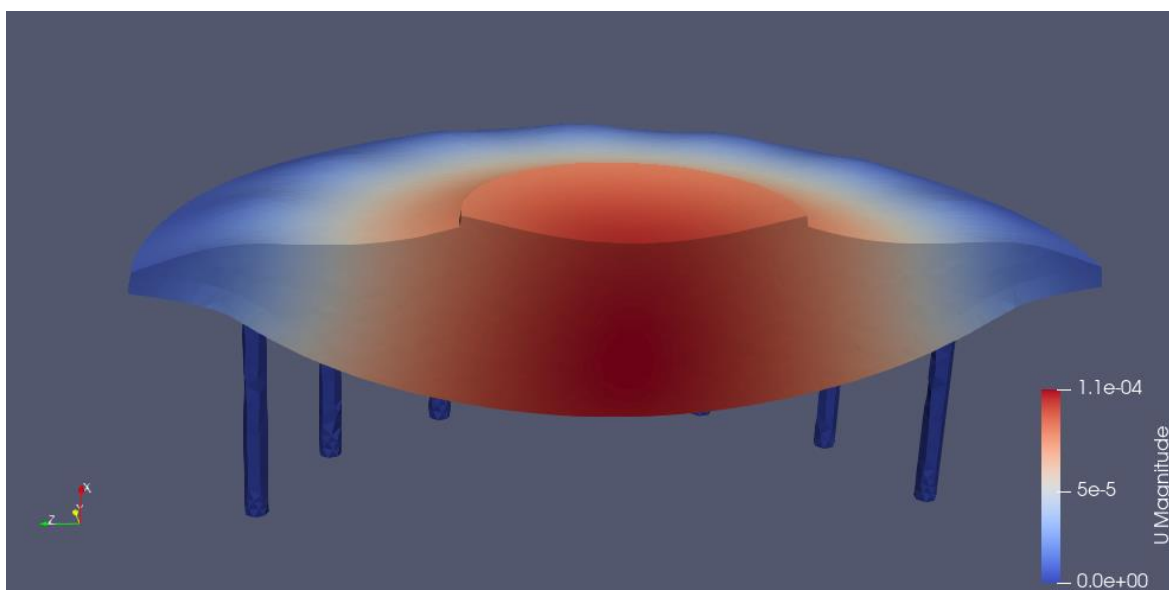


Figura 25: Deslocamentos devido ao carregamento estático.

A rotina implementada tratou os dados e respostas de tal forma que possibilita a visualização dos em tempo real, no Paraview, dos dados de cada nó indicado pelo usuário. Ver figura abaixo.

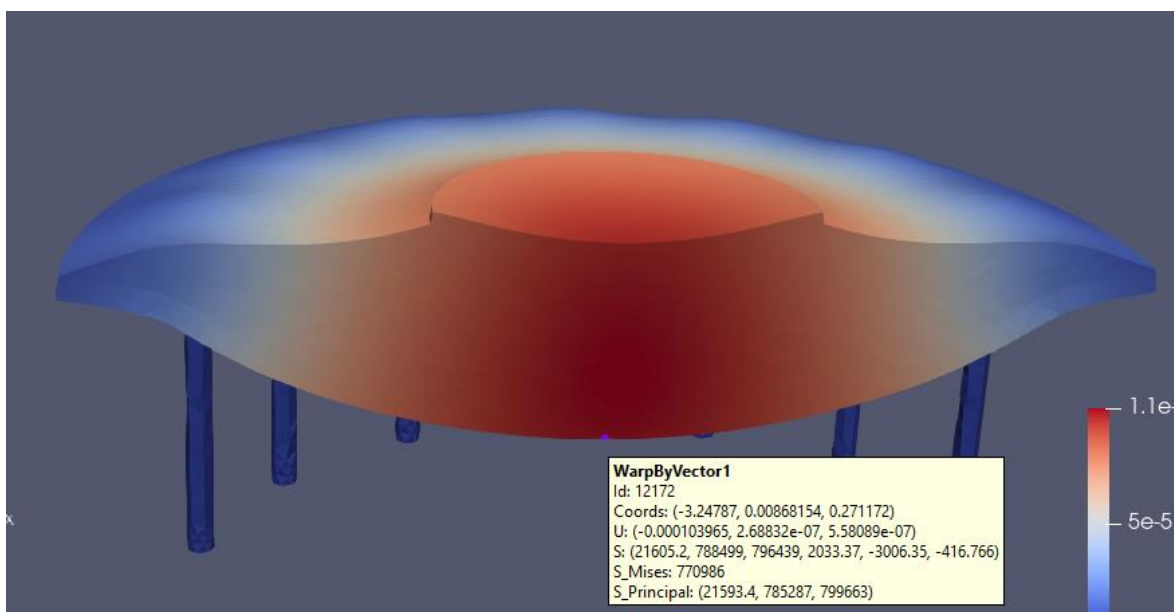


Figura 26: Acesso aos resultados por nó no Paraview.

Atendendo ao item 2.2.3.2 do APENSO A, a rotina computacional está processando e exportando os resultados no número de modos de vibração



especificados pelo usuário. Como o número total de modos terá influência no tempo total de processamento, este critério foi deixado para o usuário definir.

```
# ----- vibração livre ----- #
# ----- #
[freq_natural]

num_modos = 10      # numero de modos para calcular
#
# nos criterios abaixo, preencher 0 se deseja utilizar os valores 'default'
menor_freq = 1e-5    # menor frequencia natural desejada em rad/s
maior_freq = 0       # maior frequencia natural desejada em rad/s

# ----- vibração forçada ----- #
# ----- dados referentes aos carregamentos ----- #
# ----- #
[cargas]

num_cargas = 12      # numero de pontos de carregamentos aplicados no blc
diam_carga = 300     # diametro do circulo de distribuição das cargas (c
```

Figura 27: Critérios para cálculo modal.

Conforme o apenso, estão sendo gerados os valores numéricos de modos, frequências dos modos de vibração e suas participações modais. Na figura exemplifica 10 modos mas este valor depende do critério definido pelo usuário.

MODO No	AUTOVALOR	FREQUENCIA		
		PARTE REAL (RAD/TIME)	PARTE REAL (CYCLES/TIME)	PARTE IMAGINARIA (RAD/TIME)
1	0.1252871E+06	0.3539592E+03	0.5633436E+02	0.0000000E+00
2	0.2359810E+06	0.4857788E+03	0.7731409E+02	0.0000000E+00
3	0.2371798E+06	0.4870111E+03	0.7751023E+02	0.0000000E+00
4	0.4121027E+06	0.6419522E+03	0.1021699E+03	0.0000000E+00
5	0.4138925E+06	0.6433448E+03	0.1023915E+03	0.0000000E+00
6	0.6780849E+06	0.8234591E+03	0.1310576E+03	0.0000000E+00
7	0.8443548E+06	0.9188878E+03	0.1462455E+03	0.0000000E+00
8	0.8464940E+06	0.9200511E+03	0.1464307E+03	0.0000000E+00
9	0.1164485E+07	0.1079113E+04	0.1717461E+03	0.0000000E+00
10	0.1166316E+07	0.1079961E+04	0.1718812E+03	0.0000000E+00

FATORES DE PARTICIPACAO						
MODO No	X-COMPONENTE	Y-COMPONENTE	Z-COMPONENTE	X-ROTACAO	Y-ROTACAO	Z-ROTACAO
1	-0.2299893E+04	0.1724607E+02	-0.1108673E+02	-0.2291306E+02	0.2107766E+02	0.4800172E+02
2	-0.3962371E+01	-0.1836213E+04	-0.1507182E+04	-0.1023978E+02	0.1223052E+04	-0.1453041E+04
3	0.1539491E+02	0.1501766E+04	-0.1831301E+04	-0.7749067E+02	0.1406026E+04	0.1180174E+04
4	-0.2536545E+01	0.5211974E+03	0.5947030E+03	-0.7543050E+02	-0.8476483E+04	0.7518890E+04
5	0.4975437E+01	0.6037441E+03	-0.5321498E+03	0.1187421E+02	0.7525881E+04	0.8482766E+04
6	-0.1797568E+01	0.4106502E+01	0.3045212E+01	0.1640374E+05	-0.2507504E+02	0.3944415E+02
7	-0.5352012E+01	-0.7948769E+00	-0.5853033E+01	0.7158227E+02	-0.5184021E+00	0.7253899E+00
8	-0.5311172E+01	-0.2725739E+01	-0.1886698E+01	-0.2444527E+01	-0.1041201E+02	0.1582473E+02
9	-0.7244814E+02	-0.1152847E+01	-0.1119791E+02	0.4854419E+02	-0.3384188E+02	0.1294042E+02
10	0.8818572E+02	0.5782051E+01	0.7643061E+01	0.7356363E+01	-0.3618404E+02	-0.5143776E+02

Figura 28: Relatório da vibração livre.

Os modos de vibração também estão sendo exportados para o Paraview para sua visualização da quantidade de modos escolhida pelo usuário. Ver figura 29.

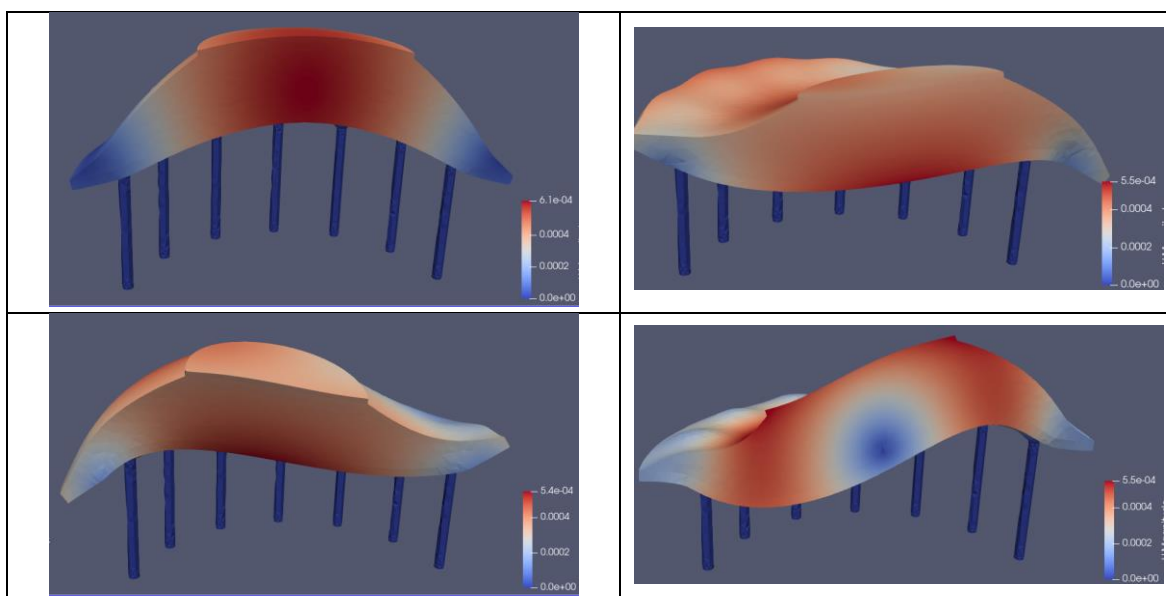


Figura 29: Primeiros 4 modos de vibração.

A análise dinâmica de vibração forçada está sendo exportados para visualização no Paraview, de forma análoga à vibração livre para análise modal, fica a cargo do usuário a geração e escolha dos pontos em que irá visualizar a evolução temporal do ponto em análise. Ver Figura 30.

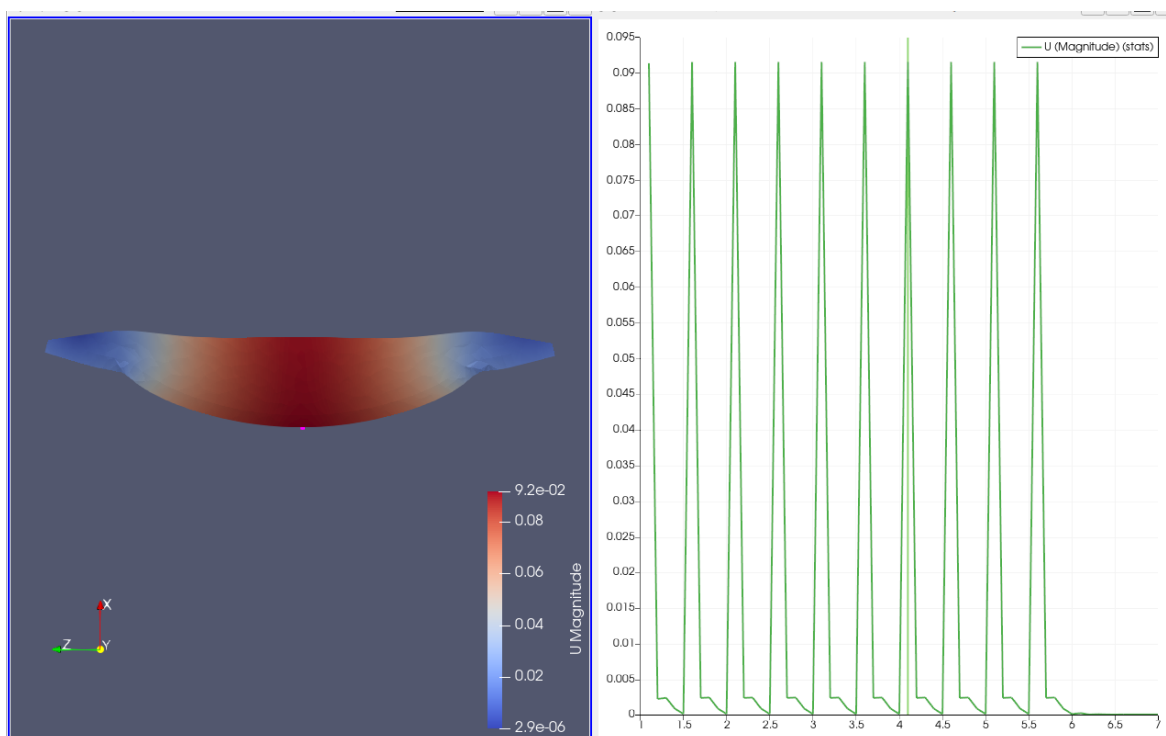
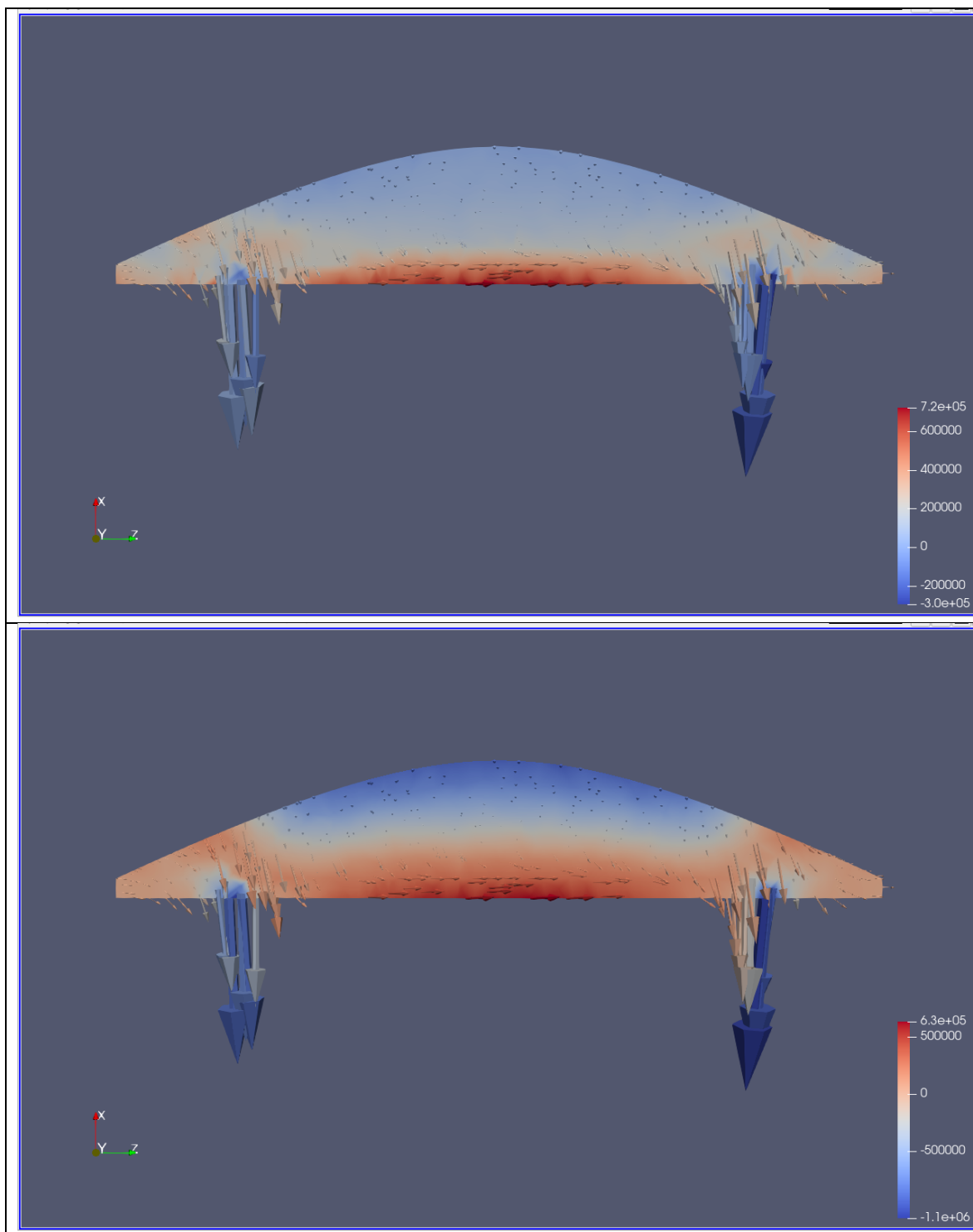


Figura 30: Deformada da seção e Time-history de ponto escolhido.



Também estão sendo calculados e gerados as tensões principais do vetor de tensão do elemento C3D4. Na Figura 31 demonstramos a visualização esperada para uma seção.



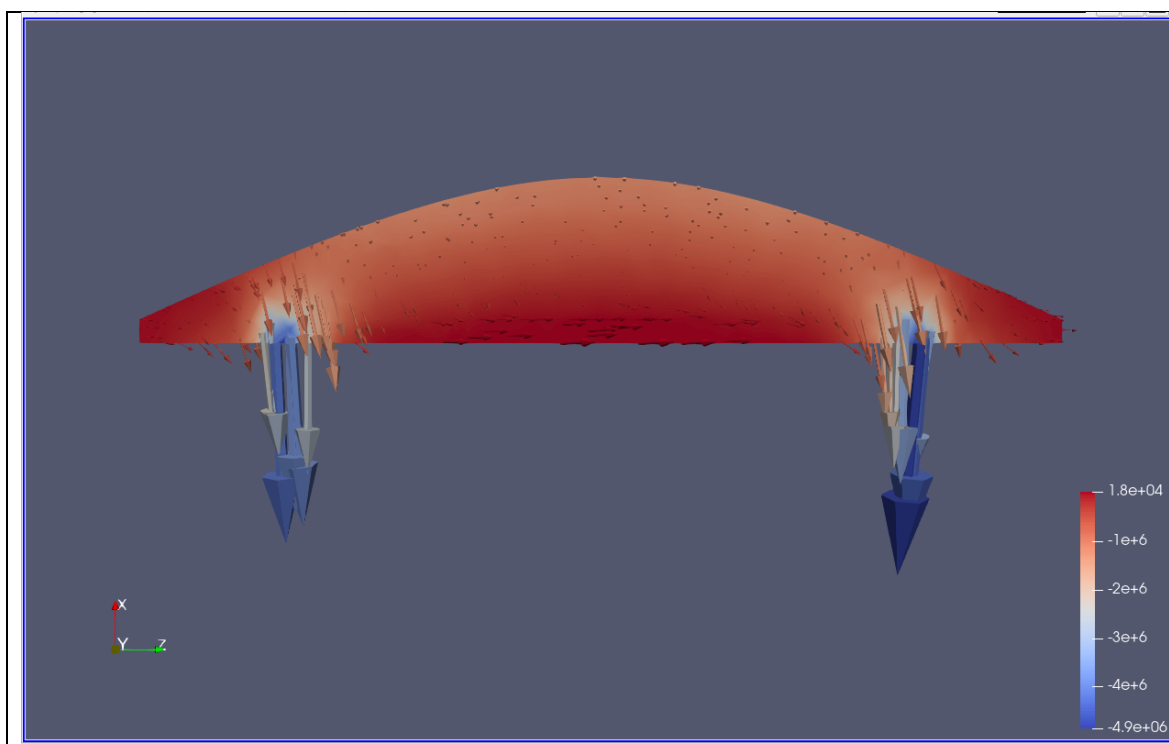


Figura 31: Valores e direções principais de σ_1 , σ_2 e σ_3 do tensor de Cauchy.

4. CONCLUSÃO

A geração paramétrica do radier está implementada, sendo necessária apenas implementar limites para as dimensões, caso seja o desejo escolha de Furnas de forma a garantir a fidedignidade da geometria no modelo numérico.

Todos os cálculos da segunda entrega estão sendo processados: processamento estático, processamento modal e dinâmico. Valores de tensões, deslocamentos, modos de vibração e frequências naturais, deslocamentos no tempo devido à análise de vibração forçada e a análise estática estão convertidas para visualização no Paraview e podem ser exportadas à critério do usuário para o formato “csv”.

O processamento está totalmente automatizado para execução em Linux, sendo necessário digitar no terminal “furnapy” para ser iniciado o ambiente virtual em Python, sendo este que irá carregar as bibliotecas desenvolvidas e instaladas além de executar o arquivo de controle das rotinas do processamento.

Anexado a este, segue dois vídeos capturados da tela de computador que demonstram o funcionamento da automatização, além das capacidades de



algumas das funções desenvolvidas, mas precisamente, uma série temporal da vibração forçada.

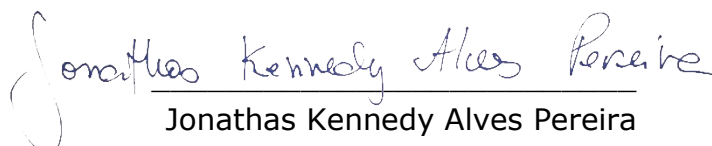
Todo o código desenvolvido está disponível em <https://github.com/xJohnKennedy/FurnasDinamica> para visualização e acompanhamento. Lá constam, além do código desenvolvido, os códigos fontes dos outros softwares “*open source*” que foram utilizados.

A Sem mais comentários e à disposição para qualquer outro esclarecimento.

Atenciosamente,

Goiânia, 04 de maio de 2023.

Walid Joseph Esper
Eng. Civil CREA-GO 7119/D


Jonathas Kennedy Alves Pereira
Eng. Civil CREA-GO 1019655690/D